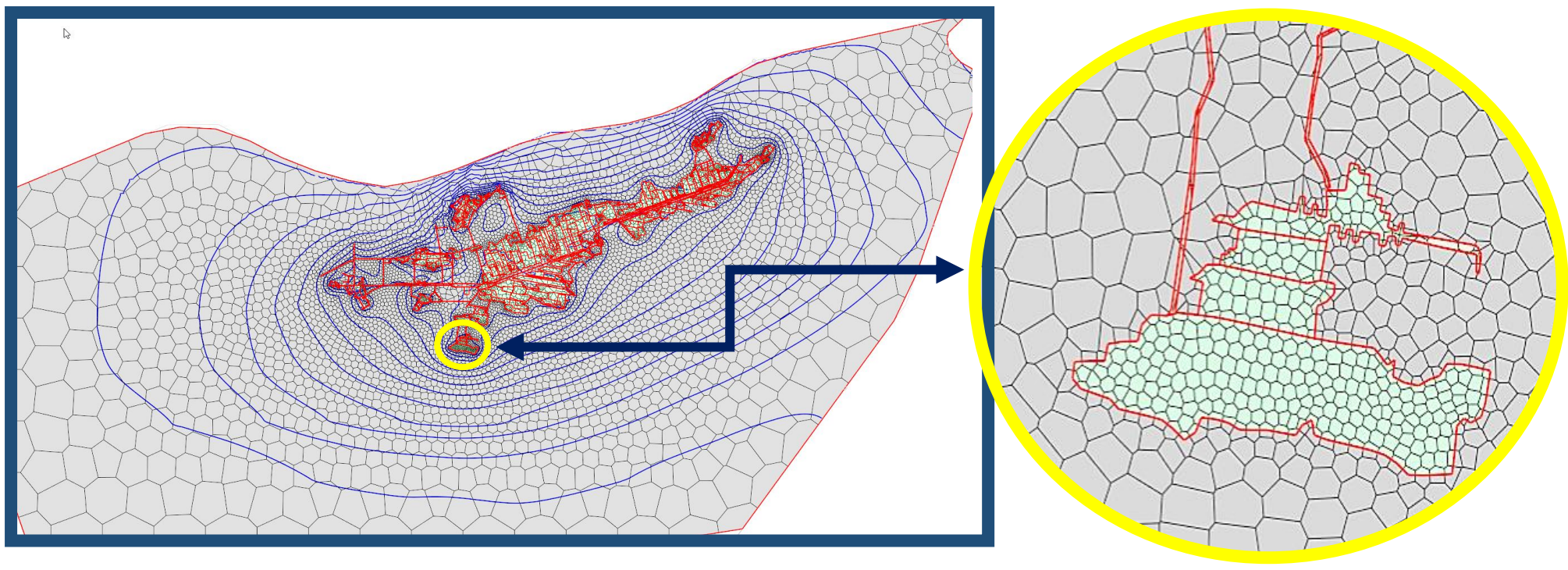
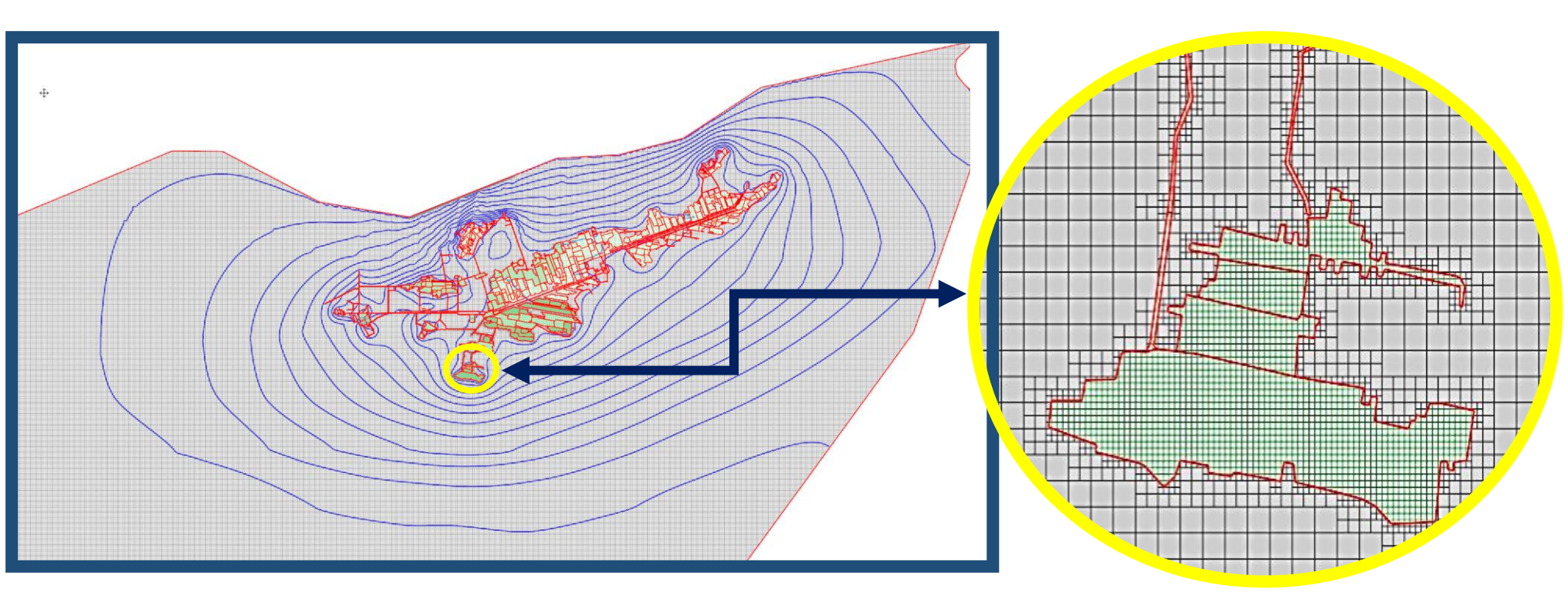
Ю.И. Волков, В.С. Кузькин, И.А. Тимошков

ТЕХНОЛОГИЯ ОСУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД





Белгород 2024

Ю.И. Волков, В.С. Кузькин, И.А. Тимошков

ТЕХНОЛОГИЯ ОСУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Под общей редакцией

кандидата технических наук

Ю.И. Волкова

УДК 622: 626.877: 626.86: 622.23.05
ББК 33: 33.171: 33.13: 354.7
В67

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253-03, утверждённым Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003г. (ОСТ 29.124-94).

Рецензент- профессор, доктор технических наук С.В. Сергеев

Волков Ю.И., Кузькин В.С., Тимошков И.А.

В67 Технология осушения горных пород /под.общ.ред. Ю.И.Волкова.
Табл. 58. Ил. 211. Библиогр. 352.
Издание второе дополненное решением задач миграции в подземной воде.

В монографии на основании обобщения и анализа отечественного (Всероссийский научно-исследовательский института по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу занимается проблемой защиты горных выработок от подземных вод на рудниках с открытой и подземной добычей полезного ископаемого более 60 лет) и зарубежного опыта приведены результаты исследований и практического внедрения по наиболее актуальным направлениям, которые являются основополагающими для создания эффективных и экономически целесообразных систем осушения горных пород. Приведено и обосновано, что в технологии осушения в первую очередь учитываются требования, обеспечивающие её увязку с технологией ведения горных работ, рационального использования водных ресурсов и экологических особенностей региона расположения месторождения полезного ископаемого. В этом контексте рассмотрены структура систем, технология и технические средства осушения; моделирование на основе цифровых технологий, экономико-математическая оценка, вопросы мониторинга и современные перспективы развития технологии осушения.

Авторы рассчитывают, что монография позволит инженерам, специалистам и студентам в области горного дела глубже и целостнее вникнуть в проблему обеспечения промышленной безопасности и охраны окружающей среды при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых в обводнённых условиях.

© Ю.И.Волков, В.С.Кузькин, И.А.Тимошков, 2024
© Типография «Принт Мастер», 2024
© Дизайн книги. Типография «Принт Мастер», 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

Общий объём извлекаемых ресурсов в мире оценивается в сотни миллиардов тонн в год. Из них около ¾ составляет минеральное сырьё, которое является основой развития тяжёлой промышленности и энергетики. В национальном богатстве России известные природные ресурсы по регионам распределяются следующим образом: 11-25 % - полезные ископаемые; 21-40 % - лесные; 5-20 % - водные и 20-42 % - земельные. Технологической системой, которая используется при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых, являются мероприятия по защите горных выработок от отрицательного влияния подземных вод. Постоянные усилия учёных и инженеров государств, поставщиков минерального сырья, сосредоточены на разработке способов осушения горных пород, обеспечивающих эффективную и безопасную добычу обводнённого полезного ископаемого. Одним из традиционных направлений деятельности Всероссийского научно-исследовательского института по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу (ОАО «ВИОГЕМ») является разработка и проектирование систем осушения. Достаточно сказать, что ВИОГЕМом были разработаны и реализованы проекты дренажно-осушительных комплексов на Лебединском, Стойленском и Михайловском карьерах (КМА), ЗЖРК (Украина), Северо-Уральских бокситовых рудниках, на трубке им. Ломоносова, карьерах Соколовско-Сарбайского ГПО (Казахстан), на угольных разрезах «Восточный», «Богатырь», «Бородинский», карьере Ковдорского ГОКа и др. На этих предприятиях запроектированы и сооружены мощные подземные дренажные комплексы, поверхностные системы осушения, созданы и локальные схемы дренажа на особо обводнённых участках ведения горных работ. Системы осушения разработаны для месторождений, на которых горные работы ведутся открытым способом с применением цикличной и поточной технологий, а также для месторождений, отрабатываемых подземным способом с использованием технологий как с обрушением вмещающих пород, так и с сохранением их целостности. Многие дренажные сооружения функционируют не одно десятилетие, обеспечивая безопасное ведение горных работ в сложных гидрогеологических условиях.

Развитие исследований по данному направлению в институте ВИОГЕМ шло комплексно:

- научное обоснование дренажных систем (фильтрационные расчёты, математическое моделирование на основе цифровых технологий);

- моделирование миграционных процессов;

- проектирование систем осушения месторождений;

- выполнение конструкторских работ;

-изготовление технических средств (буровые установки, технологическое оборудование);

-выполнение строительно-монтажных работ со сдачей дренажных систем заказчику «под ключ» по отдельным техническим решениям;

- авторский надзор за реализацией проектной документации.

В монографии приведены результаты работ, выполненных учёными и специалистами института, а также дан анализ зарубежного опыта по созданию систем осушения.

Монография подготовлена:

Ю.И. Волков, к.т.н. - предисловие, введение, главы 1, 2, 3, 4, 10, 11, разделы 5.3, 5.4, заключение.

В.С. Кузькин, к.т.н. - главы 6, 7, 8, 9, 10, разделы 5.1, 5.2, 5.5.

И.А. Тимошков, к.т.н. - главы 6, 7, 8, 9, 10, разделы 5.1, 5.2, 5.5.

В подготовке отдельных разделов и глав участвовали:

А.А. Воронин, к.т.н. - раздел 4.4.

О.О. Вершинина - разделы 11.2.6.2, 11.2.7.

Т.В. Жданова - глава 11, разделы 2.2.1, 2.2.2, 3.4.2, 4.3, 11.2.9.

В.П. Луговой - раздел 3.4.4.

М.В. Ряжских - глава 11.

Авторы выражают благодарность А.Т. Усатюк, И.И. Суржиковой, И.А. Деденёвой, Н.Г. Чекиной за помощь при подготовке рукописи к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие минерально-сырьевой базы России и большинства стран связано с разработкой месторождений полезных ископаемых, которые зачастую залегают в сложных природных условиях.

Горное дело в России является исторически сложившимся фундаментом экономики, основой её устойчивого развития, поэтому горнодобывающая отрасль промышленности всегда относилась к стратегическим и приоритетным направлениям деятельности. Как одна из мировых лидеров поставки минеральных ресурсов, Россия пришла к необходимости освоения глубокозалегающих месторождений твёрдых полезных ископаемых в средине прошлого века.

В большинстве случаев глубокозалегающие месторождения и глубокие горизонты отработки характеризуются весьма сложными геолого-гидрогеологическими условиями, высокой обводнённостью полезного ископаемого, вмещающих и вышележащих пород, слоистым строением водоносных комплексов, крутопадающим залеганием продуктивных пластов. Совершенно очевидно, что безопасная разработка таких месторождений практически не осуществима без проведения водозащитных мероприятий. Необходимо также подчеркнуть, что и на действующих горнодобывающих предприятиях уже сейчас ведутся горно-добычные работы на глубоких горизонтах (железорудные карьеры КМА, подземные рудники на Урале, в Сибири). На ряде предприятий открытые горные работы достигли предельных глубин, и в настоящее время рассматривается переход на подземный способ добычи полезного ископаемого. Наиболее разработанной в России и за рубежом технологией, используемой при защите открытых и подземных выработок от отрицательного влияния подземных вод, является осушение пород и перехват фильтрационного потока до подхода к зоне ведения горных работ. Применение и развитие этой технологии в будущем выглядит также перспективным.

Достигнутые масштабы внедрения и длительные перспективы созданной технологии и технических средств осушения обводнённых месторождений и глубоких горизонтов добычи полезного ископаемого предопределены тем, что указанные разработки базируются на современных достижениях фундаментальной науки в области горного дела и теории фильтрации подземных вод, теории моделирования гидрогеологических процессов, конструирования машин и механизмов, теории управления

разрушением горных пород, а также прикладных наук – геологии месторождений полезных ископаемых, гидрогеологии, геомеханики, машиностроения, бурового дела, конструирования, компьютерных технологий и экологии.

Целью технологии осушения является обеспечение безопасных условий труда при высокопроизводительной работе горного оборудования. Одной из основных задач является применение технологических приёмов, обеспечивающих снижение затрат на осушение в пересчёте на тонну добываемого полезного ископаемого. На сильно обводнённых месторождениях затраты на осушение достигают 10-20 % от общих затрат на добычу руды. По имеющимся данным на карьерах США затраты на осушение изменяются от 5 до 37 долларов на тонну полезного ископаемого.

Обобщение и анализ отечественного (институт ВИОГЕМ занимается проблемой защиты горных выработок от подземных вод на рудниках с открытой и подземной добычей полезного ископаемого более 60 лет) и зарубежного опыта приведены в данной монографии по наиболее актуальным направлениям, которые являются основополагающими для создания эффективных и экономически целесообразных систем осушения горных пород. При выборе технологии осушения в первую очередь учитываются требования, обеспечивающие её увязку с технологией ведения горных работ, рационального использования водных ресурсов и экологических особенностей региона расположения месторождения полезного ископаемого. В этом контексте читателю предлагается материал, который можно сформулировать по следующим направлениям:

- Структура системы осушения, методы и приёмы технологии осушения.
- Технические средства осушения.
- Математическое моделирование систем осушения на основе современных достижений цифровых технологий. Решение геофильтрациоонных и миграционных задач.
- Экономико-математическая оценка разработанной системы осушения.
- Мониторинг водных ресурсов на горном предприятии.
- Современные перспективы развития технологии осушения.

Авторы рассчитывают, что монография позволит инженерам, специалистам и студентам в области горного дела глубже и целостнее вникнуть в проблему обеспечения промышленной безопасности и охраны окружающей среды при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых в обводнённых условиях.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие…… 3

Введение…….. 5

Глава 1. Состояние исследований по оценке влияния обводнённости на основные технологические процессы горного производства……..... 7

Глава 2. Вероятностно-статистические методы при оптимизации систем мониторинга на горных предприятиях……..... 17

2.1. Общие положения вероятностно-статистического анализа. 19

2.2. Энтропия как характеристика фиксируемых при мониторинге показателей…… 21

2.2.1. Критерий достаточности имеющегося объёма информации……. 23

2.2.2. Оптимизация количества наблюдательных скважин……. 34

Глава 3. Способы и технологические приёмы осушения горных пород при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых…… 37

3.1. Основные положения формирования систем осушения…… 39

3.2. Классификация месторождений твёрдых полезных ископаемых применительно к технологии осушения……. 45

3.3. Технико–экономическая оценка развития технологии осушения месторождений…… 61

3.4. Инновационные технологии и проектирование систем осушения при освоении месторождений полезных ископаемых…… 67

3.4.1. Система осушения из горизонтальных скважин…… 73

3.4.2. Технология осушения глубоких карьеров…… 86

3.4.3. Технология осушения глубоких горизонтов в карьерах……..... 99

3.4.4. Технология осушения сжатым воздухом……. 120

3.4.5. Технология осушения – водоснабжения……. 133

3.4.6. Технологические приёмы в увязке с гидродинамикой потока……. 142

3.4.7. Технологические приёмы повышения водозахватной способности дренажных скважин…… 149

3.4.8. Варианты осушения рыхлых неконсолидированных грунтов……..... 154

Стр.

Глава 4. Классические системы осушения при разных способах отработки месторождений твёрдых полезных ископаемых…… 159

4.1. Система осушения при подземном способе разработки месторождения…….. 161

4.2. Системы осушения при открытой разработке месторождений…… 171

4.3. Система осушения глубокого карьера……... 190

4.4. Защита от подземных вод при добыче угля открытым способом……..... 199

4.5. Защита горных выработок от обводнения при добыче угля подземным способом……..... 206

4.6. Опыт защиты горных выработок от обводнения за рубежом... 218

4.6.1. Состояние и перспективы развития технологии осушения шахтных полей за рубежом…… 218

4.6.2. Состояние и перспективы осушения угольных разрезов за рубежом…… 224

4.6.3. Системы осушения месторождений руд чёрных и цветных металлов…….. 230

4.6.4. Технологические приёмы осушения слабопроницаемых рыхлых пород…… 237

Глава 5. Технические средства и технологии сооружения скважин для осушения пород……... 247

5.1. Особенности технологии вскрытия водоносных горизонтов вертикальными скважинами…… 250

5.2. Освоение скважин…… 261

5.3. Оценка влияния конструкции водоприёмной части на эксплуатацию скважин на воду……... 265

5.4. Оптимальные параметры фильтров и водоприёмной части скважин на воду…… 280

5.4.1. Требования к фильтрам дренажных устройств……. 280

5.4.2. Факторы, учитываемые при выборе фильтров скважин…… 283

5.4.3. Параметры фильтров скважин, оценка их гидравлических свойств…… 288

5.4.4. Материалы, применяемые для изготовления фильтров……. 289

Стр.

5.4.5. Практика применения различных конструкций фильтров в скважинах при осушении месторождений…… 290
5.4.6. Подбор оптимальных параметров фильтров дренажных скважин и определение межремонтного периода…… 292
5.4.7. Параметры кольматации фильтров скважин..... 301
5.4.8. Сравнительная характеристика параметров кольматажа различных конструкций водоприёмной части скважин…… 302
5.5. Технические средства для сооружения вертикальных скважин на воду……. 305
Глава 6. Технология вскрытия водоносных горизонтов горизонтальными скважинами и техника для сооружения…… 331

6.1. Определение влияния гидростатического давления столба жидкости водоносного горизонта на процессы выноса песка при бурении под защитой обсадной колонны…… 336
6.2. Определение осевых усилий при бурении в неустойчивых обводненных грунтах вращательным способом под защитой обсадной колонны……. 344
6.3. Обоснование частоты вращения шнековой колонны при вскрытии водоносных горизонтов под защитой обсадной колонны…….. 348
6.4. Особенности вскрытия водоносных горизонтов, представленных лессами и лессовидными суглинками……. 364
6.5. Пути снижения сил трения на буровом снаряде при вскрытии водоносных горизонтов под защитой обсадной колонны……... 376
6.6. Особенности вскрытия обводнённых кавернозных, трещиноватых пород горизонтальными скважинами……. 381
6.7. Пути совершенствования техники и технологии вскрытия песчаных водоносных горизонтов…… 394
6.8. Особенности технологии оборудования водоприёмных частей ГДС фильтрами…….. 403
6.9. Фильтры горизонтальных скважин……. 409
Глава 7. Технические средства для сооружения шахтных стволов лучевых дренажей…… 419

Стр.

Глава 8. Технология и организация работ по сооружению шахтного ствола методом опускного колодца с подводным способом разработки грунта…… 425

Глава 9. Технические средства для осушения месторождений твёрдых полезных ископаемых восстающими дренажными скважинами…… 445

Глава 10. Бурение восстающих дренажных скважин и вскрытие водоносных горизонтов…… 453

Глава 11. Цифровые технологии и моделирование систем защиты от обводнения объектов при добыче твёрдых полезных ископаемых…….. 473

11.1. Цифровые технологии…… 475

11.2. Классические этюды разработанных моделей…… 499

11.2.1. Модель рудного узла (подземная отработка) …….. 502

11.2.2. Модель при ведении открытых горных работ……. 508

11.2.3. Модель на побережье океана……. 520

11.2.4. Модель хвостохранилища……. 524

11.2.5. Региональная постоянно действующая модель…… 529

11.2.6. Модель промплощадки…… 532

11.2.6.1. Модель промплощадки в простых природных условиях……..... 535

11.2.6.2. Модель промплощадки в сложных природных условиях……..... 539

11.2.7. Модель отвального массива…… 541

11.2.8. Пространственная модель горно-рудного региона…… 545

11.2.9 Супер модель прогноза миграции более чем 20 компонентов в подземных водах на объектах горнорудного предприятия …… 552

Заключение…… 577

Библиографический список…… 581

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравчук С.В., Осипенко Ю.С., Волков Ю.И.* Состояние исследований по оценке влияния обводнённости на основные технологические процессы горного производства. В сб. «Влияние обводнённости на основные технологические процессы в горном деле и строительстве» - Белгород: ВИОГЕМ, 1984, с.3-7.

2. *Осипенко Ю.С., Волков Ю.И.* Технология защиты горнодобывающих предприятий от обводнения и перспективы совершенствования. В сб. «Вопросы освоения месторождений в сложных гидрогеологических условиях» - Белгород: ВИОГЕМ, 1984, с.19-24.

3. *Волков Ю.И., Осипенко Ю.С., Кравчук С.В., Старцев Г.Г.* Инструкция по гидрогеологическому и инженерно-геологическому обеспечению предприятий по добыче полезных ископаемых Министерства цветной металлургии СССР. - Белгород, ВИОГЕМ, 1986.

4. *Дементьев Л.Ф., Жданов М.А., Кирсанов А.Н.* Применение математической статистики в нефте-газопромысловой геологии. М.: «Недра», 1977, 255с.

5. *Дементьев Л.Ф., Хитров Е.А., Шурубор Ю.В.* Применение информационных мер в нефтепромысловой геологии. Пермское книжное издательство, 1974, 155 с.

6. *Дементьев Л.Ф.* Математические методы и ЭВМ в нефте-газовой геологии. - М.: «Недра», 1983.

7. *Кноринг Л.Д.* Основы теории оптимизации разведки нефтяных месторождений. - Л.: «Недра», 304 с.

8. *Волков Ю.И.* Современные методы оценки гидрогеологических условий и обоснования систем осушения карьеров. - М.: ИД «Руда и Металлы», Горный Журнал № 11, 2009, с. 25-28.

9. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Пономаренко Ю.В.* Противофильтрационные завесы в промышленности. - М.: ИД «Руда и Металлы» , 2014, 304 с.

10. *Пересунько Д.И., Прохоров С.П., Кашковский П.Н. и др*. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твёрдых полезных ископаемых. - М.: Недра, 1969.

11. *Оксанич И.Ф., Береснев В.С., Гордон А.Б. и др.* Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий. - М.: Недра, 1977.

12. *Скабалланович И. А., Седенко М. В.* Гидрогеология, инженерная геология и осушение месторождений. -М.: Недра, 1973.

13. *Ясько В. Г.* Гидрогеология месторождений полезных ископаемых Сибири. - М.: Недра, 1978.

14. *Волков Ю.И., Осипенко Ю.С., Рогинец И.И.* Классификация месторождений полезных ископаемых по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям. //Журнал Советская геология, 1987, № 4, с.111-119.

15. *Трапезников В.А.* Темпы научно-технического прогресса — показатель эффективности управления экономикой // Автоматика и телемеханика, 1971, № 4, с. 5—36.

16. *Чернегов Ю.А., Царегородцев Ю.Н., Иванов Г.А.* Измерение темпов научно-технического прогресса и условий разработки в горной промышленности // Горный журнал, 1984, № 1, с.10—13.

17. *Антоненко Г.К., Волков Ю.И.* Оценка развития технологии осушения месторождений. // Горный журнал, 1988, № 3, с.14-17.

18. *Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В.* Состояние и перспективы осушения угольных разрезов за рубежом // Уголь, 1987, № 2, с. 56-58.

19. *Волков Ю.И.* Технологическое обоснование эксплуатации дренажных систем. Материалы 6 международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, ВИОГЕМ, 2001, с.27-33.

20. *Meka A.I., Volkov Y.I., Kuskin W. S.* Complex measures for mining excavation protection against waterflooding as part of ground water rational use programe. International Congress on Geoengineering Torino, 27-30 Settembre, 1989, Vo I, c.303-309

21. *Волков Ю.И. Изотов А.А. Пономаренко Ю.В.* ФГУП ВИОГЕМ и научно-технический прогресс в технологии защиты горных выработок от обводнения. - Горный журнал № 10, 2004, с.10-14.

22. *Акбаев Т.А., Зайц В.А., Нурсултанов Н.Д., Волков Ю.И., Изотов А.А.* Применение энергосберегающих технологий при разработке системы осушения разреза «Восточный». // Горный журнал, № 2, 2004, с.87-88.

23. *Акбаев Т.А., Зайц В.А., Нурсултанов Н.Д., Волков Ю.И., Изотов А.А., Михайлов Ю.А.* Результаты внедрения системы осушения с помощью горизонтальных дренажных скважин на разрезе «Восточный» Экибастузского угольного бассейна. // Горный журнал, № 9, 2006, с.12-13.

24. *Волков Ю.И., Воронин А.А., Изотов А.А. и др.* Перспективы осушения Бородинского углеразреза горизонтальными дренажными скважинами. Материалы 9 международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, 2007, с.2.8-36.

25. *Беляков С.И. Волков Ю.И., Гончаров П.Е., Изотов А.А. и др.* Опыт сооружения горизонтальных дренажных скважин с применением новой технологии на примере Лебединского карьера. Материалы 9 международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, 2007, с.85-88.

26. *Волков Ю.И., Беляков С.И., Пономаренко Ю.В., Изотов А.А., Калягин И.А.* Способ сооружения горизонтальной дренажной скважины в неустойчивых подвижных горных породах и буровой снаряд для его осуществления. Патент РФ № 2435925, 2011.

27. *Кузькин В.С., Беляков С.И., Гончаров П.Е., Тимошков И.А., Волков Ю.И., Серый С.С., Изотов А.А.* Способ сооружения горизонтальной или наклонной скважины в трещиноватых породах, разрабатываемых с помощью буровзрывных работ и буровая установка для его реализации. Патент РФ № 2285779, 2005.

28. *Волков Ю.И., Беляков С.И., Изотов А.А., Калягин И.А*. Способ стабилизации направления бурения, устройство стабилизации направления бурения и буровой агрегат. Патент РФ № 2365727, 2009.

29. *Кузькин В.С., Гончаров П.Е., Беляков С.И. и др.* Способ сооружения горизонтальной или наклонной дренажной скважины в обводнённых песчаных горизонтах, установка для его реализации, фильтровая труба (варианты). Патент РФ № 2233373, 2004.

30. *Волков Ю.И.* Локальные схемы осушения добычных горизонтов глубоких карьеров. Материалы 3-го международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, ВИОГЕМ, 1995, с.99-103.

31. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Шабер Г.Б., Бусыгин М.И., Титов В.И.* Осушение глубокого карьера в условиях слабопроницаемых и неустойчивых пород (на примере месторождения алмазов им.Ломоносова в Архангельской области) Материалы 8 международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, 2005, ч.I, с.23-26.

32. *Епифанова М.В., Фёдоров С.А., Козырев А.А., Рыбин В.В., Волков Ю.И.* Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа. // Горный журнал № 9, 2007, с.30-33.

33. *Волков Ю.И.* Современные методы оценки гидрогеологических условий и обоснование систем осушения карьеров. // Горный журнал № 11, 2009 с. 15-17.

34. *Волков Ю.И., Изотов А.А.* Технологии и проектирование систем осушения разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. // Горный журнал № 7, 2010, с. 10-13.

35. *Волков Ю.И.* ВИОГЕМ и инновационные технологии горнодобывающих предприятий. // «Чёрная металлургия» Бюл.научно-технич. и эконом. информации, вып.12, 2010, с.69-71.

36. *Волков Ю.И., Жданова Т.В.* Математическое моделирование технических решений по оптимизации гидрогеологических условий при строительстве глубоких карьеров. Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. ГОИКНЦ РАН. - Апатиты, 2012, с. 149-160.

37. *Волков Ю.И., Жданова Т.В.* Особенности обводнения месторождения апатит – штаффелитовых руд ОАО «Ковдорский ГОК» и обоснование способа защиты проектируемого карьера от подземных вод. Всероссийская научно-техническая конференция «Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ» - Апатиты: ГОИ КНЦ РАН. 2013, с. 205-214.

38. *Волков Ю.И., Воронин А.А., Изотов А.А., Вершинина О.О., Костеренко В.Н.* Инновационный способ осушения горных выработок с применением техники и технологии горизонтального направленного бурения. // Бюллетень научно-технической экономической информации «Чёрная металлургия, №9, 2015, с.9-12.

39. *Волков Ю.И., Жданова Т.В.* Применение геофильтрационного моделирования при отработке карьеров Кременчугской магнитной аномалии. // Горный информационно-аналитический бюллетень, Глубокие карьеры, вып.56, - М.: изд. «Горная книга», 2015, с.356-368.

40. *Волков Ю.И., Воронин А.А., Жданова Т.В., Вершинина О.О.* Обоснование и разработка современных способов защиты горных выработок от подземных вод. // Горный журнал № 10, 2019, с. 18-21.

41. *Волков Ю.И., Жданова Т.В.* Применение методов численного моделирования фильтрации подземных вод на горных предприятиях. Горный

информационно-аналитический бюллетень, Цифровые технологии в горном деле, спец. вып. №37 - М.: изд. «Горная книга», 2019, с. 355-366.

42. *Мельников Н.Н., Козырев А.А., Лукичёв С.В.* Новая концепция разработки месторождений глубокими карьерами. // Горный журнал, 2009, № 11.

43. *Трубецкой К.Н.* Развитие науки, техники и технологии в области комплексного освоения месторождений при открытом способе разработки. // Горный журнал, 2009, № 11.

44. *Волков Ю.И., Забусов Н.И.* Технология осушения водоносных пластов глубоких карьеров // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Том 1. Вопросы осушения и экологии. Материалы международного симпозиума. - Белгород, 1991, с. 165—173.

45. *Грачёв Ф.Г., Савин В.Ф., Павлов В.П.* Технология и организация разработки подводного месторождения. // Горный журнал, 1980, №1, с. 36-38.

46. *Оксанич И Ф., Миронов П.С.* Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирование гранулометрического состава. - М, 1982, 166 с.

47. *Друкованный М.Ф.* Методы управления взрывом в карьерах. - М.: Недра, 1973, 415 с.

48. *Волков Ю.И., Забусов Н.И.* Способ осушения. Авторское свидетельство № 1832841, 1992.

49. *Волков Ю.И., Забусов Н.И.* Влияние технологических взрывов на обводнённость глубоких горизонтов карьеров. Материалы 2-го международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземные строительство в сложных гидрогеологических условиях». – Белгород: ВИОГЕМ, 1993, с.119-124.

50. Справочник по осушению горных пород. - М.: Недра, 1984, 575 с.

51. *Воронцов В.И., Шабер Г.Б.* Интенсификация работы дренажных устройств при осушении месторождений полезных ископаемых- М.: Недра, 1975, 204 с.

52. *Луговой В.П. и др.* Осушение участков очистных работ на Больше-Токмакском марганцевом месторождении // Горный журнал, 1990, № 2, с. 22-25.

53. *Луговой В.П.* Гидрогеологические расчёты сооружаемых дренажных устройств при интенсификации процесса осушения сжатым

воздухом // Сооружение дренажных устройств и противофильтрационных завес. Белгород: изд. ВИОГЕМ, 1987, с. 90-96.

54. *Пономаренко Ю. В., Луговой В. П., Волков Ю. И., Юдин А.Г.* Способ осушения водоносного пласта. // Авторское свидетельство №1276759, 1986.

55. *Волков Ю.И., Юдин А.Г., Луговой В.П.* Способ осушения водоносного пласта. // Авторское свидетельство №1276760, 1986.

56. *Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В., Юдин А.Г.* Способ предотвращения притоков подземных вод в горную выработку при её проходке. // Авторское свидетельство №1255687, 1986.

57. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Пономаренко Ю.В.* ФГУП ВИОГЕМ и научно-технический прогресс в технологии защиты горных выработок от обводнения. // Горный журнал, 2004, № 10, с.10-14.

58. *Volkov Y.I., Lugovoi V.P., Rivlin V. M.* Drainage Systems for Stratified Depositsin Non-dislocated Rock Complexes. 4th International Mine Water Stssociation Congress. Ljubljana (Slovenia), POR TSCHACH (Austria) September 2-30, 1991 Proceedingis, Volume 2, c.189-192.

59. *Волков Ю.И., Луговой В.П., Ривлин В.М.* Использование сжатого воздуха в технологии осушения обводненных горных пород. Материалы 4-ого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» Белгород, 1997.

60. *Арцев А.И, Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н. и др*. Проектирование водозаборов подземных вод. - М: Стройиздат, 1976.

61. *Волков Ю. И., Гладченко Е. С.* Исследование вопросов совершенствования технологии и схем осушения при открытой разработке железорудных месторождений. В кн.: Гидрогеологические расчеты и технические средства осушения месторождений полезных ископаемых. Белгород, 1985, с. 41—48.

62. *Гензель Г.Н.* Методические основы оптимизации систем водоснабжения на базе дренажных вод в горнорудных районах. В кн.: Методы и практика математического моделирования при разработке месторождений в сложных геолого-гидрогеологических условиях: Тез. докл.— Белгород, 1982, с. 13—20.

63. *Волков Ю.И., Гензель Г.Н., Карачевцев Н.Ф., Кравчук С.В.* Способ осушения горных выработок. Патент РФ № 1447983, 1993.

64. *Мироненко В.А., Румынии В.Г., Учаев В.К.* Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1980.

65. *Васильев В. В., Волков Ю. И.* Моделирование на ЭВМ задач фильтрации в трехслойной среде применительно к проблемам разработки железорудных месторождений КМА: Тез. докл. Новочеркасск, 1983, с. 65—66.

66. *Волков Ю.И., Орёл В.М.* Рациональное использование дренажных вод при разработке Приоскольского железорудного месторождения. // Разведка и охрана недр, 1986, № 2, с.30-35.

67. *Волков Ю.И., Гензель Г.Н., Зубова А.В., Ростовцев В.И., Гейс А.К.* Способ осушения водосодержащих пород. А.с. № 1497356, МКИ Е02Д19/10, 30.07.89 г., бюл .№ 28.

68. *Волков Ю.И., Кичигин Е.В.* Способ осушения горных выработок. Патент СССР № 1799418, 1992.

69. *Беспалов П.М., Волков Ю.И., Дыхлин В.В. и др.* Способ сооружения водозаборной скважины А. с. № 1317065, МКИ Е02Д19/10,1987, бюл. № 22.

70. *Чуйко В.М., Волков Ю.И., Квачёв В.Н.* Способ осушения водоносного пласта. А.с.№ 1368388, МКИ Е02Д19/10, 1988, бюл. № 3.

71. *Andersen R. D., Kleiman D.B.* Special Dewatering Metods for soll Stabilization. Proceedings B of the International Mine Water Association. April, 1982, Hungary, pp. 335-353.

72. *Пономаренко Ю.И., Волков Ю.И., Забусов Н.И.* Дренажное устройство, А.с. № 1520186, МКИ Е02Д3/10, 1989, бюл. № 41.

73. Изучение отечественного и зарубежного опыта осушения руд чёрных и цветных металлов, угля: отчёт по НИР, ВИОГЕМ, рук. Ю.И. Волков, № Г.Р.01840007501 - Белгород, 1986, 117 с.

74. *Казикаев Д.М., Осипенко Ю.С.* Разработка рудных месторождений под водными объектами. - М., Недра, 1989, 193 с.

75. Обоснование системы защиты глубоких горизонтов месторождений Северо-Уральского бокситового бассейна от обводнения: отчёт, рук. И.И. Плотников, № Г.Р. 40-81-24/16. - Североуральск, 1981, 120 с.

76. Комплексная схема мероприятий по защите шахт СУБРа от обводнения подземными, речными и поверхностными водами. Проект, ВИОГЕМ, рук. Л.В. Крупкин, Арх. № 15243. - Белгород, 1983.

77. Проектные решения по осушению Североуральских бокситовых месторождений, борьбе с водопритоками прорывами воды в горные выработки рудника. Доклад, рук. Л.В. Крупкин, Арх. № 11014. - Белгород, 1978.

78. *Шувалов В.П., Дмитриев Н.В., Колесов В.А.* Состояние и проблемы капитального строительства шахт СУБРа. // Горный журнал, 1984, № 2, с. 10-12.

79. *Волков Ю.И., Воронин А.А.* Инновационные технологии водоотлива на угольных шахтах и подземных рудниках. // Маркшейдерский вестник, 2015, №2, с.5-6.

80. *Писанец Е.П., Мироненко В.А.* Водопонижение на карьерах КМА. - М.: Недра, 1968, 135 с.

81. *Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К.* Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1980, 320 с.

82. *Мироненко В.А., Норватов Ю.А., Сердюков Л.И. и др.* Гидрогеологические исследования в горном деле. - М.: Недра, 1976, 352 с.

83. *Лосицкий В.В., Булгаков И.С., Дергилёв М.А.* Разработка и осушение обводнённых пород на карьерах КМА. - М.: Наука, 1968, 134 с.

84. *Гензель Г.Н., Кравчук С.В.* Комплексное решение вопросов осушения месторождений и водоснабжения в горнодобывающих районах. // Горный журнал, 1985, №10, с.28-30.

85. *Писанец Е.П., Норватов Ю.А.* Анализ эффективности осушения Лебединского, Южно-Лебединского и Стойленского карьеров КМА. // Горный журнал, 1972, №7, с. 33-35.

86. Обобщение опыта сооружения дренажных устройств и осушения карьеров и шахт горнорудной промышленности чёрной металлургии (Стойленский карьер). Отчёт, ВИОГЕМ, рук. Петриченко В.П. - Белгород, 1969, 301с.

87. *Кутузов Б.Н., Михеев И.Г., Суздальцев В.Г. и др.* Бурение обводнённых пород шарошечными долотами. // Горный журнал, 1970, № 6, с.41-43.

88. *Бурыкин С.И., Калашников А.Г.* Пути повышения эффективности буровзрывных работ на Соколовском карьере. // Горный журнал, 1977, №9, с.54-56.

89. *Арсентьев А.И., Михайлов Р.А.* Определение доли водоустойчивых ВВ при работе в водонасыщенных породах. // Известия вузов, Горный журнал,

1985, № 6, с. 87-88.

90. *Бетин Д.И., Голубева Л.Н.* Влияние гирогеологических условий месторождений Кривбасса на способы ведения взрывных работ. Сбор. Трудов Влияние обводнённости на основные технологические процессы в горном деле и строительстве. - Белгород, ВИОГЕМ, с. 24-25.

91. *Репин Н.Я., Волобуев В.К., Белов В.И. и др.* Исследование влияния обводнённости на дробление трещиноватых пород. // Известия вузов, Горный журнал, 1979, № 7, с. 66-70.

92. *Козлов С.С.* Пути повышения эффективности взрывного дробления блочных пород. // Вестник Киевского политех. ин-та. Горн. электрон. и автомат, 1984, №15, с.27-29.

93. Исследование влияния осушения железорудных месторождений, действующих и проектируемых водозаборов на режим подземных вод и условия водоснабжения Новооскольского железорудного района. Отчёт, ВИОГЕМ, рук. раб. М.И. Забейда - Белгород, 1972, 305 с.

94. *Meka A.,I., Ponomarenko Y.,V., Volkov Y.I., Viserspun P.,Geil D*. GroundWater control in open pit Mines in the Kursk Region of the Soviet Union. Canadion Mining and Metallurgical Bulletin. Volume 85, Number 959 Pages 58 to 62 April, 1992.

95. Технический отчёт по инженерно-геологическим изысканиям по объекту: Ковдорское месторождение магнетитовых и апатитовых руд, карьер «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (восточный борт карьера в границах сектора инженерно-геологических профилей 3рд, 1пр, 16ИГ, 14ИГ, 2рд, IаИГ" (сектора III, IV), юго-восточный участок в границах профилей III, III), в 4 книгах, 1 папке. АО «Мурманская ГРЭ». – Апатиты, 2017.

96. Отчёт по выполнению работ: «Расширение наблюдательной сети для уточнения механизма изменчивости водонасыщенности грунтов дамбы № 1 и ведения режимных наблюдений за уровнем подземных вод». АО «Мурманская ГРЭ». – Апатиты, 2016.

97. Отчёт по выполнению работ: «Расширение наблюдательной сети северного ряда в створе шахта – карьер». АО «Мурманская ГРЭ». – Апатиты, 2016.

98. «Оценка влияния гидрогеологических факторов для достоверности прогноза рисков обрушений уступов бортов, Этап 1 (2017 год): тепловизионное обследование бортов карьера. Инженерно-гидрогеологическое маршрутное обследование бортов карьера». Отчет ОАО «ВИОГЕМ», рук. Забусов Н.И. – Белгород, 2017.

99. *Волков Ю.И., Воронин А.А., Изотов А.А., Ряжских М.В., Шабер Г.Б., Лалетин Н.И., Радченко А.Т., Попова Т.В.* Перспективы осушения Бородинского углеразреза горизонтальными дренажными скважинами Материалы 9 международного Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, 2007, с.28-36.

100. *Волков Ю.И., Вершинина О.О.* Компьютерные технологии моделирования систем осушения карьеров Доклад на всероссийской научной конференции «Информационные технологии в горном деле». - Екатеринбург, 2012, с.41-45.

101. *Воронин А.А., Волков Ю.И., Жданова Т.В., Вершинина О.О.* Обоснование и разработка современных способов защиты горных выработок от подземных вод. // Горный журнал № 10, 2019, с. 18-21.

102. *Моисеев С.И., Вознесенский М.П.* Исследование от закономерностей возникновения прорывов на шахтах Подмосковного бассейна. - В сб.: Повышение эффективности разработки и осушения угольных месторождений. - ПНИУИ, Тула, 1977, с.11-16.

103. *Моисеев С.И.* Опыт применения блочной схемы осушения на шахте «Покровская». – В сб.: Повышение эффективности разработки и осушения угольных месторождений. - ПНИУИ, Тула, 1977, с.16-22.

104. *Пармузин С.В.* Требования к исходным материалам для проектирования осушения шахт и нормы осушения применительно к условиям Подмосковного угольного бассейна. - В сб.: Труды научно-технической конференции по осушению обводнённых угольных месторождений. - М.: Госгортехиздат, 1959, с.41-57.

105. *Лабазкин П.Г.* Временное методическое руководство по определению необходимой степени осушения водоносных горизонтов на шахтах Подмосковного угольного бассейна. - Новомосковск, 1979, 21 с.

106. *Подъёмщиков Н.В.* Результаты исследований вращательно-всасывающего способа бурения водопонижающих скважин экспериментальным буровым агрегатом БА-1 в Подмосковном бассейне. - В сб.: Осушение шахтных и карьерных полей и шахтная геофизика. - М.: Недра, 1973, с.57-86.

107. *Момчилов В.С., Сапунов В.В., Доровеева Л.Г., Колесников И.П.* Совершенствование схем осушения на шахтах комплексной механизации Подмосковного бассейна. - В сб.: Осушение шахт и карьерных полей и шахтная геофизика. - М.: Недра, 1973, с.13-19.

108. *Крашкин И.С.* Исследование способов отработки шахтных полей со сложной гидро- и горно-геологической характеристикой. - В сб.: Технология и техника очистных и осушительных работ на перспективных месторождениях Подмосковного бассейна, вып.20. - ПНИУИ, Тула, 1978, с.9-19.

109. *Щеткин Н.А.* Совершенствование поглощающего дренажа на шахтах Подмосковного бассейна. - В сб.: Повышение эффективности разработки и осушения угольных месторождений. - ПНИУИ, Тула, 1977, с.22-29.

110. *Скиргелло О.Б.* Основные направления в проектировании осушения шахт Подмосковного угольного бассейна и содержание проектной документации. - В сб.: Тр. Научно0технической конференции по осушению обводненных угольных месторождений. - М.: Госгеолтехиздат, 1959, с.24-57.

111. *Мигунов Б.И., Момчилов В.С., Харчев В.Н.* Условия, определяющие выбор варианта опережающего блочного осушения в Подмосковном бассейне. - В сб.: Повышение эффективности разработки и осушения угольных месторождений. - ПНИУИ, Тула, 1977, с.19-22.

112. *Момчилов В.С.* Опережающее осушение шахтного поля. - М.: Недра, Уголь, 1981, №1, с.24-26.

113. *Момчилов В.С., Лабазкин П.Г., Харчев В.Н.* Осушение надугольных песков с помощью опережающего штрека. - М.: Недра, Уголь, 1977, №3, с.63-64.

114. *Момчилов В.С., Лабазкин П.Г., Харчев В.Н.* Определение рациональных пределов осушения лав с механизированными комплексами. - В сб.: Технология и техника очистных и осушительных работ на перспективных месторождениях Подмосковного бассейна. - ПНИУИ, Тула, 1978, с.54-59.

115. *Романов П.Д.* Исследование влияния горно-геологических факторов на нагрузку лав, оборудованных механизированными комплексами. - В сб.: Комплексная механизация и автоматизация очистных работ на шахтах Подмосковного бассейна. - ПНИУИ, Тула, 1976, с.24-29.

116. *Момчилов В.С., Девяткин Н.М., Сапулов В.В., Колесников И.Л.* Опыт применения наклонных дренажных скважин для осушения надугольных песков на шахтах Подмосковного бассейна. - В сб.: Осушение шахтных и карьерных полей и шахтная геофизика. - ПНИУИ, М.: Недра, 1973, с.53-57.

117. *S. Libicki.* The Design of Mine Dewartering Systems in Poland // Proceedings of the 1-st International Mine Drainage Symposium. - Denver, Colorado. - 1979, May. - P. 304— 323.

118. *Piske Günter.* Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Tagebauentwässerung // Neue Bergbautech-nik. – 1976, № 4, S. 254-258.

119. *K. Cartwright, C. S. Hunt.* Hydrogeological Aspects of Coal Mining in Illinois // An Overview. Environ. Geol. Notes, State Geol. Survey. 1981, № 90, P. 5-7.

120. *R. Fernandez-Rubio.* Water Drainage of Coal and Lignite Mines // Proceedings of the 1-st International Mine Drainage Symposium. - Denver, Colorado. 1979, May.

121. *B. Balogh.* The Ceological Methods and Results of the Preliminary Dewatering of the Water-beering layers in Environment of Coal Seams in Boreod Brown Coal Basin // Proceedings of the 1-st International Mine Water Congress. - Hungary. - 1982, April. - P. 373-391.

122. *A. Schmieder.* The Effect and Utilization of Protection layers in Mine Water Control // Proceedings ABCD of the I-st International Mine Water Congress. - Hungary. 1982, April, P. 175-200.

123. *F. Pera.* Special Control Methods of Underground Water and Sediment in the Coal Mining Company // Proceedings B of 1-st International Mine Water Congres. - Hungary. 1982, April, P. 170-175.

124. *A.Solimos.* The Relationship and Comparative Analysic of Mine Water Prevention Systems and Prodaction // Proceedigs B of the 1-st International Mine Congress. - Hungary. 1982, April, P. 160-167.

125. *Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В.* Состояние и перспективы развития технологии осушения шахтных полей за рубежом. - Уголь, 1986, № 6, с.50-52.

126. Proceedings B of the 1st International Mine Water Congress. – Hungary, 1982, April, P. 531 – 550.

127. Neue Bergbautechnik. – 1976, № 4, S. 254 – 258.

128. Neue Bergbautechnik. – 1981, № 9, S. 524 - 525.

129. Industrie minerale mine. – 1978, Nowember.

130. Proceedings B of the 1 st international Mine Water Congress. – Hungary, 1982, April, P. 531 – 550.

131. Proceedings C of the 1 st Internstional mine Water Congress. – Hungary, 1982, April, P. 115 - 128.

132. *Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В.* Состояние и перспективы осушения угольных разрезов за рубежом. - Уголь, 1987, № 2, с.56-59.

133. *Böcкег T., Vizy B.* Protection Acainst underground waters of bauxite Mining at Nyirad, Hungary and its impact on Environment // Proceedings C of the I International Mine Water Congress, Budapest, April, 1982. - pp. 5-26.

134. *Unvkom H. C.* World Dewatering of Ambrosia Lake Mines // Mining Engineering, September, 1982.

135. *Whyte W. J., Lyall R. A.* Controll of groundwater at Bancroft Mines Ltd, Zambia.

136. *Cabor S., Csaba B.* Hydrogeology and Mine Water Prevention at the Recsk deep seated Porphyry Copper Occurence // Proceedings of the I International Mine Water Congress. Budapest, April, 1982, pp. 144-153.

137. Water inflow can be cut// South African Mining and Engine ering Journal, 1974, V. 88, N 4098, pp. 75—79.

138. *Mwaba W., Sandy M.* PumpingThrough Rock // Proce edings ABCD of the I International Mine Water Congress, Budapest, April, 1982, pp. 59-68.

139. *Unland W., Roll N.* Dewatering of planned Key Lake open pits in Northern Saskachewan//CIM Bulletin, June, 1980, N 818, pp. 91-99.

140. *H'ege K.* Tagebauentwasserung in Nordsaskatchewan, Kanada / Braunkohle, N 11, 1980, S. 401-407.

141. Chamlishi Mine, Zambia//Mining Magazine, April, 1981, pp. 293-301.

142. *Hegedus-Koncg M.* Methods and Results of Hydrogeological Research Related to Bauxite Mining//Proceedings A of the I Inter national Mine Water Congress, Budapest, April, 1982, pp. 84-87.

143. *R.Blank.* Assechment des exploitations en deconverte en roches meubles on mogen des puits profonds de gronde diometre et de pompe immerges.//Industrie minerale-mine. - November, 1978.

144. *P.J.Norton.* Advonce dewatering and control of ground water in Surface cool mining. Proceedings B of the 1 st International Mine Water Congress. –April, 1982, -Hungary, pp. 517-530.

145. J.E.O “Rourke, K.O” Connor. Dewatering for surface coal mines. Proceedings B of the 1st International Mine Water Congress. April, 1982. – Hungary, pp. 531-550.

146. Methods for Dewatering an Excavation Site.//World Constr. 1980, № 9.

147. *R.D.Andresen, D.B. Kleiman.* Special Dewatering Methods for soll Stabilization. Proceedings B of the International Mine Water Association. – April, 1982. – Hungary, pp. 335-353.

148. *Шрейдер В.А.* Современные материалы для фильтров закрытого горизонтального дренажа, применяемые за рубежом: Обз. инфор.- М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР. 1981, № 10, 72 с.

149. *Антоненко Л.К.* Железорудная промышленность СССР накануне XXVII съезда КПСС // Горный журнал, 1986, № 1.

150. *Антоненко Л.К.* На завершающем этапе пятилетки // Горный журнал, 1985, № 1.

151. *Пономаренко Ю.В., Кравчук С.В., Писанец Е.П.* Защита горнорудных предприятий от обводнения при разработке месторождений руд черных металлов // Горный журнал, 1984, № 10.

152. *Волков Ю.И., Крупкина Л.В., Олиференко Н.П.* Анализ опыта осушения буроугольных месторождений Польши, разрабатываемых открытым способом. Влияние обводненности на основные технологические процессы в горном деле и строительстве: Тез. докл. на обл. научно-техн. конференции / ВИОГЕМ, Белгород, 1984.

153. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Титов В.И. и др.* Проблемы осушения железорудных месторождений Тхатхе, Вьетнам. Материалы 11-ого международного симпозиума. Вопросы осушения, геологии и геоинформатики, горных работ, геомеханики, промышленной гидротехники и обогащении. Белгород, 2011, с. 23-29.

154. *Вортман З.М.* Практика ударно-канатного бурения на воду. - М.: Недра, 1997, 296 с.

155. Романенко В.А. Подготовка водозаборных скважин и эксплуатации. – Ленинград: «Недра», Ленинградское отделение, 1990, 119 с.

156. *Анатольевский П.А., Малоян А.В., Шниров О.М.* Эксплуатация и ремонт водяных скважин. - М.: Недра, 1964, с. 212.

157. *Абрамов С.К., Газизов М.С., Костенко В.И.* Защита карьеров от воды. - М.: Недра, 1976, 230 с.

158. Справочник по бурению скважин на воду под ред. Д.Н.Башкатова. -М.: Недра, 1979, 560 с.

159. *Гаврилко В.М., Алексеев В.С.* Фильтры буровых скважин на воду. - М., 1976, 345 с.

160. *Солонин Б.Н.* Краткий справочник по проектированию и бурению скважин на воду. – М.: Недра, 1983, 107 с.

161. *Киселев О.К.* Пути увеличения срока службы скважин на воду. // «Гидротехника и мелиорация» № 4, - М., 1971.

162. *Касьянов Н.М., Штырин В.Ф.* Вопросы повышения качества вскрытия продуктивных пластов. ВНИИОЭНГ, - М., 1969.

163. *Белинский А.С., Дубровский В.В.* Разведочно-эксплуатационные скважины для водоснабжения и их проектирование. «Госгеолтехиздат», - М., 1956.

164. *Башкатов Д.Н.* Современное состояние и пути развития техники и технологии бурения скважин на воду. Материалы семинара «Технический прогресс при строительстве скважин на воду». - М., 1974.

165. *Башкатов Д.Н. и др.* Комбинированный способ разглинизации гидрогеологических скважин. «Разведка и охрана недр, № 11, - М., 1968.

166. *Паус К.Ф.* Буровые промывочные жидкости. -М.: Недра, 1967.

167. *Тимошков И.А.* Промывочные жидкости для вскрытия песчаных и песчано-гравийных водоносных горизонтов при вращательном бурении скважин на воду. Вопросы осушения месторождений полезных ископаемых. Труды института «ЦНИИгоросушение», вып. IX. Фонды ин-та ВИОГЕМ. - Белгород, 1967.

168. *Сафонов В.Е., Тихонов А.К.* Сущность химических методов очистки прифильтровых зон скважин от остатков промывочных жидкостей. Сб. трудов ВИОГЕМ, вып. XII. - Белгород, 1970.

169. *Башкатов Д.Н., Оноприенко М.Г.* Вскрытие водоносных горизонтов в рыхлых отложениях. // «Разведка и охрана недр», № 8, - М., 1973.

170. *Тимошков И.А.* Определение глубины проникновения меловых растворов в пески и гравий. Труды ВИОГЕМ, вып. XII, г.Белгород, 1970.

171. *Квашнин Г.П.* Вскрытие и освоение водоносных пластов при вращательном бурении скважин на воду. Сборник «Специальные работы в промышленном строительстве», серия V, вып. 2(32), ЦБТИ Минмонтажспецстрой СССР, - М., 1967.

172. *Гончаров П.Е., Чепраков В.И.* Опыт оборудования водопонижающей скважины гравийно-засыпным фильтром. // «Монтажные и специальные работы в строительстве», № 11, - М., 1966.

173. *Ломоносов А.Я.* Опыт проходки водоносных горизонтов с промывкой чистой водой. // «Разведка и охрана недр», № 10, - М., 1968.

174. *Гаврилко В.М., Алексеев В.С.* Бурение скважин большого диаметра роторными станками с обратной промывкой. ЦИНИС, Госстрой СССР, - М., 1966.

175. *Малоян А.В., Малоян Э.А.* Практические расчеты по бурению скважин на воду. - М.: Недра, 1968.

176. *Гаврилко В.М.* Техника и технология бурения скважин большого диаметра с обратной промывкой. // Материалы семинара «Технический прогресс при строительстве скважин на воду». - М., 1974.

177. *Башкатов Д.Н. и др.* Бурение скважин с прямой промывкой водой. // Материалы семинара «Технический прогресс при строительстве скважин на воду», - М., 1974.

178. *Мухин Л.К., Токунов В.И.* Влияние растворов на углеводородной основе на проницаемость продуктивных коллекторов. // «Бурение», № 8, - М., 1971.

179. *Мищевич В.И., Сидорова Н.А.* Справочник инженера по бурению. Т.1. - М.: Недра, 1973.

180. *Роджерс В.Ф.* Состав и свойства промывочных жидкостей для бурения нефтяных скважин. Пер. с англ. - М.: Недра, 1967.

181. Промывочные жидкости за рубежом. Обзор зарубежной литературы, сер. «Бурение», ВНИИОЭНГ, - М., 1967.

182. *Кузькин В.С., Гончаров П.Е., Черняк В.И.* Исследование вопросов кольматации водоносных горизонтов. // «Разведка и охрана недр», № 2, 1978, с.57-58.

183. Методические указания по определению деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в стабилометрах. - Белгород, 1973.

184. *Бочков Н.М.* Физический метод установления критических вымывающих скоростей для проектирования фильтров скважин. // «Разведка и охрана недр», № 6, 1948, с. 18-20.

185. *Кулиев С.М.* Некоторые вопросы применения гравийных фильтров. // «Нефтяное хозяйство», № 2, 1948, с. 24-28.

186. *Маслов Н.Н., Котов Н.П.* Инженерная геология. Изд-во литературы по строительству. - М., 1971, 342 с.

187. *Володько И.Ф.* Водозаборы и особенности поисков подземных вод в различных гидрогеологических условиях. - М., 1963, с. 180.

188. *Алексеев В.С., Гребенников В.Т., Астрова Н.В.* Гидрогеологическое обоснование методов восстановления производительности скважин на воду. Итоги науки и техники, сер. Гидрогеология. Инженерная геология, т.6, - М., ВИНИТИ, 1979, 90 с.

189. *Алексеев В.С., Никольская Е.А.* Зарубежный опыт конструирования и расчёта фильтров скважин на воду. Итоги науки и техники. Гидрогеология. Инженерная геология. - М., 1972, с.5-68.

190. *Грикевич Э.А.* Гидравлика водозаборных скважин. - М.: Недра, 1986, 231 с.

191. *Klots D.* Hydraulische Eigenschaften handelsüblicher Brunnenfilterrohre. Z. Dtsch. geol., 1975,126, Teil 2.

192. *Klots D.* Hydraulische Eigenschaften der Johnsonfilterrohre. "Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau", 1971, № 9, s.323-328.

193. *Коль С.А.* Определение скорости фильтрации подруслового потока. Труды Ленинградского гидрогеологич. ин-та (ГТИ), вып.8(62). - Л.: Гидрометеоиздат, 1968, с.175-187.

194. *Огильви Н.А., Федорович Д.И.* Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости, вып.14. - М., ВСЕГИНГЕО, 1963, с.43.

195. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Методические рекомендации по оценке гидравлических параметров фильтров, применяемых при сооружении дренажных скважин. - ВИОГЕМ, Белгород, 1982, 28 с.

196. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Гидравлическая оценка фильтров дренажных скважин индикаторным методом. Гидротехника и мелиорация, 1980, № 3, с.71-73.

197. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Исследование гидравлических свойств различных конструкций фильтров дренажных скважин. Шахтное строительство, 1984, № 7, с.12-15.

198. *Волков Ю.И.* Выбор схемы моделирования и оценка точности определения гидравлических параметров фильтров дренажных устройств на основе индикаторных исследований. В сб. «Охрана и рациональное использование подземных вод в горнорудных районах при разработке месторождений полезных ископаемых (тез. докл.) – ВИОГЕМ, Белгород, 1979.

199. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Оценка коэффициента водопроницаемости фильтров с водоприёмной поверхностью из штампованного листа и проволочной обмотки. В сб. «Гидрогеологические исследования водозаборных, водопонизительных и дренажных систем» - ВНИИ ВОДГЕО, Москва, 1980, с.85-92.

200. *Воронцов В.И., Волков Ю.И., Павленко Г.М.* Анализ применения различных типов фильтров дренажных устройств при осушении месторождений. В сб. «Осушение месторождений, рудничная гидрогеология, специальные горные работы». - ВИОГЕМ, вып.25, Белгород, 1978, с.15-20.

201. *Осипчук Л.Н., Карпенко К.К.* Рекомендации по определению параметров гибких витых дренажных труб из жесткого поливинилхлорида. - Киев, НИИСП Госстрой УССР, 1973, 20 с.

202. *Волков Ю.И., Забусов Н.И., Юдин А.Г.* Направления совершенствования и новые разработки конструкций фильтров дренажных скважин. В сб. «Сооружение дренажных устройств и противофильтрационных завес». - ВИОГЕМ, Белгород, 1987, с.83-89.

203. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Выбор оптимальных параметров водоприёмной части скважин. Гидротехника и мелиорация, 1986, № 1, с.62-65

204. Гаврилко В.М., Беляков В.М. Конструкции фильтров водозаборных скважин, их исследование и промышленное освоение. Использование подземных вод. Материалы семинара. - М, 1969, с.70-77.

205. *Алексеев В.С., Волков Ю.И., Юдин А.Г.* Методические рекомендации по выбору оптимальных параметров фильтров и оценке межремонтного периода дренажных скважин. - ВИОГЕМ, Белгород, 1984, 22с.

206. Методическое пособие по расчёту параметров гравийных фильтров дренажных и водозаборных скважин. - Белгород, ВИОГЕМ, 1972, 63 с.

207. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду. Под общей ред. В.В.Дубровского. - М.: Недра, 1972, 512 с.

208. *Винивити Э.И.* Регулирования выноса песка. Нефте - и газодобывающая промышленность. - М., 1975, № 23, с. 25-34.

209. *Винивити Э.И.* Методы борьбы с выносом песка на нефтяных промыслах США (Обзор зарубежной литературы). Серия Добыча, ВНИИОЭНГ, - М., 1967, с. 38.

210. *Володько И.Ф.* Водозаборы и особенности поисков подземных вод в различных гидрогеологических условиях. М., 1963, с. 180.

211. *Володько И.Ф.* Гравийные фильтры буровых скважин. Гидротехника и мелиорация. 1948, № 9, с. 26-33 с ил.

212. *Дмитриев К.Б.* Опыт сооружения высокодебитных скважин. Материалы семинара «Технический прогресс при строительстве скважин на воду». - М., 1974.

213. *Алексеев В.С., Волков Ю.И.* Исследование гидравлических свойств различных конструкций фильтров дренажных скважин. Шахтное строительство, 1984, № 7, с.12-15.

214. *Воронцов В.И., Волков Ю.И., Тихонов А.К.* Эффективность работы дренажных устройств при осушении Соколовского и Сарбайского месторождений. В сб. «Осушение месторождений, рудничная геология, специальные горные работы» ВИОГЕМ, вып.23, - Белгород, 1977, с.9-13.

215. *Волков Ю.И., Воронцов В.И.* Исследование работы дренажных устройств при осушении полезных ископаемых. В сб. «Проектирование предприятий горнорудной промышленности». - ГИПРОРУДА, Ленинград, вып.6, 1980, с.61-64.

216. *Волков Ю.И.* Опыт оценки параметров кольматажа и межремонтного периода дренажных скважин карьеров КМА. В сб. «Научные исследования в области гидрогеологии» ВНИИ ВОДГЕО, вып.74, -М., 1978 с. 81-88.

217. *Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.Б., Парийский Ю.М., Яковлев А.М.* Технология и техника разведочного бурения. - М.: Недра, 1983, с. 566.

218. *Авруцкий А.Л., Волков С.А., Демьянова Е.А. и др.* Справочник мастера колонкового бурения. Гос. науч-технич. издат. литературы по горному делу. – М., 1960, с. 528.

219. *Кузькин В.С., Пономаренко Ю.В., Гончаров П.Е. и др.* Пути совершенствования технологии и техники сооружения скважин на воду. Материалы десятого международного симпозиума. - Белгород, 25-29 мая 2009.

220. *Кузькин В.С., Экдышман А.С., Беляков С.И. и др.* Способ вскрытия водоносных горизонтов вертикальной скважиной и установка для его реализации. Патент на изобретение № 2244794. Опубл. 20.01.2005. Бюл. № 2.

221. *Кузькин В.С., Анищенко Н.Е., Громова Н.Н. и др.* Буровая установка для сооружения скважин на воду в рыхлых водоносных горизонтах с напорами. Патент на полезную модель № 133557. Бюл. № 29, 2013.

222. *Анатольевский П.А., Разумов Г.А.* Горизонтальные водозаборные скважины. - М.: Недра, 1970, 200 с.

223. *Разумов Г.А.* Проектирование и строительство горизонтальных водозаборов и дренажей. - М.: Стройиздат, 1988, с. 240.

224. *Анпилов В.Е., Пономаренко Ю.В., Луговой В.П.* Опыт сооружения лучевых скважин в мелкозернистых песках. // «Гидрогеологическое строительство» № 3, 1982, с. 50-52.

225. *Чучелин Л.Д., Кузькин В.С., Малацковский Ф.С., Бондаренко И.И., Каминский Б.Г.* Осушение бортов карьеров с помощью горизонтальных дренажных скважин. // Горный журнал, 1981, № 12, с. 16-18.

226. *Чучелин Л.Д., Кузькин В.С., Малацковский Ф.С. и др.* Временные методические рекомендации по технологии сооружения лучевых дренажных скважин буровой установкой УЛБ-130. - ВИОГЕМ, Белгород, 1981, 20 с.

227. *Малацковский Ф.С., Анпилов В.Е.* Способ сооружения дренажных скважин. А.с. 1262031, БИ № 37, 1986.

228. *Анпилов В.Е., Малацковский Ф.С., Пономаренко Ю.В.* Защита действующих сооружений от подтопления способом лучевого дренажа. // «Промышленное строительство», № 10, 1975, с. 36-38.

229. *Кравчук С.В., Кузькин В.С.* Осушение карьеров горизонтальными дренажными скважинами и технические средства их сооружения. Материалы международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». Т. 1. - Белгород, 1991, с. 25-30.

230. *Пономаренко Ю.В., Анпилов В.Е.* Лучевой дренаж застроенных территорий. - М.: Недра, 1989, 198 с.

231. *Кузькин В.С., Пономаренко Ю.В., Беляков С.И. и др.* Способ сооружения горизонтальной или наклонной дренажной скважины в обводненных песчаных водоносных горизонтах, установка для его реализации, фильтровая труба (Варианты). Патент № 2233373, бюл. № 21, 2004.

232. *Кузькин В.С., Пономаренко Ю.В., Тимошков И.А.* Способ и устройство для сооружения горизонтальной дренажной скважины в обводненных песках. Патент № 2382866. Бюл. № 6, 2010.

233. *Кузькин В.С., Бондаренко И.И., Сиваев П.М., Черкашин В.И.* Технология сооружения горизонтальных дренажных скважин. Материалы международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Том 1. Вопросы осушения и экологии. - Белгород, 1991.

234. *Пешковский Л.М., Перескокова Т.М.* Инженерная геология. - М.: Высшая школа, 1982, с. 342.

235. *Цитович Н.А.* Механика грунтов. - М.: Высшая школа, 1983, 288 с.

236. *Бокий Б.В., Зимина Е.А., Смирняков В.В., Тимофеев О.В.* Проведение и крепление горных выработок. Госгортехиздат, - М.: Недра, 1963, 556 с.

237. *Зеленин А.Н.* Основы разрушения грунтов механическим способом. Изд. 2-ое, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1968, 376 с.

238. *Катанов Б.А., Сафохин М.С.* Режущий буровой инструмент. - М.: Машиностроение, 1976. 168 с.

239. *Башкатов Д.Н., Олоновский Ю.А.* Вращательное шнековое бурение геологоразведочных скважин. - М.: Недра, 1968, 192 с.

240. *Перетолчин В.А.* Вращательное бурение скважин в карьерах. - М.: Недра, 1975, 128 с.

241. *Дверий В.П.* Бурение скважин лопастными долотами. -М.: Недра, 1977, 188 с.

242. *Сулакшин С.С.* Технология бурения геологоразведочных скважин. -М.: Недра, 1973, с. 319.

243. *Катанов и др.* Исследование процесса бурения горизонтальных скважин по вязким грунтам. «Механизация строительства» № 7, 1971, с. 10-11.

244. *Пуркаев И.Н. и др.* Определение параметров при шнековом бурении горизонтальных скважин. Сб. научн. трудов Механизация горных работ № 32. Кузбасский политехнич. ин-т. - Кемерово, 1971, с. 121-125.

245. *Сафохин М.С., Катанов Б.А.* Машинист бурового станка на карьере. - М.: Недра, 1984. 308 с.

246. *Кузнецов В.И., Катанов Б.А.* Определение оптимальных параметров шнеков для бурения вертикальных и наклонных скважин. Вопросы механизации горных работ. Сб. научн. трудов (ГИП Куз. П.И.) № 38, - Кемерово, 1971, с. 152-160.

247. *Пуркаев И.Н., Машетьев Л.Е., Кабаев Г.А.* Определение некоторых параметров при шнековом бурении горизонтальных скважин. Сб. научн. трудов «Механизация горных работ» № 46. Куз. ПИ, - Кемерово, 1972, с. 164-167.

248. *Перетолчин В.А.* Выбор параметров и расчёт показателей работы шнекового бурового станка. - Л.: Взрывное дело № 79/36, 1978, с. 111-116.

249. *Пуркаев И.Н., Катанов Б.А., Тагиров Н.Т., Спорняков Н.М.* Исследование процесса транспортирования грунта шнеком при бурении горизонтальных скважин. Сб. научн. трудов «Механизация горных работ». Куз. ПИ. № 21. - Кемерово, 1970, с.306-310.

250. *Кузнецов В.И., Катанов Б.А.* Определение производительности мощности на транспортирование и к.п.д. шнеков при бурении. Сб. научн. трудов «Вопросы механизации горных работ». Куз. ПИ, № 38, 1971, с.146-152.

251. *Воздвиженский Б.В., Васильев М.Г.* Буровая механика. - М.: Госгеологтехиздат, 1954, 492 с.

252. *Волков С.А. и др.* Буровое дело. - М.: Недра, 1965, 492 с.

253. *Чучелин Л.Д., Кузькин В.С., Малацковский Ф.С. и др.* Временные методические рекомендации по технологии сооружения лучевых дренажных скважин буровой установкой УЛБ-130. - Белгород, ВИОГЕМ, 1981, 20 с.

254. *Лысенко М.П.* Состав и физико-механические свойства грунтов. - М.: Недра, 1972, 320 с.

255. *Пономаренко Ю.В., Анпилов В.Е.* Лучевой дренаж застроенных территорий. - М.: Недра, 1989, 198 с.

256. *Зеленин А.Н.* Основы разрушения грунтов механическим способом. Изд. 2-ое, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1968, 376 с.

257. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механики грунтов. - М., Госгеолтехиздат, 1968, 272 с.

258. *Чучелин Л.Д., Кузькин В.С., Малацковский Ф.С. и др.* Временные методические рекомендации по технологии сооружения лучевых дренажных скважин буровой установкой УЛБ-130. - Белгород, ВИОГЕМ, 1981, 20 с.

259. *Кузькин В.С., Бондаренко И.И., Анпилов В.Е.* Транспортирование увлажненных глинистых грунтов при бурении горизонтальных скважин с применением установки УЛБ-130 / Гидрогеологические расчёты и технические средства осушения месторождений полезных ископаемых. - Белгород, ВИОГЕМ, 1983, с. 102-108.

260. *Дверий В.П.* Бурение скважин лопастными долотами. -М.: Недра, 1977, 188 с.

261. *Пуркаев И.Н., Машетьев Л.Е., Кабаев Г.А.* Определение некоторых параметров при шнековом бурении горизонтальных скважин. Сб. научн.

трудов «Механизация горных работ» № 46. Куз. - Кемерово, ПИ, 1972, с. 164-167.

262. *Кузькин В.С., Анищенко Н.Е., Громова Н.Н. и др.* Буровая установка для прокладки трубопроводов в обводненных грунтах. Патент на полезную модель № 133543, Бюл. № 29, 2013.

263. *Кочерженко В.В.* Антифрикционные покрытия опускных колодцев на основе эпоксидных смол. Сб. трудов МИСИ, БТИСМ, вып. 26, том V. - М., 1977, с. 49-57.

264. *Истомин И.П.* Изыскания оптимальных наполнителей для антифрикционных пластмасс на базе фторопласта. Сб. «Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах». - М.: Наука, 1968, с. 32.

265. *Луценко Г.А., Хакимова Д.К., Сантюрихина Л.Н.* Влияние кристаллической структуры природных графитов на антифрикционные свойства твердых смазочных покрытий. Сб. «Конструкционные материалы на основе углерода» № 10. - М.: Металлургия, 1975, с. 148-152.

266. *Ивахнюк В.А., Кочерженко В.В., Тикунова И.В.* К вопросу о влиянии влажности и гранулометрического состава грунтов на трение по листовому полимерному покрытию. Сб. тр. МИСИ, БТИСМ, вып. 26, том 5. - М., 1977, с. 34-42.

267. *Нобухо Сакурай, Масаки Ханада.* Бурение длинных горизонтальных скважин. Сб. статей фирмы «Кокэн» для симпозиума 82 по инициативе ГКНТ СССР. – М., 1982, с . 7-1 ÷ 7-29.

268. Перевод технического бюллетеня № EF-S02 ТОНЭ БОРИНГ КО. ЛТД. Система щитового бурения ТОНЭ. Буровые станки для проведения горизонтальных выработок и щитовое буровое оборудование. - М., 1982, с. 1-18.

269. *Эпштейн Е.Ф., Мацейчук В.И., Ивахнин И.И., Асатурян А.Ш.* Расчет бурильных труб в геолого-разведочном бурении. - М.: Недра, 1979, 160 с.

270. *Вудс Г., Лубинский А.* Искривление скважин при бурении. - М.: Гостоптехиздат, 1960, 161 с.

271. *Беляев В.М., Калинин, Солодский К.М.* Расчёт компоновки нижней части бурильной колонны. - М.: Недра, 1977, 192 с.

272. *Калинин А.Г.* Искривление скважин. - М.: Недра, 1974, 304 с.

273. *Григорян Н.А.* Бурение наклонных скважин уменьшенных и малых диаметров. - М.: Недра, 1974. 240 с.

274. *Кодзаев Ю.В*. Бурение разведочных горизонтальных скважин. -М.: Недра, 1978, 223 с.

275. *Бондаренко И.И., Кузькин В.С., Сазонов Ю.А.* Способ сооружения дренажных скважин и устройство для его осуществления. А.с. № 1682547, Бюл. № 37, 1991.

276. *Кузькин В.С., Беляев И.В., Кузькин Т.В.* Буровая установка для оборудования горизонтальной или наклонной скважины фильтровой колонной, устанавливаемой под защитой внешней колонны. Патент на полезную модель № 119025, бюл. № 22, 2012.

277. *Тараканoвский Л.Ф., Кузькин В.С., Бондаренко И.И.* Устройство для направленного бурения скважин. Патент РФ № 2017922, Бюл. № 15, 1994.

278. *Чучелин Л.Д., Кузькин В.С., Малацковский Ф.С., Бондаренко И.И., Каминский Б.Г.* Осушение бортов карьеров с помощью горизонтальных дренажных скважин. // Горный журнал, 1981, № 12, с. 16-18.

279. *Кузькин В.С., Пономаренко Ю.В., Беляков С.И. и др.* Способ сооружения горизонтальной или наклонной дренажной скважины в обводненных песчаных водоносных горизонтах, установка для его реализации, фильтровая труба (Варианты). Патент № 2233373, бюл. № 21, 2004.

280. *Бондаренко И.И., Кузькин В.С., Гончаров А.Г.* Способ посадки фильтровой колонны. А.с. № 1737106, Бюл. № 20, 1992.

281. *Кузькин В.С., Бондаренко И.И., Гончаров П.Е.* Фильтры для горизонтальных дренажных скважин. Вопросы осушения и экологии. Специальные горные работы и геомеханика. - Белгород, ВИОГЕМ, 1993, с. 159, 163.

282. *Гончаров А.Г., Гончаров П.Е., Шутров П.И., Шеметов В.А.* Техника и технология сооружения шахтных стволов для лучевых дренажей. Материалы международного симпозиума «Освоения месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». Том 1. Вопросы осушения и экологии. - Белгород. ВИОГЕМ, 1991, с. 219-223.

283. *Абрамсон Х.И.* Погружение крепи в тиксотропной рубашке при сооружении стволов шахт в сложных гидрогеологических условиях. // «Шахтное строительство» № 5, 1977, с. 6-10.

284. *Литинский Ю.В., Коротеев В.А., Перов А.Ф., Михайлов В.Б.* Проходка верхнего участка ствола методом погружения крепи в тиксотропной рубашке. // «Шахтное строительство» № 1, 1982, с. 24-26.

285. *Калмыков Е.П.* О водоподавлении в вертикальных стволах. // «Шахтное строительство» № 1, 1981, с.14-17.

286. *Репко А.А.* Расчёт нагрузок на крепь вертикальных стволов в слабых горных породах. // «Шахтное строительство» № 7, 1982, с.15-17.

287. *Калмыков Е.П.* Давление горных пород на крепи устьев вертикальных стволов. // «Шахтное строительство» № 11, 1981, с. 14-16.

288. *Волков Ю.И., Кузькин В.С., Гончаров П.Е. и др.* Опыт сооружения лучевого дренажа в условиях г.Харькова. Материалы восьмого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях», ч. I «Вопросы осушения и защиты от подтопления, горнопромышленная геология и специальные горные работы». - Белгород, 2005, с. 104-110.

289. *Волков Ю.И., Кузькин В.С., Гончаров П.Е. и др.* Защита реки Волги от загрязнения нефтепродуктами. Материалы восьмого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях», ч.II «Вопросы геомеханики, промышленной гидротехники, геоинформатика и охрана природных ресурсов». - Белгород, 2005, с. 335-339.

290. *Оксанич И.Ф., Тиль В.И., Шабер Г.Б.* Методические рекомендации по оценке состояния и перспектив развития техники и технологии осушения железорудных месторождений. - Белгород, ВИОГЕМ, 1977, с. 96.

291. *Дрямов В.С., Климентов М.Н., Тимошков И.А. и др.* Техника для сооружения дренажных скважин из подземных горных выработок. Материалы международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». Том 1. Вопросы осушения и экологии. – Белгород, 1991, с. 210-213.

292. *Шемякин А.Ю., Тимошков И.А., Волков Ю.И., Беленко М.В.* Сооружение восстающих скважин в подземном дренажном комплексе Стойленского ГОКа. // Горный журнал, 2021, ИД «Руда и Металлы»,- М., №6, с. 24-26.

293. *Кузькин В.С., Тимошков И.А., Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В. и др.* Теоретическое обоснование технологии бурения восстающих дренажных скважин и технология вскрытия водоносных горизонтов. Материалы

седьмого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Вопросы осушения, горнопромышленной геологии и охраны недр, геомеханики, промышленной гидротехники, геоинформатики, экологии». - Белгород, 2003, с. 20-30.

294. *Скиданов А.Т., Юдин А.Г., Волков Ю.И., Синев В.С.* Фильтр восстающих дренажных скважин. А.с.№ 1245686, МКИ Е21В43/08, 23.07.86 г., бюл. № 27.

295. *Волков Ю.И., Пономаренко Ю.В., Юдин А.Г., Скиданов А.Г.* Скважинный фильтр а.с.№ 1288285, МКИ Е21В43/08, 7.02.87 г., Бюл. № 5.

296. *Кузькин В.С., Беляков С.И., Гончаров П.Е. и др.* Способ сооружения горизонтальной или наклонной скважины в трещиноватых породах, разрабатываемых с помощью буровзрывных работ и буровая установка для его реализации. Патент, № 2285779, Бюл. № 29, 2006.

297. *Силин- Бекчурин А.И.* Динамика подземных вод, МГУ, 1965, 380 с.

398. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод. - М.: Недра, !977, 664 с.

399. *Абрамов С.К.* Гидрогеологические расчёты вертикальных дренажей при осушении угольных месторождений. - М.: Углетехиздат, 1955.

300. *Бочевер Ф.М.* Проектирование водозаборов подземных вод. - М.: Стройиздат, 1976, 292 с.

301. *Бэр Я., Заславски Д., Ирней С.* Физико-математические основы фильтрации воды. - М.: Мир, 1971, 452 с.

302. *Шестаков В.М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. МГУ, 1965, 237 с.

303. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Основы гидрогеомеханики. - М.: Недра, 1974, 296 с.

304. *Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С., Шержуков Б.С.* Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. – М.: Недра, 1977, 271 с.

305. *Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е.* Защита подземных вод от загрязнения. - М.: Недра, 1979. 255 с.

306. *Веригин Н.Я., Шержуков Б.С.* Диффузия и массообмен при фильтрации жидкостей в пористых средах. «Развитие исследований по теории фильтрации в СССР». - М.: Наука, 1969, 237-313.

307. *Бочевер Ф.М., Орадовская А.Е.* Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. - М.: Недра, 1972, 129 с.

308. *Орадовская А.Е.* Миграция вещества и тепла в подземных водах «Гидрогеологические исследования за рубежом». - М.: Недра, 1982, с. 33-74.

309. *Веригин Н.Н.* Основные принципы и методы геохимической гидродинамики. // «Геохимия и рудообразование», 1987, № 15, 53-60.

310. *Лукнер Л., Шестаков В. М.* Моделирование геофильтрации. - М.: Недра, 1976.

311. Чуйко В.М. Методические рекомендации по оценке напряжённо-деформированного состояния массива горных пород под влиянием осушения месторождений. - Белгород, ВИОГЕМ, 1978, 50 с.

312. *Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Численное моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988, 228 стр.

313. *Лукнер Л., Шестаков В.М.* Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986, 208 с.

314. *Васильев В.А., Карачевцев Н.Ф., Топчий Г.Е.* Методические указания по применению метода конечных элементов для решения плановых задач фильтрации подземных вод на ЭЦВМ. - Белгород, ВИОГЕМ, 1979.

315. *Кинцельбах В.* Моделирование массопереноса и фильтрации подземных вод на основе компьютерных технологий. Перевод с английского под редакцией Волкова Ю.И. - Белгород, ВИОГЕМ, 2009, 233 с.

316. *Мусин Р.Х., Храмченков М.Г.* Введение в численное моделирование геофильтрации. –Казань: изд-во Казан. Ун-та, 2019, 41 с.

317. *Гавич И.К., Ковалевский В.С., Язвин Л.С. и др.* Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. – Новосибирск: Наука, 1983, 241 с.

318. *Смирнов Е.М., Зайцев Д.К.* Метод конечных объёмов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика. 2004.

319. *Васильев В.В., Волков Ю.И.* Моделирование на ЭВМ задач фильтрации в трёхслойной среде применительно к проблемам разработки железорудных месторождений КМА. В сб. «Применение математических методов и ЭВМ в геологии». - Новочеркасский политехнический институт, Новочеркасск, 1983, с.65-66.

320. *Васильев В.В., Волков Ю.И., Орёл В.М.* Способ создания на ЭВМ постояннодействующей модели фильтрации подземных вод. Инф.листок о НТД, № 84-17, ЦНТИ, Белгород, 1984.

321. *Васильев В.В., Волков Ю.И., Беняш Т.Е.* Прогноз гидродинамического режима подземных вод в горнодобывающих районах методом конечных элементов. В сб. «Моделирование и прогнозирование изменений природных условий при перераспределении водных ресурсов». Всесоюз. Совещание СОАН СССР. - Новосибирск, 1987, с.25.

322. Groundwater Modeling System. Tutorials, version 5.0. Environmental Modelinq Research laboratory, 2004.

323. Groundwater Modeling System. Tutorials, version 10.3. AQUAVEO, 2018.

324. Groundwater Modeling System. Tutorials, version 10.5. AQUAVEO, 2020.

325. Steven F. Carle. T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Sofware. University jf California, Davis, 1999, 78 p.

326. Hsin-Chi J. Lin, David R. Richards, Cary A. Talbot, Gour-Tsyh (George) Yeh, Jing-Ru (Ruth) Cheng, Hwai-Ping (Pearce) Cheng, Norman L. Jones. A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, Version 3.0, 143 p.

327. Pollock, D.W., 2012, User Guide for MODPATH Version 6—A Particle-Tracking Model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A41, 58 p.

328. Pollock, D.W. 2016, User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1086, 35 p.

329. Chunmiao Zheng, P. Patrick Wang. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. Department of Geological Sciences University of Alabama Tuscaloosa, AL 35487, 220 p.

330. Henning Prommer & Vincent Post. A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media. User's Manual v2.10, http://www.pht3d.org., August, 2010, 186 p.

331. Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukor, M.C., and Guo, Weixing, 2008, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Method Book 6, Chapter A22, 39 p.

332. Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu, and Hughes, J.D., 2013, MODFLOW–USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A45, 66, 66 p.

333. C.A.J. Appelo and Massimo Rolle. PHT3D: A Reactive Multicomponent Transport. Model for Saturated Porous Media. Copyright © 2010 The Author(s) Journal compilation © 2010 National Ground Water Association.doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00732. x 6 p.

334. *Киреев Т.Ф.* Математическое моделирование фильтрационных течений в подземных пластах с использованием неструктурированной сетки Вороного. Дисс. На соиск. уч. ст. к. физ.-мат. Наук. - Уфа, 2020, 115 с.

335. *Киреев Т.Ф., Булгакова Г.Т., Хатмуллин И.Ф.* Моделирование полимерного заводнения с использованием сетки Вороного. Вычислительная механика сплошных сред, т. 11, 2018, с. 15-24.

336. John Doherty. PEST. Model-Independent Parameter Estimation. User Manual: 5th Edition. 2004, 336 p.

337. *Гладков Е.А*. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. - Томск, ТПУ, 2012, 87 с.

338. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Титов В.И., Забусов Н.И., Ряжских М.В*. Проблемы осушения железорудного месторождения Тхакхе, Вьетнам. Материалы 11 междун. Симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород, 2011, с.23-29.

339. *Волков Ю.И., Изотов А.А., Ряжских М.В.* Теория и практика разработки численных моделей систем осушения железорудных месторождений. // Горный журнал, № 9 2012, с. 32-37.

340. Hsin-Chi J.Zin, D.Richards, Gour-Tsgh Yeh, Jing-Ru Dheng, Hwai-Ping Cheng, H.Jones. FEMWATER: F Three - Dimensional Finite Dependent Flow and Transport, Technical Report HL-96, february1996.

341. A modular three-dimensional finite-difference Groundwater flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the Uni tes Geological Survey, 2004.

342. *Зотов К.В., Кучурина Т.Н.* Основы моделирования массопереноса в пористой среде. Часть I. Учебное пособие. - Санкт-Петербург, 2014, 34 с.

343. *Путилина В. С., Галицкая И, В., Юганова Т. И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций. Аналитический обзор. – Новосибирск, 2013, 95 с.

344. *Путилина В. С., Галицкая И, В., Юганова Т. И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Свинец. Аналитический обзор. – Новосибирск, 2016, 123 с.

345. *Путилина В. С., Галицкая И, В., Юганова Т. И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Кадмий. Аналитический обзор. – Новосибирск, 2012, 110 с.

346. *Путилина В. С., Галицкая И, В., Юганова Т. И.* Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции. Аналитический обзор. – Новосибирск, 2009, 155 с.

347. *Путилина В. С., Галицкая И, В., Юганова Т. И.* Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты. Аналитический обзор. – Новосибирск, 2019, 111 с.

34*8. Галицкая И, В., Путилина В. С., Юганова Т. И.* Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения. //Экологи. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 1 2021, с. 3-13.

349. *Яровая О. В., Молчанова Я. П., Гусева Т. В.* Растворенные и взвешенные неорганические вещества в водных системах. – Москва: РХТУ им. Д. И, Менделеева, 2014, 64 с.

350. *Мещерякова О. Ю.* Факторы миграции и трансформации нефти в геологической среде // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIV международного симпозиума им. академика М.А. Усова. – Томск, Томский политехнический университет. Изд-во Томского политехнического университета 2010, с. 368-370.

351. *Савенко В. С., Савенко А. В.* Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. – Москва, 2007, 247 с.

352. *Appelo, C.A.J., and D. Postma*. 2005. *Geochemistry. Groundwater and Pollution*, 2nd ed. Leiden: Balkema, 649.

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ НА ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Вовлечение в разработку месторождений со сложными гидрогеологическими условиями освоения, а также глубоких горизонтов на уже разрабатываемых месторождениях выдвинуло в ряд актуальных проблему оценки влияния обводнённости на безопасные условия ведения горных работ и технико-экономические показателя производства. Сложность решения поставленной проблемы определяется следующими обстоятельствами [1, 2]:

- необходимостью прогноза не только суммарных водопритоков к шахтам или карьерам, но и тех осложнений, которые вызываются поступлением воды в горные выработки;
- неизбежностью изучения закономерностей и разработки методов количественной оценки влияния обводнённости горных работ на технико-экономические показатели производства;
- комплексностью проблемы, решение которой находится на стыке гидрогеологии, инженерной геологии, геомеханики, горного дела, конкретной экономики.

Исследования, связанные с прогнозом осложнений, определяемых фактором обводнённости, развиваются по нескольким направлениям, что обусловлено применяемыми способами, системами и технологией ведения горных работ.

При подземной добыче полезного ископаемого фактор обводнённости определяет развитие таких горно-геологических явлений, как прорывы воды с интенсивным выносом размытых горных пород, прорывы плывунных и псевдоплывунных пород, нарушение устойчивости горных выработок и др. Кроме того, при производстве очистных работ наблюдаются вторичное обводнение ранее осушенных руд и увеличение их влажности выше нормативных значений. Методы прогноза отмеченных горно-геологических явлений в настоящее время интенсивно совершенствуются. Результатом исследований являются разработанные, исходя из условий безопасного ведения горных работ, критерии устойчивости бортов и откосов на карьерах, категории опасности шахт по прорывам воды в капитальные, подготовительные и очистные выработки.

Обводнённость горных пород при открытом способе разработки руд определяет развитие таких горно-геологических явлений, как оползни, оплывины, суффозия, прорывы воды из бортов карьеров и почвы полезного ископаемого. Необходимое теоретическое обоснование, позволяющее прогнозировать отмеченные горно-геологические явления, опробовано на практике и постоянно развивается для учёта неоднородности природной среды, модернизируемой техники и появлением новых технологических приёмов ведения горных работ.

Проектируемые и эксплуатируемые в настоящее время системы

осушения предполагают значительно уменьшенное влияние подземных вод на основные технологические процессы производства: буровзрывные, добычные, транспортные и т.д.

Обводнённость подземных горных выработок существенно снижает скорость их проходки, а в отдельных случаях определяет необходимость применения специальных способов ведения проходческих работ. Поступление воды в очистные выработки и водонасыщение отбитой руды приводит к ее слёживанию и неуправляемому выпуску. Руда, имеющая влажность выше нормативной, при отгрузке и транспортировке в условиях отрицательных зимних температур смерзается.

При открытом способе добычи полезного ископаемого оценка влияния подземных вод на отдельные технологические процессы неоднозначна. Для процесса экскавации имеет значение влажность породы, определяющая такие негативные явления, как налипание, смерзание. Очевидно, что объективным критерием осушения является достижение такой влажности пород, при которой не происходит их налипание или смерзание. В противном случае следует рассмотреть взаимосвязь между производительностью горного оборудования и комплексом признаков, определяемых эксплуатацией дренажной системы и другими водозащитными мероприятиями. Отметим, что в большинстве случаев в системах осушения используются технологические приёмы, позволяющие удалить только гравитационную воду. Удаление капиллярной и связанной воды технологически возможно, но применяется в исключительных случаях из-за дороговизны. Для буровзрывных работ существенное значение имеет снижение уровня подземных вод. С технологической точки зрения предпочтителен вариант, когда уровень подземных вод понижен до забоя взрывных скважин, так как взрывание обводнённого массива горных пород сопровождается такими осложнениями, как вымыв взрывчатого вещества, уменьшение степени дробления взорванной массы. В общем, существует альтернатива, состоящая в применении более дорогостоящих водостойких взрывчатых веществ.

Использование традиционных методов гидрогеологического и геомеханического исследований для изучения закономерностей влияния обводнённости на технологические процессы горного производства не позволяет достигнуть существенного прогресса в данном вопросе. Поэтому на первый план выдвигается разработка приёмов, основанных на методах системного анализа, исследования операций, экономико-математического моделирования. Представляется также необходимым при установлении количественных зависимостей между техническими характеристиками применяемого горного оборудования и параметрами обводнения горных пород учитывать вероятностный характер взаимосвязи.

В условиях, когда фактор обводнённости рассматривается в

конкретном технологическом цикле, количественные оценки существенно усложняются. Это связано как с неразработанностью методических приёмов, так и с необходимостью получения экспериментального материала на основе промышленных опытов. Имеющиеся данные описывают в основном критические ситуации, возникающие при полном нарушении того или иного технологического цикла. В целом же при безаварийном ходе процесс влияния обводнённости переплетается с большим количеством организационных, технических и других факторов и редко фиксируется документально в чистом виде.

Оценка влияния обводнённости на все звенья технологического процесса горного производства на базе экспериментального материала с использованием методов экономико-математического моделирования, когда на замыкающем этапе кроме технических требований вводят экономический критерий и определяют оптимальный вариант не только системы осушения, но и всего технологического процесса с учётом осушения, представляет новое направление в технологии защиты горных работ от подземных вод. Перспективность этого направления целиком вытекает из практических потребностей производства, особенно для предприятий, где эксплуатируемые системы осушения уже выполнили свою роль - обеспечили строительство горного предприятия и не способствуют интенсификации добычи руды. В первую очередь к таким предприятиям относятся карьеры Курской магнитной аномалии, Казахстана, подземные рудники Кривбасса, для которых развитие дренажных систем необходимо выполнять с учётом высказанных соображений. Вполне естественно, что системы осушения на большинстве месторождений сооружались при достаточно ясной ближайшей перспективе - строительство рудника. Цели и задачи, которые при этом решались, позволяли чётко определиться в главном на этапе строительства: взаимоувязать способ и технологию разработки со способом и технологией защиты от подземных вод. В процессе эксплуатации рудников выдвигается комплекс вопросов, требующий модернизации и реконструкции дренажных систем, и, в первую очередь, при ориентировке на внедрение нового технологического оборудования и существенного повышения эффективности горного производства.

Месторождения полезных ископаемых, характеризующиеся относительно простыми горно-геологическими условиями, в основном вовлечены в разработку, поэтому дальнейшее наращивание добычи руд связано с освоением глубоких горизонтов на действующих шахтах и карьерах и месторождений со сложными горно-геологическими и прежде всего гидрогеологическими условиями. Сложность гидрогеологических условий существенно влияет на технологию горных работ и, в конечном итоге, на производственную мощность горного предприятия и себестоимость руды.

Теоретическое обобщение богатого опыта проектирования, строительства и эксплуатации дренажных систем и устройств для защиты карьеров и шахт от подземных вод привело к формированию технологического направления в области осушения месторождений полезных ископаемых, которое характеризуется следующими чертами:

– анализом обширного круга факторов, определяющих выбор систем и схем осушения месторождений полезных ископаемых;

– включением осушения в технологический процесс строительства горного предприятия или его эксплуатации;

– комплексным использованием ресурсов подземных вод, внедрением безотходной технологии;

– формированием технологических требований к степени осушения полезного ископаемого и вмещающих пород;

– применением методов экономико-математического моделирования для обоснования осушения месторождений полезных ископаемых.

Традиционный подход к осушению формировался на примерах горных предприятий с простыми горно-геологическими условиями освоения. Осушение рассматривалось как комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасных и благоприятных условий ведения горных работ при заданных технологических параметрах горного производства. Обоснование осушения базировалось в основном на анализе природных условий, а минимизация затрат достигалась путём сравнения двух - трёх вариантов схем осушения.

Технологический подход при проектировании осушения шахтных и карьерных полей обязывает учитывать кроме природных условий технические, социально-экономические и экологические факторы.

Природные условия включают геологическое строение месторождения, гидрографию района, его гидрогеологические и физико-географические факторы. Последние учитываются при определении режима работы и производительности оборудования, используемого при сооружении и эксплуатации систем осушения, схемы обслуживания и сбора текущей информации. Наличие в пределах шахтных и карьерных полей водных объектов влияет не только на выбор способа и системы разработки месторождения, но и схемы защиты горных работ от подземных вод. Геологическое строение месторождения, его гидрогеологические и инженерно-геологические условия определяют необходимость осушения шахтных и карьерных полей как в период строительства горного предприятия, так и при добыче полезного ископаемого.

Технические факторы идентифицируют технические средства (горнопроходческое, буровое, оборудование для строительства дренажных систем, насосное, вспомогательное оборудование, его надёжность) и

технологические процессы (способ и систему разработки месторождения, способ и схему осушения, схему водоснабжения предприятия и района), используемые при строительстве и эксплуатации горного предприятия. Когда водоснабжение района базируется на подземных водах, способ и схема осушения должны учитывать не только способ и систему разработки месторождения, но и условия водоснабжения района питьевой и технической водой. Система осушения рассчитывается на обеспечение безопасности ведения горных работ в течение всего срока существования предприятия. Отмеченное говорит о том, насколько важно при проектировании осушения ориентироваться не только на существующие технику и технологию, но и учитывать направление и темпы научно-технического прогресса.

Социально-экономические факторы, их связь с защитой горных предприятий от обводнения, особенно при учёте экологических изменений окружающей среды и разработке мониторинга, представляют собой наименее изученный вопрос. Анализ социально-экономических факторов должен включать оценку перспектив экономического развития района, рекомендации по рациональному использованию ресурсов (в том числе по внедрению безотходной технологии). Всё это усложняет обоснование рациональной схемы и технологии защиты шахт и карьеров от подземных вод.

Накопленный опыт строительства крупных железорудных карьеров, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями освоения, свидетельствует, что технология осушения, в зависимости от технологии ведения вскрышных работ, развивается по двум основным вариантам.

Первый вариант заключается в частичном перехвате потока подземных вод до подхода его к карьеру и в обеспечении такого темпа снижения уровня вод, при котором эксплуатация горного оборудования происходит в осушенных породах. Перехват потока подземных вод осуществляется дренажными устройствами, сооружаемыми по схемам линейного ряда или контурной. Водоприток внутри карьера принимается дренажом на уступах бортов. Поиск оптимального технологического решения сводится к выбору очерёдности ввода в эксплуатацию дрен и к заданию различных режимов водоотбора. В рассматриваемом варианте на систему дренажных устройств приходится основная нагрузка по защите от обводнения, что повышает требования к её надёжности и определяет необходимость соответствующего резерва.

Второй вариант основывается на возможности ведения вскрышных работ в обводнённых условиях. Водопонижение осуществляется как частичным перехватом подземного потока, так и непосредственным водоотливом из карьера. Дренажные устройства остаются основным средством осушения на внешнем дренажном контуре, но количество их по сравнению с первым вариантом резко сокращается, так как разработка пород

в котловане производится плавучими земснарядами, которые осуществляют открытый водоотлив. Управление процессом осушения упрощается, однако возникают трудности с рациональным использованием откачиваемых подземных вод.

Оба технологических варианта не исключают применение на локальных участках иглофильтровых установок, горизонтальных дрен и других технических средств осушения.

Период разработки месторождений, по сравнению с периодом строительства карьера, характеризуется существенным усложнением технологии и схем осушения. Анализ опыта осушения железорудных месторождений КМА свидетельствует, что существующие в настоящее время схемы осушения рассчитаны на применение цикличной технологии разработки с использованием одноковшовых экскаваторов, автомобильного и железнодорожного транспорта. Тенденция повышения эффективности открытых горных работ при подъёме горной массы из карьера состоит в широком внедрении циклично-поточной или поточной технологии. Однако схемы осушения, разработанные для цикличной технологии, не всегда оказываются технологичными при циклично-поточной и поточной технологии. В возникшей ситуации необходимы не только совершенствование существующих и разработка новых схем и технических средств осушения, но и взаимная увязка возможных вариантов схем разработки и осушения месторождения.

В качества примера, иллюстрирующего возможности, которые открываются для разработки рациональных схем водозащиты горных работ при включении осушения в единый технологический процесс добычи руды, можно рассмотреть рудник "Ингулец" в Криворожском бассейне [2].

Разработка железных руд в этаже 600-650 м на участке, ограниченном маркшейдерскими осями 75-85, рудника "Ингулец" осложнялась в результате поступления воды в очистные камеры. Гидрогеологическими наблюдениями установлено, что основным источником обводнения добычного участка является затопленная вахта "Магистраль", расположенная в 1,2 км севернее по простиранию горных пород. Горные работы на рассматриваемом участке ведутся системой этажно-камерного обрушения с юга на север (т.е. от центра месторождения к флангу), следовательно, добычные работы приближаются к контуру питания подземных вод. Для полного перехвата потока подземных вод проектом предусматривалось разрабатываемый участок оконтурить дренажными горными выработками. На основе тщательного анализа условий обводнения рекомендовано изменить порядок ведения горных работ: т.е. вести их от фланга месторождения к центру, удаляясь от затопленной шахты. При изменённом порядке добычные работы только в одном блоке будут вестись в обводнённых условиях, что упрощает схемы водозащиты, в

частности, можно ограничиться одной дренажной выработкой, пройденной вкрест простирания пород со стороны шахты "Магистраль". Таким образом, в результате совместного анализа технологии разработки руд и их водозащиты можно не только обеспечить необходимое осушение участка горных работ, но и существенно сократить при этом материальные затраты.

Технологический подход к осушению коренным образом меняет отношение к подземным водам, которые рассматриваются не только как фактор, осложнявший ведение горных работ, но, прежде всего, и как полезное ископаемое; при этом возникают две взаимосвязанные задачи использование шахтных, карьерных и дренажных вод в пределах горнодобывающего района и охрана водного бассейна от загрязнения и истощения.

Наиболее отчётливо сложное единство задач утилизации откачиваемых вод и охраны водного бассейна можно проследить на примере Криворожского бассейна, в котором сложился острый дефицит воды. В настоящее время в бассейне шахтные и дренажные воды полностью используются в оборотном водоснабжении горно-обогатительных комбинатов, что исключило их сброс в реки Саксагань и Ингулец. Таким образом, полное использование шахтных и дренажных вод в горнодобывающем районе решает вопрос охраны подземных и поверхностных вод от загрязнения. Подземные воды в пределах бассейна характеризуются высокой минерализацией и не пригодны для хозяйственно-питьевого водоснабжения, поэтому вопрос об охране водных ресурсов от истощения до недавнего времени не ставился. Однако в последние годы разведаны месторождения минеральных лечебных вод, которые переданы в эксплуатацию. Решение вопроса об охране минеральных лечебных вод требует учёта технологического фактора (применяемых систем разработки руд), который определяет развитие контура подработки водоносных горизонтов и комплексов.

Замыкающим звеном в технологическом подходе к осушению является экономико-математическое моделирование многовариантных технико-экономических задач, учитывающее всё многообразие природных, технических и социально-экономических факторов и их сложное взаимовлияние. Экономико-математические модели должны обеспечить оценку всех эксплуатационных операций по защите от обводнения, рассматриваемых одновременно в последовательности и технологической взаимосвязи с операциями по ведению горных работ, рациональному использованию подземных вод и утилизации дренажных вод. Сложность задачи усугубляется тем, что некоторые взаимосвязанные процессы характеризуются противоречивостью целей, а нормальное функционирование предприятия требует учёта интересов всей системы.

В настоящее время решение поставленных задач осуществляется на региональных и локальных моделях с применением современного программного обеспечения и имитационного моделирования с оценкой различных вариантов развития событий на рассматриваемой территории и объекте.

Приводимые в последующих главах примеры свидетельствуют о перспективности технологического подхода к осушению шахтных и карьерных полей. Для месторождений полезных ископаемых, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями освоения, обособление осушения от технологического процесса добычи руд может привести к необоснованному увеличению затрат на дренажные мероприятия, недостаточной степени осушения горных пород, неправильному выбору систем разработки. Основные направления совершенствования технологии защиты горных предприятий от подземных вод заключаются в анализе всего комплекса природных, технических и социально-экономических факторов, объединении схем и технологии защиты от подземных вод со схемами водоснабжения предприятий и технологией ведения добычных работ. Достижение поставленной цели возможно только при использовании экономико-математических моделей, ориентированных на современные подходы, компьютерные программы с элементами искусственного интеллекта и электронные вычислительные средства.

ГЛАВА 2

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Система мониторинга водных ресурсов на горных предприятиях - это «глаза и уши» не только за оценкой эффективности осушения, но и за истощением водных ресурсов и изменением их качественного состава. Она включает режимную сеть наблюдательных скважин за уровнем и химическим составом подземных вод, наблюдательных пунктов на поверхностных водотоках и водоёмах, специальных скважин и пунктов для контроля за температурным режимом в зоне многолетней мерзлоты. При формировании сети мониторинга за основу берут следующие показатели [3]:

- количество скважин и наблюдательных пунктов;
- время работы;
- стабильность в работе;
- стабильность в замерах уровней, температуры и отборе проб;
- влияние на измеряемые показатели объектов техногенной нагрузки;
- расположение точек мониторинга относительно друг друга и источников техногенного воздействия;
- природные факторы.

Исходя из этих характеристик, можно говорить о нестационарных или стационарных гидродинамических, гидрохимических и температурных условиях объекта. В первом случае - достаточно ли информативна сеть мониторинга и отображает ли она всю изменчивость природной и техногенной обстановки. Во втором случае, в условиях стабильности, решается вопрос - не являются ли дальнейшие исследования накоплением уже имеющейся информации, а если это так, то насколько можно уменьшить без ущерба для отображения общей обстановки объём наблюдений, а, возможно, и количества наблюдательных скважин, пунктов и точек.

Охарактеризовать сложившуюся ситуацию и дать рекомендации по оптимизации сети мониторинга на горном предприятии (избегая метод проб и ошибок) помогут методы цифровых технологий, основанные на математической статистике.

2.1. Общие положения вероятностно-статистического анализа

Для понимания сущности математико-статистической обработки информации, получаемой при мониторинге, необходимо иметь чёткое представление о смысле основных понятий и терминов теории вероятности, так как математическая статистика в своих теоретических представлениях опирается на законы теории вероятности, которые в свою очередь базируются на ряде аксиом [4].

Аксиомы теории вероятности являются отображением многовекового человеческого опыта. Этот опыт выступает как знание основных свойств относительной частоты случайных событий. Сформированы основные свойства относительной частоты и соответствующие им аксиомы.

Свойство 1. Относительная частота случайного события есть неотрицательное число, лежащее между нулём и единицей. Это свойство следует из того, что случайное событие А в серии из n наблюдений может произойти от 0 до n раз, т.е. для него

$$\frac{0}{n} \le \frac{m}{n} \le \frac{n}{n}.$$

Следовательно, $0 \le P^*(A) \le 1$.

Аксиома 1. Вероятность P(A) случайного события есть неотрицательное число, заключённое между нулём и единицей:

$$0 \le P^*(A) \le 1. \qquad (2.1)$$

Свойство 2. Относительная частота достоверного события равна единице. Это свойство следует из того, что достоверные события будут иметь место в каждом наблюдении, т.е. для него $m=n$.

Аксиома 2. Вероятность достоверного события U равна 1:

$$P(U) = 1. \qquad (2.2)$$

Свойство 3. Относительная частота невозможного события равна 0. Это следует из того, что невозможное событие не произойдёт ни в одном из n наблюдений, т.е. для него $m=0$.

Аксиома 3. Вероятность невозможного события V=0:

$$P(V) = 0 \qquad (2.3)$$

Свойство 4. Относительная частота суммы двух несовместимых событий А и В равна сумме относительных частот этих событий. В самом деле, если

$$P^*(A) = \frac{m}{n} \qquad \text{и} \qquad P^*(B) = \frac{k}{n},$$

то при условии несовместимости событий А и В, события А+В произойдут $m+n$ раз, т.е.

$$P^*(A+B) = \frac{m+k}{n} = \frac{m}{n} + \frac{k}{n}.$$

Аксиома 4. Вероятность суммы двух несовместимых событий (A+B) равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \qquad (2.4)$$

Эти свойства и аксиомы отображают простейшие общие положения вероятностно-статистического анализа и позволяют перейти к более сложным и конкретным характеристикам анализируемых гидрогеологических параметров.

2.2. Энтропия как характеристика фиксируемых при мониторинге показателей

Использование энтропии при обработке показателей мониторинга рассмотрим на примере информации по измерениям уровня подземных вод в гидронаблюдательных скважинах режимной сети на водоносные горизонты. При изучении непрерывной величины (уровня), измеряемой в течение какого-то времени, приходится сталкиваться с различной степенью неоднозначности в оценке результатов наблюдений.

По данным наблюдений уровень подземных вод в скважине А характеризуется десятью значениями на разные периоды времени. Ряд распределения уровня показан в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Ряд распределения уровня

x	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
P_A	30	30,2	30	30	30	30,5	30	30	30,5	30,5

Множество измеренных значений характеризуется некоторым разнообразием, количество которого можно оценить. Так о множестве x_1-x_{10}, содержащих N=10 значений, можно сказать, что оно имеет разнообразие в 3 элемента, поскольку содержит только k=3 различных значений - 30, 30,2, 30,5. Значит, в этом ряду полученных значений уровня подземных вод различным результатам наблюдений будут соответствовать различные вероятности. Следовательно, количество разнообразия множества измеренных значений уровня может быть выражено через количество разнообразия множества вероятностей, сопоставленному множеству значений.

Переход от количества разнообразия множества значений к количеству разнообразия множества вероятностей можно рассмотреть.

Обозначим количество разнообразия через H[x]. Для множества значений случайной величины уровня H[x] можно записать в виде [4-7]

$$\log k = H[x]. \qquad (2.5)$$

Если вероятности P_j каждого из k возможных значений x_i, составляющих разнообразие, равны между собой, то

$$P_i = \frac{1}{k} = P \ . \qquad (2.6)$$

Отсюда

$$k = \frac{1}{P} \ . \qquad (2.7)$$

Тогда

$$H[x_i] = \log k = \log \frac{1}{P} = -\log P \, . \qquad (2.8)$$

Значит, если вероятности возможных значений случайной величины равны между собой, то среднее количество разнообразия, приходящееся на одно значение, будет равно

$$H[x_i] = \frac{H[x]}{k} = -\frac{\log P}{\frac{1}{P}} = -P \log P \, . \qquad (2.9)$$

По аналогии с (2.9) для случая, когда вероятности Pj не равны между собой, количество разнообразия, приходящееся на одно значение x_j, составит:

$$H[x_i] = -P_i \log P_i \, , \qquad (2.10)$$

а общее количество разнообразия множества значений случайной величины, выраженное через разнообразие множества, будет равно:

$$H[x \ ] = -\sum_{i=1}^{k} P_i \log P_i \, . \qquad (2.11)$$

Эта величина называется энтропией.

Следует иметь в виду, что при вычислении энтропии сумма вероятностей Pi в формуле (2.11) должна быть обязательно равна 1, т.е.

$$\sum_{i=1}^{k} P_i = 1 \, .$$

На непрерывные случайные величины, к которым относится уровень подземных вод в скважине, понятие энтропии, вычисленной по формуле (2.11), непосредственно не распространяется, так как число возможных значений бесконечно. Для обоснования применимости энтропии при анализе

изменения уровня подземных вод воспользуемся суждением авторов в выше приведенной литературе. Предложенный подход позволяет утверждать, что измерение уровня подземных вод, как непрерывной величины, например, с точностью до 1 мм практически неосуществимо и сопоставить два значения уровня, отличающиеся друг от друга на 1 мм, не реально. Следовательно, непрерывную случайную величину, в данном случае уровень подземных вод, можно описать как дискретную, считая равными (совпадающими) те значения, которые различаются меньше, чем на величину погрешности Δx определения значений уровня. Вероятности попадания значений уровня подземных вод в интервал Δx, очевидно, будут равны $f(xi)\,\Delta x$ [1 - 4].

При величине погрешности Δx измеренные значения X уровня подземных вод делятся на k интервалов возможных значений параметров шириной $\triangle x$ каждый. Доказано, что при уменьшении точности измерения параметров в c раз энтропия по этому параметру уменьшается на величину $ln\ c$.

$$H'[x] = H[x] - \ln c, \qquad (2.12)$$

где $H'[x]$ - энтропия уровня при величине погрешности $c\ \triangle x$;

$H[x]$ - энтропия уровня при величине погрешности $\triangle x$.

Из (2.12) следует, что изменение точности измерения значений параметра (в нашем случае уровня) равносильно перемещению начала отсчёта энтропии. Можно утверждать, что разнообразие по значениям непрерывного параметра X выступает как характеристика, определённым образом зависящая от погрешности измерения значений параметра.

Другими словами, энтропия отображает то свойство действительности, что любой реальный объект обладает бесконечно большим, неисчерпаемым разнообразием, но в силу ограниченности (в каждый данный момент времени) познавательных возможностей исследователя выступает для него как обладающий конечным разнообразием.

2.2.1. Критерий достаточности имеющегося объёма информации

Задачу определения объёма наблюдений в режимной сети наблюдательных скважин, необходимого для изучения свойств водоносного горизонта, можно решить с помощью энтропии. Используя энтропию для анализа изменения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах, следует иметь в виду, что фактически всегда располагают не самим значением энтропии $H[x]$, а её оценкой $H[x]n$ по некоторому количеству наблюдений, объём которых равен n. Эта оценка связана с $H[x]$ соотношением: $H[x] = \lim H[x]_n$ при $n \to \infty$ и называется выборочной энтропией. Если некоторый параметр X (уровень водоносного горизонта в скважине) измерен n раз и известно, что погрешность выполненных

наблюдений равна Δx, то выборочная энтропия $H[x]_n$ может быть вычислена по формуле [4-7]:

$$H[x]_n = -\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n} \ ,$$

где n_i- число наблюдений, принадлежащих i интервалу;

k- число интервалов (каждый шириной Δx).

Выборочная энтропия служит оценкой разнообразия, если наблюдения достаточно равномерно расположены по времени (площади, объёму) и, если число выполненных наблюдений достаточно велико. При малом числе наблюдений выборочная энтропия оказывается сильно заниженной по сравнению с общей энтропией, но по мере роста числа наблюдений разность между H[x] и $H[x]_n$ стремится к нулю, т.е.

$$\lim_{n\to\infty} \{H[x] - H[x]_n \} = 0 . \qquad (2.13)$$

Если исследуется уровень подземных вод в скважине по совокупности наблюдаемых значений и его разнообразие по параметру H, то необходимо, чтобы величина разнообразия $H[x]_n$ этой совокупности должна быть сравнима с H[x]. При каком-то числе наблюдений n максимальное разнообразие $H[x]_n$ совокупности наблюдаемых значений уровня достигается, если все n наблюдений приведут к получению значений уровня, принадлежащего к различным интервалам области его изменения. В этих условиях энтропия совокупности наблюдаемых значений уровня будет $H[x]_n = \ln n$. Во всех остальных случаях $H[x]_n$ будет меньше ln n.

Следовательно, для выборочной энтропии справедливо неравенство

$$H[x]_n \le \ln n. \qquad (2.14)$$

Поэтому при небольшом объёме наблюдений, пока число n при различных значениях уровня будет мало, всегда должно выполняться неравенство $H[x]_n < H[x]$. С другой стороны, поскольку $H[x]_n$ является оценкой H[x], обладающей тем свойством, что по мере роста n различие уменьшается, то и при малых n выборочная энтропия, оставаясь меньшей H[x], должна стремиться к H[x], т.е. должна систематически расти.

Когда разнообразие совокупности наблюдений за уровнем в скважине достигает разнообразия, свойственного изучаемому уровню, систематический рост выборочной энтропии $H[x]_n$ прекратится, и она станет случайным образом колебаться близ уровня, отвечающего энтропии H[x], являющегося мерой разнообразия уровня в водоносном горизонте в точке заложения скважины. Произойдёт стабилизация энтропии $H[x]_n$ совокупности наблюдаемых значений уровня.

По-видимому, должно существовать какое-то значение $n_{пред}$ (в дальнейшем именуемое оптимальным объёмом наблюдений), такое, что при $n<n_{пред}$ выборочная энтропия $H[x]_n$ имеет тенденцию к росту по мере увеличения n, а при $n>n_{пред}$ выборочная энтропия колеблется вблизи значения, отвечающего энтропии H[x] уровня воды в скважине водоносного горизонта.

Иначе, при достаточно длительных режимных наблюдениях по скважинам можно найти количество наблюдений, именуемое оптимальным числом наблюдений, после которого замеры уровня приведут только к накоплению многократно повторяющейся уже имеющейся информации, не указывающее на какое-то дополнительное изменение в состоянии водоносного горизонта.

Обычно определённый период времени изменению уровней в скважине присуща некоторая закономерность (например, подъём уровней подземных вод при вводе в эксплуатацию хвостохранилища, их падение при прекращении сброса технических вод в пруд - накопитель). Другими словами, мы имеем дело с выраженным линейным трендом, и увеличение количества наблюдений совпадает с направлением тренда. Это приводит к тому, что каждое последующее наблюдение за уровнем по сравнению с предыдущим будет попадать в зону всё более высоких или всё более низких значений уровня, размах совокупности наблюдаемых значений будет возрастать, что приведёт к постепенному возрастанию энтропии $H[x]_n$. Поэтому, какое бы большое количество замеров не было бы произведено на скважине, стабилизации энтропии $H[x]_n$ не произойдёт.

Или, если первоначальным наблюдениям присуща особенно большая изменчивость уровней, а последующему периоду наблюдения отвечают всё более постоянные значения, то в этом примере прирост объёма наблюдений совпадает с направлением уменьшения изменчивости уровня. Значит, вскоре, после ввода некоторого количества информации, энтропия $H[x]_n$ совокупности наблюдаемого уровня достигнет максимума, а затем начнёт систематически уменьшаться.

Ни в первом, ни во втором случае стабилизация энтропии $H[x]_n$ не произойдёт. Но поскольку отсутствие стабилизации, в конечном счете, связано не с самим по себе закономерным характером изменения уровня в процессе наращивания наблюдений (хотя и это возможно), а с наличием определённого соотношения между временем наблюдения и направлением развития уровня, то в случае достаточной изученности уровня в скважине получить график со стабилизировавшейся энтропией всё-таки можно. Для этого нужно изменить сложившиеся «неудачные» соотношения между временным порядком замеров уровней в наблюдательной скважине, для чего необходимо вместо действительной последовательности наблюдаемых

значений рассмотреть некоторую случайную последовательность, в которой указанное «неудачное» соотношение устранено.

Если изученность уровня достаточна, то уже при первых попытках имитировать иной временной порядок в замерах уровней получим график со стабилизировавшейся энтропией, если же изученность уровня подземных вод недостаточна, то, сколько бы случайных последовательностей ни перебрали, графики со стабилизирующейся энтропией получить не удастся.

Исследования показали, что достаточно большое значение $P>0,99$ вероятности попадания случайной последовательности со стабилизировавшейся энтропией обеспечивается при $N\geq7$ [4-7]. Поэтому разумно принять $N_{кр}=7$ и считать, что если из семи случайных последовательностей ни одна не привела к графику со стабилизировавшейся энтропией, то уровенный режим в скважине изучен недостаточно.

Основываясь на приведенном обосновании, можно найти максимальное число скважин с достаточно изученными гидродинамическими характеристиками и владеющими избытком информации, выделить их в определённую систему и дать рекомендации по сокращению количества наблюдений в режимной сети, или, при определённых условиях, возможно, и консервации некоторых скважин.

Для реализации этого подхода была разработана комплексная компьютерная программа для определения общей и выборочной энтропии на основе Microsoft Excel на языке Visual Besic for Applications, позволяющая определить оптимальное число натурных наблюдений для каждой конкретной скважины режимной сети.

В программе были реализованы шаги, начиная от представления данных, перевода их в нужный формат, правки, группировки, сортировки, графической интерпретации полученных результатов, подготовки программ обработки, задания параметров анализа и просмотра результатов. Используя программу математической статистики, затрачивается минимальное количество времени, чтобы любые объёмы информации мгновенно преобразовывались, обрабатывались и появлялись на экране в виде графиков, диаграмм и таблиц.

В качестве примера рассмотрим информацию об изменении уровней подземных вод в наблюдательных скважинах на одном из горных предприятий (табл. 2.2). В процессе расчёта анализировались 7 случайных последовательностей изменения уровня (для каждого случая формируется своя таблица случайной последовательности), и в качестве результата каждый раз вычисляется общая и выборочная энтропия. По результатам каждого вычисления строился график зависимости выборочной энтропии в случайной последовательности от общего количества замеров уровня подземных вод на скважине. Если общая и выборочная энтропии на графиках

Таблица 2.2 - Расчёт энтропии

Номер замера уровня подземных вод	Уровень подземных вод в скважине	Номер класса	Выборочная энтропия	Приведенная дисперсия для выборочной энтропии	Нижний предел количества определений	Верхний предел количества определений	Количество необходимых определений				Общая энтропия
1	2	3	4	5	6	7	8	9			10
1	72,19	2	0	0	1	0	1	Количество наблюдений		27	1,97
2	72,19	2	0	0	1	0	1	Мин. значение уровня		72,12	1,97
3	72,27	4	0,637	0,107	2	11	13	Макс. значение уровня		72,68	1,97
4	72,29	5	1,04	0,12	3	12	15	Количество классов (k)		14	1,97
5	72,4	7	1,332	0,115	3	12	15	Шаг разбивки (Δx) равен		0,04	1,97
6	72,59	2	1,561	0,107	5	11	16				1,97
7	72,68	2	1,55	0,118	5	12	17	Интервал	Количество	Частота	1,97
8	72,46	9	1,733	0,12	6	12	18		в классе		1,97
9	72,51	10	1,889	0,119	7	12	19	72.12 - 72.16	1	0,037	1,97
10	72,31	5	1,887	0,115	7	12	19	72.16 - 72.20	7	0,259	1,97
11	72,19	2	1,846	0,2	6	20	26	72.20 - 72.24	5	0,185	1,97
12	72,19	2	1,792	0,32	6	32	38	72 24 - 72.28	5	0,185	1,97
13	72,2	2	1,733	0,451	6	45	51	72.28- 72.32	3	0,111	1,97

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9			10
14	72,21	3	1,866	0,465	7	47	54	72.32 - 72.36	0	0	1,97
15	72,25	4	1,894	0,393	7	39	46	72.36 - 72.40	2	0,074	1,97
16	72,17	2	1,841	0,516	6	52	58	72 40 - 72.44	0	0	1,97
17	72,18	2	1,787	0,635	6	63	69	72.44 - 72.48	1	0,037	1,97
18	72,22	3	1,826	0,552	6	55	61	72.48 - 72.52	1	0,037	1,97
19	72,31	5	1,835	0,507	6	51	57	72.52 - 72.56	0	0	1,97
20	72,38	7	1,873	0,437	7	44	51	72.56 - 72.60	2	0,074	1,97
21	72,24	3	1,884	0,397	7	40	47	72.60 - 72.64	0	0	1,97
22	72,12	1	1,983	0,438	7	44	51	72.64 - 72.68	0	0	1,97
23	72,25	4	1,993	0,403	7	40	47				1,97
24	72,25	4	1,989	0,393	7	39	46	Общая энтропия равна		1,97	1,97
25	72,22	3	1,988	0,381	7	38	45				1,97
26	72,25	4	1,978	0,388	7	39	46	Дисперсия энтропии равна		0,015	1,97
27	72,22	3	1,97	0,39	7	39	46				1,97

на каком-то из замеров совпали, и в дальнейшем выборочная энтропия колеблется вокруг значений общей энтропии, то можно говорить о достаточности изученности уровня подземных вод в этой скважине. Момент совпадения этих двух значений и даст оптимальное число наблюдений для конкретной скважины.

Опираясь на имеющиеся аналитические выводы для оптимизации числа наблюдений по величине энтропии и определения времени её стабилизации, анализировались наблюдательные скважины режимной сети горного предприятия. Скважины сооружены на два водоносных горизонта. Для анализа выбраны 25 скважин на четвертичный и 32 на неогеновый водоносные горизонты.

Из 25 скважин на четвертичный и 32 на неогеновый водоносные горизонты, в которых рассчитывалась выборочная энтропия, её стабильные значения получены в 22 и 9 случаях соответственно (табл. 2.3 и 2.4). По выполненным расчётам по всем скважинам построены графики, показывающие, как изменялись значения выборочной энтропии и при каком количестве наблюдений на каждой конкретной скважине наступила её стабилизация. Наиболее характерные примеры показаны на рис. 2.1-2.5.

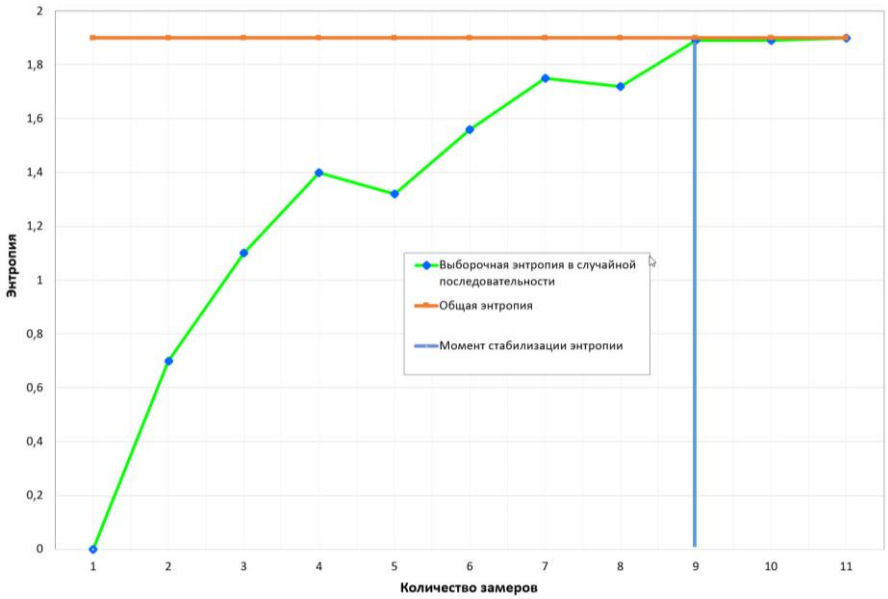


Рисунок 2.1. Изменение энтропии в случайной последовательности по скважине 21

Таблица 2.3 - Результаты компьютерной обработки исходной информации

Водоносный горизонт	Кол-во построенных графиков колебания уровня подземных вод	Кол-во выполненных расчётов энтропии	Кол-во скв., в которых энтропия стабилизировалась	Количество скважин со стабилизировавшейся энтропией по годам наблюдений								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
Четвертичный	4	3	3		1		2					
	20	8	7			1		4			1	1
	28	14	12	1		1	2	4	1	3		
Неогеновый	14	7	4		1	1		2				
	56	25	5					3	2			

Таблица 2.4 - Время стабилизации энтропии в исследуемых скважинах

Водоносный	Номера скважин по времени наступления оптимального числа наблюдений								
горизонт	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Четвертичный		скв.43		скв.47 скв.40					
			скв.46		скв.49 скв.50 скв.36 скв.39			скв.41	скв.42
	скв.44		скв.34	скв.60 скв.48	скв.37 скв.72 скв.38 скв.70	скв.71	скв.80 скв.81 скв.82		
Неогеновый		скв.45	скв.35		скв.83 скв.84				
					скв.85 скв.86 скв.21	скв.87 скв.88			

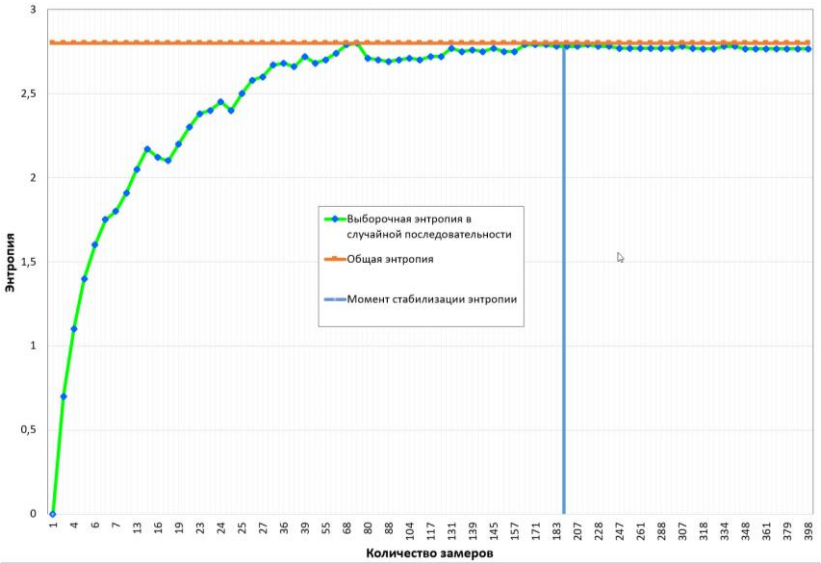


Рисунок 2.2. Изменение энтропии в случайной последовательности по скважине 44

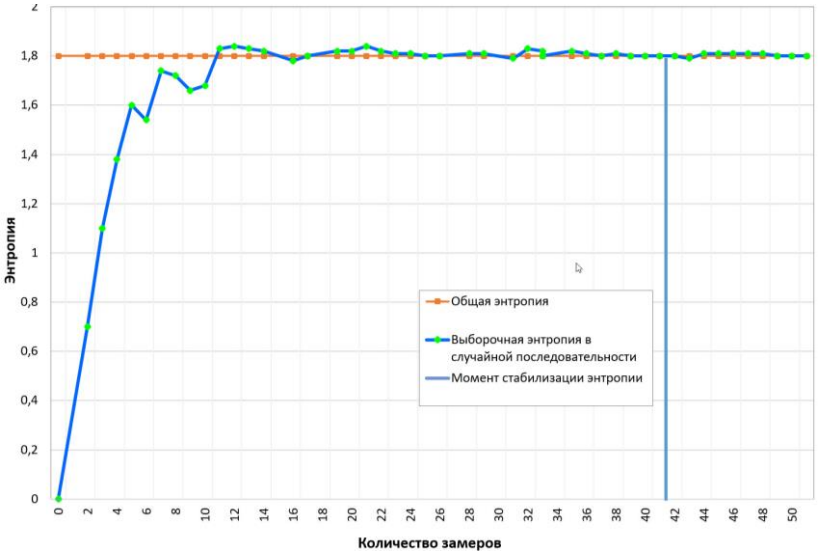


Рисунок 2.3. Изменение энтропии в случайной последовательности по скважине 43

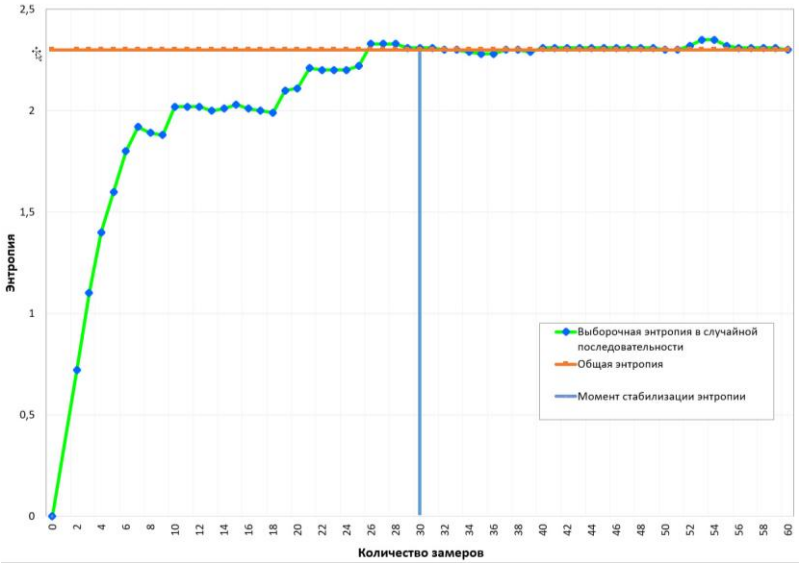


Рисунок 2.4. Изменение энтропии в случайной последовательности по скважине 34

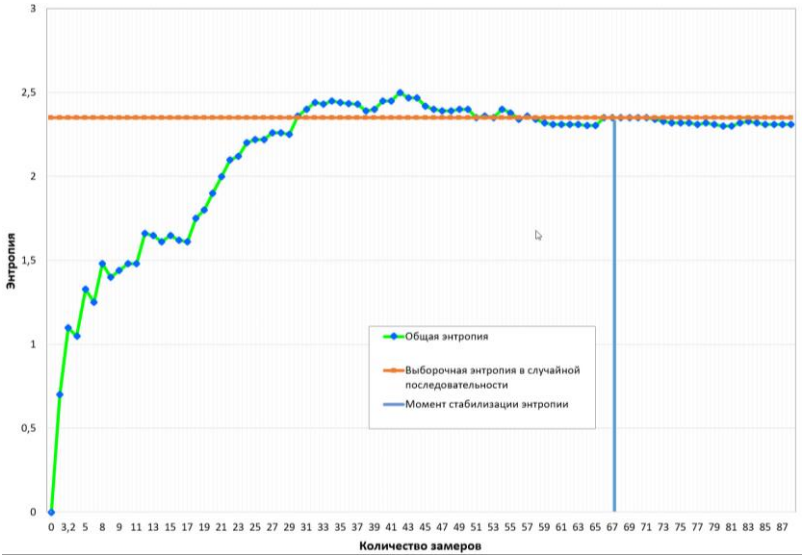


Рисунок 2.5. Изменение энтропии в случайной последовательности по скважине 80

Из рисунков следует, что для каждой скважины количество замеров существенно разнится и зависит от меры изменчивости наблюдаемых уровней. Поэтому в одном случае стабилизация энтропии поступила уже на 9 замере уровня (см. рис. 2.1), а в другом только на 200 (см. рис.2.2). Графики дают возможность определить не только момент стабилизации энтропии - оптимальное число наблюдений на скважине, но и насколько та или иная скважина владеет переизбытком информации. Так, на скв.43 (см. рис. 2.3) после 27 замеров уровней из имеющихся 51 идёт простое накопление уже имеющейся информации, не приводящее ни к какому новому качественному результату, на скв.34 (см. рис. 2.4) полным объёмом информации по уровням обладают первые 30 замеров из 60, на скв.80 (см. рис. 2.5) - 67 замеров из 88.

В каком году на наблюдательных скважинах был получен оптимальный объём наблюдений, необходимый для полной гидродинамической характеристики водоносного горизонта в этой точке, показано в таблице 2.4. Из таблицы видно, что большинство исследуемых скважин после 5-ти лет наблюдений теряют свою информативную ценность в силу многократно повторяющейся информации, и только некоторые из них продолжают накапливать новые данные о водоносных горизонтах в последующие годы (их оптимальное число наблюдений приходится на другое время).

Используя метод математической статистики, приходим к выводу, что из всех скважин режимной сети на четвертичный и на неогеновый водоносные горизонты соответственно по 22 и 9 скважинам получен объём наблюдений $n_{пред}$, по которому дальнейшее приращение информации становится практически не обязательным. Объём наблюдений, равный $n_{пред}$, включает в себя всю информацию, которую можно получить по водоносному горизонту, поэтому можно говорить о резком сокращении наблюдений на этих скважинах.

Такие скважины в дальнейшем будут именоваться стабильными, все остальные скважины режимной сети – нестабильными.

2.2.2. Оптимизация количества наблюдательных скважин

Полученную информацию по изменению энтропии следует использовать при построении карт гидроизогипс. Анализ карт выполнялся в следующей последовательности.

Вначале была построена карта гидроизогипс грунтовых вод по 16 скважинам, в которых выявлена стабилизация энтропии. Затем, постоянно уменьшая количество наблюдательных скважин и выбирая различные комбинации их размещения, было установлено, что карта гидроизогипс на это же время по 12 стабильным скважинам является информативной при

минимуме наблюдательных скважин. Это минимальное количество скважин, которое способно отобразить общую гидрогеологическую картину района при сохраняющейся техногенной нагрузке.

Такое же моделирование было выполнено на другие периоды времени. Из анализа построенных карт следовало, что использование информации только по стабильным скважинам позволяет сокращать количество наблюдательных скважин на четвертичный водоносный горизонт на 4 скважины и резко снизить объём наблюдений по 12 скважинам. Количество замеров может быть уменьшено до четырёх раз в год.

Теперь рассмотрим вариант оптимизации количества скважин, используя всю имеющуюся информацию по уровням грунтовых вод. Этот вариант схемы сокращения количества наблюдательных скважин предполагает использование для отображения гидродинамической картины как стабильных, так и нестабильных скважин.

На первый период времени, уменьшая количество наблюдательных скважин и рассматривая различные комбинации их размещения, получена карта гидроизогипс по 28 скважинам режимной сети. Эта карта характеризовалась минимальными неувязками. Можно не использовать наблюдения по 7 скважинам.

Анализ карт на второй период времени показал, что из сети наблюдательных скважин можно исключить 8 скважин. По остальным 13 стабильным скважинам следует резко уменьшить объём наблюдений. В полном объёме проводить мониторинг следует только по 8 скважинам.

В табл. 2.5 перечислены скважины по всем трём категориям.

Таблица 2.5 - Перечень скважин по категориям предполагаемых работ (четвертичный водоносный горизонт)

Категория работ	№№ скважин
Скважины, подлежащие сокращению	43, 50, 49, 34, 48, 80, 70, 72
Скважины, по которым объем получаемой информации должен быть сокращен	47, 40, 46, 36, 39, 41, 44, 60, 37, 38, 71, 81, 82
Скважины, по которым информация должна накапливаться в регламентированном режиме	102, 110, 98, 91, 140, 141, 99, 180

На окончательном этапе имитационного моделирования с исключением наблюдательных скважин, имеющих стабильную информативность, целесообразно для оптимальных вариантов сети мониторинга выполнить анализ размещения скважин в пространстве в увязке с природными и производственными объектами.

Очевидно, что по данной методике может быть обработана информация и по мониторингу качественного состава подземных вод.

ГЛАВА5

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ СООРУЖЕНИЯ СКВАЖИН ДЛЯ ОСУШЕНИЯ ПОРОД

В земной коре подземные воды накапливаются в порах осадочной толщи и трещинах горных пород, там же сосредоточен основной объём месторождений полезных ископаемых (МПИ). Крупнейшими разработчиками руд чёрных и цветных металлов, угля являются Китай, США, Канада, Австралия, Бразилия, Россия, Чили, ЮАР. По данным [149, 150] основной объём добычи многих полезных ископаемых ведётся открытым способом. Для защиты от обводнения используются различные способы осушения [50, 80, 81, 151, 152, 153], основанные на применении дренажных скважин.

Благодаря творческой, долговременной, целенаправленной работе большого количества специализированных организаций, их коллективов к настоящему времени создана материальная база по сооружению скважин для отбора подземных вод:

- научные исследования и методики расчётов любых видов дренажных устройств в широком спектре гидрогеологических условий;

- техника и технология для решения инженерных задач по сооружению любых типов скважин и других дренажных устройств, а также противофильтрационных завес.

Благодаря созданию в России комплекса, включающего научные, проектные, производственные объединения, производящие технику и выполняющие строительно-монтажные работы, успешно решены задачи по защите от обводнения месторождений КМА, залегающих в сложных гидрогеологических условиях. То же касается и месторождений северного Казахстана (Качарский, Соколово-Сарбайский, Донской ГОКи), Кривого Рога, Южно-Белозёрского ЖРК, Полтавского и других ГОКов в Украине.

В настоящем разделе подробно изложены результаты исследований, выполненных в ВИОГЕМе, в области создания принципиально новых технических средств и технологий по сооружению горизонтальных, восстающих, наклонно-восстающих скважин, сооружаемых из шахтных стволов, с уступов бортов карьеров, из подземных горных выработок в широком спектре гидрогеологических условий с напорами на устье до 750 м вод. столба (75 атм.), скважин горизонтально-направленного бурения (ГНБ).

5.1.Особенности технологии вскрытия водоносных горизонтов вертикальными скважинами

Дренажные скважины являются сложными сооружениями, основными узлами которых являются: обсадные колонны, фильтровая колонна, погружной насос (водоподъёмное оборудование), станция управления работой насоса, устьевое оборудование.

Около 80 % дренажных скважин сооружается на водоносные горизонты, представленные песками разного гранулометрического состава [154, 155]. Проходка таких скважин из-за неустойчивости пород возможна либо под защитой обсадных колонн (ударно-канатное бурение), либо под защитой столба промывочной жидкости, с помощью которого достигается удержание стенок скважины от обрушения. На этом принципе разработаны все способы вращательного бурения.

Наиболее распространенными технологиями бурения в настоящее время является вращательная, ударная и комбинированная [50, 81, 154, 156, 157, 158]. Каждая из них применяется в соответствующих гидрогеологических условиях для решения конкретных задач. Выбор того или иного способа определяется в основном скоростью бурения и стоимостью сооружения скважин в сравнимых условиях. Однако такой подход без учёта изменения проницаемости прифильтровой зоны пласта, обусловленного процессом бурения, не всегда оправдан. Более правильным технико-экономическим показателем при выборе того или иного способа бурения следует считать стоимость одного кубометра добываемой руды, в которую входят в том числе и затраты на бурение скважин.

В технической литературе наиболее широко освещены проблемы разработки и создания техники и технологии бурения вертикальных скважин на воду, сооружаемых с поверхности. Основной объем работ в данном направлении проведен в 60-70 годах XX столетия и касались они очень важных для отрасли проблем, направленных на повышение производительности буровых работ, сохранение проницаемости водоносных горизонтов при их вскрытии, разработки новых методов и технологий бурения, создания высокоэффективных, долговечных фильтров, насосного оборудования. На основе анализа литературных данных рассмотрим основные преимущества и недостатки каждого способа и области их применения, особенно в части бурения дренажных скважин.

Ударно-канатный способ бурения имел довольно широкое распространение при сооружении скважин на воду. В последние годы он стал вытесняться вращательным способом, однако до настоящего времени находит еще применение благодаря следующим его достоинствам:

1. Относительно невысокой степени изменения порового

пространства прифильтровой зоны продуктами бурения.

2. Увеличению проницаемости песков приствольной зоны в результате их разрыхления желонированием: количество песка, выбранного желонкой, всегда больше, чем объём ствола в пределах продуктивного пласта.

3. Возможности опробования каждого вскрытого водоносного горизонта в процессе бурения.

4. Возможности начинать откачку с малых понижений, формируя тем самым естественный фильтр и др.

Эти преимущества ударно-канатного способа бурения реализуются при наличии следующих условий:

а) породы водоносного горизонта однородны по всему разрезу или же в верхней части они более проницаемы, чем в нижней и не имеют глинистых прослоев;

б) породы кровли продуктивного пласта плотные, не подверженные обвалам и оплыванию.

В природе нередко встречаются условия, когда при бурении из верхней части пласта в нижнюю перемещаются непроницаемые породы кровли, мелкие фракции песка, шлама и т.п.; в результате вокруг фильтра образуется оболочка, проницаемость которой намного ниже, чем у окружающих песков, что приводит в итоге к резкому снижению водопритока к скважине. В таких условиях ударное бурение нерационально.

При оценке ударно-канатного способа бурения по сравнению с вращательным следует учесть, что конструкции скважин из-за малого выхода обсадных колонн довольно металлоёмкие, скорости бурения невелики, а поэтому стоимости сооружения скважин получаются высокими. Целесообразная глубина бурения данным способом ограничена и составляет 130-150 м.

Применение ударного способа бурения скважин на воду эффективно при учёте следующих условий:

1. Глубина бурения до 150 м.
2. Наличие устойчивых пород в кровле водоносного горизонта.
3. Состав пород водоносного пласта однородный, без прослоев глин и пород, способных оплывать и кольматировать прифильтровую зону. При разнозернистых породах величина зёрен должна уменьшаться по направлению от кровли пласта к почве.
4. Наличие валунно-галечных отложений.
5. Сооружение скважин в районе с недостаточно изученными гидрогеологическими условиями и необходимости раздельного опробования водоносных горизонтов в процессе бурения.
6. В районах, где нерациональна и затруднительна доставка воды и

глин для приготовления промывочной жидкости.

Вращательный способ бурения является наиболее распространённым при сооружении скважин на воду. Он применяется с прямой циркуляцией различных буровых растворов, а также с прямой и обратной промывкой чистой водой. В настоящее время более 90 % всех скважин на воду бурится вращательным способом [81, 158]. Такое широкое распространение он получил благодаря следующим достоинствам:

1. Высокие скорости бурения, малый расход обсадных труб и, как следствие, более низкая стоимость сооружения скважины.
2. Возможность сооружения скважин на большие глубины.
3. Получение удовлетворительных результатов при применении прогрессивных технологий бурения и методов разглинизации призабойной зоны скважины.

Основным недостатком вращательного способа бурения, по мнению ведущих специалистов [158, 159, 160], является отрицательное влияние промывочной жидкости либо на проницаемость пласта в прифильтровой зоне (в случае применения в качестве промывочной жидкости глинистого раствора), либо нарушения устойчивости стенок скважины в случае применения в качестве промывочной жидкости чистой воды.

Для разработки мероприятий по снижению влияния промывочных агентов на проницаемость пласта важно понять механизм взаимодействия между раствором и пластом и на основе этого установить возможные границы, в которых происходит это взаимодействие, и ограничить область применения вращательного способа бурения с использованием в качестве промывочного агента глинистого раствора. Вопросам взаимодействия различных промывочных агентов с водоносными горизонтами посвящено большое количество работ [161-181].

В настоящее время в качестве промывочных агентов при бурении используются глинистые, карбонатные растворы; вода; растворы, обработанные ПАВ, полимерами; пены; растворы на нефтяной основе, инвертные эмульсии и др.

Для составления целостной картины и происходящих процессов в прифильтровой зоне был произведен анализ ряда публикаций, в которых наиболее чётко изложена концепция автора по данной проблеме. Основную кольматацию прифильтровой зоны производит не сам раствор, а его фильтрат, который проникает в пласт на значительную глубину [162]. Последняя зависит от перепада давления, проницаемости пласта и времени контакта промывочной жидкости с ним. При прочих равных условиях глубина проникновения фильтрата тем меньше, чем ниже водоотдача бурового раствора. Проникая в пласт, фильтрат снижает его проницаемость из-за:

1) набухания глинистых частиц, содержащихся в породах водоносного горизонта;

2) образования в поровом пространстве нерастворимых осадков в результате взаимодействия фильтрата и пластовой жидкости;

3) закупоривания пор тонкими частицами твёрдой фазы, проникающими в пласт вместе с фильтратом.

Глинистые растворы обеспечивают нормальные условия бурения, но не отвечают требованиям сохранения проницаемости прифильтровой зоны. Глубина проникновения самого раствора в песчаный пласт определяется по формуле [175]:

$$l = K\frac{d \cdot P}{G} \qquad (5.1)$$

где l – глубина проникновения глинистого раствора в пласт, мм;

K – коэффициент, зависящий от величины и формы частиц, слагающих породу; по материалам АЗНИИ для однородных пород K=0,146 – 0,154;

P – разность давлений между столбом глинистого раствора в скважине и напором пласта, кг/см^2;

d –диаметр зёрен породы, мм;

G –статическое напряжение сдвига бурового раствора, мг/см^2.

Анализ этой формулы показывает, что глубина проникновения раствора в пласт незначительная; она тем ниже, чем меньше диаметр частиц песка, перепад давления между гидростатическим и пластовым напорами и чем выше статическое напряжение сдвига раствора. При прочих равных условиях бурение в песках должно осуществляться растворами с высокой структурной прочностью.

Степень кольматации возрастает с увеличением исходной проницаемости пласта.

Считается, что глубина проникновения глинистого раствора в мелкозернистые пески составляет до 10 мм, а в крупнозернистые достигает до 1м. Она наиболее интенсивна в начальный период вскрытия пласта в течение первых 15-ти минут и растёт в среднем на 8-12 % при увеличении перепада давления до 25 кг/см^2 между скважиной и пластом. При перепадах более 40 кг/см^2 этот рост прекращается. Обработка растворов химическими реагентами во всех случаях вызывает некоторое уменьшение степени кольматации.

Для изучения структуры прифильтровой зоны в институте ВИОГЕМ были проведены исследования, сущность которых сводилась к отбору проб из стенок пробуренной скважины с помощью специально сконструированного пробоотборника [182]. Диаметр отбираемых проб 78 мм, глубина отбора - 340 мм. Пробоотборник состоит (рис. 5.1.) из корпуса,

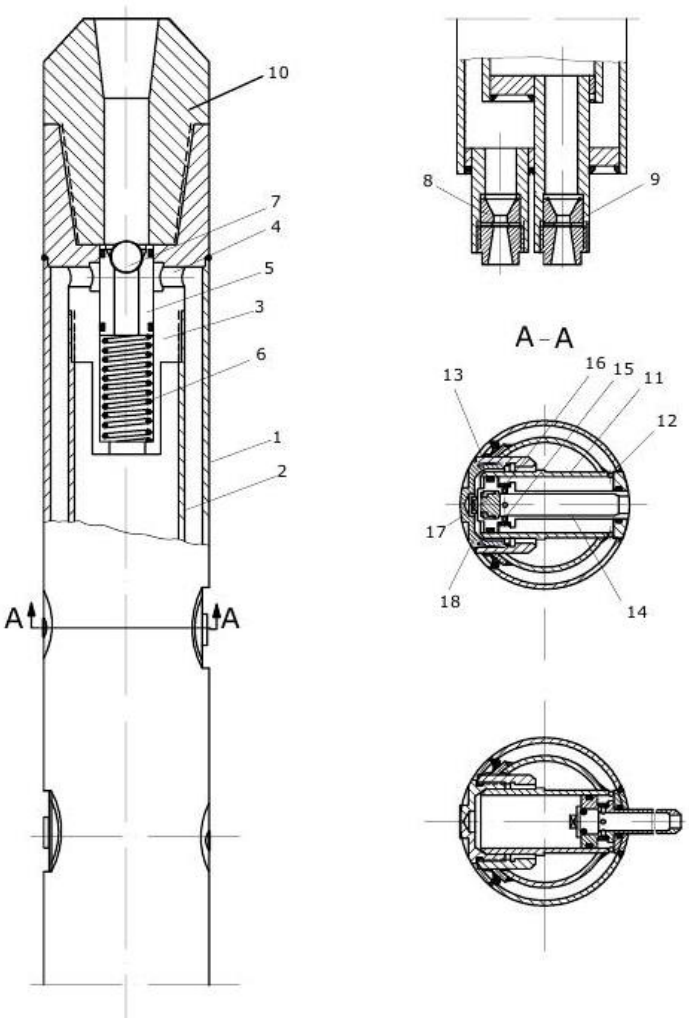


Рис. 5.1. Пробоотборник

выполненного из труб 1 и 2, концентрично расположенных одна в другой, гидрораспределительного, дроссельного устройства и двенадцати

пробоотборных узлов, размещённых в одной плоскости через 0,5 м друг от друга по длине корпуса.

Гидрораспределительное устройство включает корпус 3, герметично связанный с трубами 1, 2 и имеющий боковые отверстия 4, золотник 5 с клапанным седлом, пружину 6 и шаровой клапан 7.

Дроссельный узел состоит из насадок 8 и 9, соединённых соответственно с кольцевым пространством корпуса и внутренней полостью трубы 2. Насадки необходимы для создания требуемого перепада давления между внутренним пространством и скважиной.

Пробоотборный узел выполнен из цилиндра 11, имеющего отверстия 12, соединяющие внутреннюю его полость с кольцевым пространством труб 1 и 2 и герметично связанного с ними одним концом; керноотборника 14 и крышки 18, которая ввертывается во втулку 13, связанную с корпусом. Керноотборник 14 герметично закрывается с одного конца заглушкой 17 и имеет отверстия 15, перекрываемые резиновым кольцевым клапаном 16.

Работает пробоотборник следующим образом. При подаче жидкости во внутреннюю полость трубы 2 на насадке 9 создаётся перепад давления, зависящий от её диаметров и расхода жидкости через неё. Такой же перепад создаётся между отмеченной полостью и скважиной. При этом жидкость, проходя по клапанам и кольцевому зазору между деталями 11, 13, 18 давит на керноотборник 14, который выдвигается из цилиндров 11 и врезается в породы стенок ствола. В процессе заполнения керноотборника породой жидкость, находящаяся в нём, через отверстия 15 и 12 поступает в кольцевое пространство корпуса, а оттуда через насадку 8 перетекает в скважину. Благодаря этому проба, находящаяся в керноотборнике, не сминается и не разрушается. После выдвижения керноотборников на величину их хода промывка выключается, в пробоотборник забрасывается шаровой клапан 7 и снова включается циркуляция жидкости. Последняя под давлением перемещает золотник 5 в нижнее положение. Отверстия 4 открываются, и весь поток её поступает в кольцевое пространство, а оттуда через насадку 8 она и стекает в скважину. При этом на насадке создаётся перепад давления; такой перепад получается между внутренней полостью трубы 2 и кольцевым пространством. Благодаря ему керноотборники 14 вместе с пробами возвращаются в исходное положение. При этом выдавливание проб из керноотборника исключено, т.к. отверстия 15 перекрываются резиновыми кольцевыми клапанами 16. Жидкость, находящаяся в цилиндрах 11 между крышками 18 и керноотборником 14, при возвращении последних в исходное положение по каналам и зазорам между деталями 11, 13, 18 выдавливается во внутреннюю полость трубы 2, а оттуда она стекает в скважину через насадку 9. После возвращения керноотборников в исходное положение

пробоотборник из скважины поднимается и разбирается с целью извлечения отобранных проб.

Кольматирующее воздействие глинистого раствора на водоносный горизонт, сложенный песками мелко-среднезернистого состава, определялось в экспериментальной скважине, специально пробуренной для этих целей в Белгородской области на одном из водозаборов. В качестве бурового агрегата использовался станок УРБ-3АМ в комплекте с промывочным насосом 11ГрБ. Бурение после установки направления осуществляется долотом диаметром 560 мм с промывкой глинистым раствором, имевшим следующие параметры: удельный вес γ=1,2 г/см^3, вязкость Т=26 сек, водоотдача В=10-12 см^3/ 30 мин, корка К=1,5+ 2 мм, содержание песка П=4 %. Сеноман-альбский водоносный горизонт был вскрыт не на всю мощность, а лишь в интервале 21-32,4 м. При подходе к конечной глубине параметры глинистого раствора изменились и имели следующие значения: γ=1,33 г/см^3, Т=29 сек, В=15 см^3/ 30 мин, К=2,5+ 3 мм, П=22 %. По окончании бурения из стенок ствола в интервале песков отбирались пробы разработанным пробоотборником (см. рис. 5.1). Отбор проб производился трижды из одного и того же интервала. Первый раз – сразу же после вскрытия водоносного пласта, второй раз – через 1,5 суток и третий раз – через 3 суток после первого отбора. В период между отборами в скважине поддерживалась циркуляция той же промывочной жидкости. Такая методика была принята с целью установления влияния фактора времени на глубину и степень кольматации песка глинистым раствором.

Технология отбора проб была следующей. Пробоотборник без шарового клапана на бурильных трубах диаметром 73 мм спускался в скважину на требуемую глубину и подключался к напорной линии грязевого насоса 11ГрБ. При этом на его насадке, имеющей проходное отверстие диаметром 8 мм, создавался перепад давления в пределах 25-35 атм. (в зависимости от производительности насоса). Такой перепад поддерживался в течение 10-12 мин. Под его действием керноотборники 14 выдвигались из цилиндров 11 и врезались в стенки ствола. При этом на каждый из них действовали усилия в пределах 4-4,5 т. По истечении указанного времени циркуляция раствора выключалась, в инструмент забрасывался шаровой клапан 7 и снова включалась циркуляция промывки на 8-10 мин с целью возвращения керноотборников с отобранными образцами в исходное положение. В процессе отбора проб пробоотборник находился в неподвижном состоянии, которое достигалось подвешиванием бурового снаряда на ротор станка. Всего им было отобрано 16 образцов диаметром 78 мм, длиною от 150-160 до 260 мм и более. Отобранные образцы были извлечены из керноотбойников, наиболее сохранившиеся обработаны с помощью марли и парафина.

С целью определения степени кольматации прифильтровой зоны глинистым раствором отобранные образцы исследовались на поинтервальную проницаемость в стабилометрах УСВ-2. Разделение образца на интервалы по его длине осуществлялась таким образом, чтобы их отсчёт начинался от стенки скважины. Величина интервалов принималась равной 40 мм, что соответствует минимальной высоте загрузочной камеры прибора. Величины вертикального и горизонтального (радиального) давления, создаваемые в загрузочной камере прибора, выбирались такими, чтобы они были эквивалентны горному давлению, которое имеет место в точке отбора образца [183].

В таблице 5.1 и на рис.5.2 приведены изменения коэффициента фильтрации закольматированных песков по глубине.

Таблица 5.1 – Изменение фильтрационных свойств с глубиной

Номер образца и коэффициент фильтрации, м/сут									Ср. знач. $К_ф$, м/сут	Примечание
№ интервала	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	0,115	0,059	0,118	0,15	0,37	0,38	0,03	0,05	0,150	
2	0,37	0,45	0,416	0,48	0,38	0,41	0,15	0,48	0,392	
3	0,83	0,71	0,454	0,71	0,51	0,51	0,18	0,6	0,564	
4	0,39	0,38	0,523	0,53	0,64	0,76	0,36	1,36	0,745	
5	-	-	0,53	-	0,69	0,64	0,35	1,92	0,84	

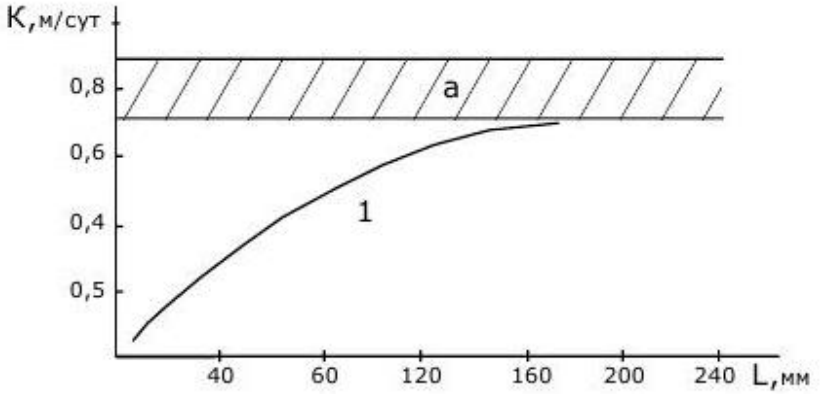


Рис.5.2. Коэффициент фильтрации песка
в зоне проникновения глинистого раствора:

1 – График изменения коэффициента фильтрации песков в прифильтровой зоне скважины, пробуренной с промывкой глинистым раствором;
а – зона коэффициентов фильтрации незакольматированных песков

Было выявлено:

1. При вскрытии с промывкой глинистым раствором водоносного горизонта, представленного мелкозернистыми песками типа сеноман-альбских, происходит кольматация прифильтровой зоны на глубину от 100 до 160 мм. Максимальное снижение проницаемости происходит в прифильтровой зоне, составляя 40-70 мм на сторону скважины.

2. Максимальное снижение проницаемости прифильтровой зоны происходит за счёт создания на стенках скважины глинистой корки.

3. Проникновение фильтрата раствора в пласт протекает, очевидно, до периода формирования глинистой корки на стенках скважины.

Карбонатные растворы так же, как и глинистые, обеспечивают нормальные условия бурения несвязных пород. Но в отличие от глинистых их твёрдая фаза является химически активной по отношению к соляной кислоте, что в известной мере облегчает декольматацию прифильтровой зоны, хотя и не полностью. Скважины, сооружённые с промывкой карбонатным раствором, при остальных неизменных условиях обеспечивают дебиты в 1,5-2,0 раза больше, чем с промывкой глинистым раствором [167, 170]. При использовании таких растворов проницаемость восстанавливается на 55-60 % с дальнейшим падением до 25-30 %. Учитывая сложный химический состав этих растворов, область применения их ограничена отсутствием в разрезе глинистых пород, высокоминерализованных вод и др.

Растворы, обработанные ПАВ, в меньшей степени, чем необработанные кольматируют прифильтровую зону. Достигается это за счёт того, что ПАВ:

- могут предупреждать набухание глинистых частиц, содержащихся в водоносном пласте;

- разрушают гидратные оболочки, которые могут образовываться на поверхности частиц в результате проникновения в приствольную зону фильтрата бурового раствора и др.

Однако такое положительное воздействие ПАВ проявляется не во всех условиях. В целом растворы ПАВ для вскрытия водоносных горизонтов еще недостаточно доработаны и опробованы в производственных условиях.

При бурении нефтяных и газовых скважин используются полимерные буровые растворы, приготавливаемые на водной основе. В качестве полимеров применяются модифицированные полисахариды, полимеры и сополимеры акриловых и виниловых производств, КМЦ, крахмал, гипан и др. Имеющийся опыт применения водогипановых растворов с содержанием гипана в растворе до 4 % по весу показывает хорошие результаты по

качеству вскрытия водоносных горизонтов. Объясняется это тем, что гипан хорошо растворяется водой при производстве промывок скважины как перед, так и после посадки фильтра, и обладает хорошими структурными свойствами, позволяющими удерживать буровой шлам во взвешенном состоянии.

В результате анализа исследований по вскрытию водоносных горизонтов с применением наиболее распространённых промывочных агентов, каковыми являются глинистые растворы, можно сделать следующие выводы:

• Растворы обеспечивают устойчивость стенок скважины, позволяют вести бурение скважин большой глубины и большого диаметра при невысокой металлоёмкости.

• Глубина кольматации при применении качественных растворов с водоотдачей до 10-15 $см^3$/30 мин имеет незначительные величины – 40-60 мм на сторону.

• Удаление глинистой корки должно производиться на следующем этапе сооружения скважины – при её освоении.

• При качественно произведенном освоении могут быть получены удовлетворительные результаты по восстановлению проницаемости пласта.

Вода является идеальным промывочным агентом для вскрытия водоносного горизонта, при использовании её в максимальной степени сохраняется естественная проницаемость пласта. Исследования, проведенные в конце 60-х, преимущественно в 70-х годах XX столетия [163, 172, 174, 176] были направлены на решение задач по определению устойчивости стенок скважины, скоростей восходящего потока, при которых происходит вынос разрушенной породы, разработке технических средств и технологии при бурении скважин большого диаметра.

В результате проведенных работ были разработаны 2 способа вскрытия водоносных горизонтов:

- с прямой промывкой скважины, при которой промывочная жидкость (вода) буровым насосом подаётся по бурильным трубам к породоразрушающему инструменту и далее движется по кольцевому пространству, образованному стенками скважины и бурильными трубами;

- способ вскрытия водоносных горизонтов с обратной промывкой, при которой промывочная жидкость подаётся по кольцевому пространству между стенками скважины и внешней поверхностью бурильных труб поступает на забое в бурильные трубы, по которым она откачивается из скважины.

Способ вскрытия водоносных горизонтов с прямой промывкой водой начал применяться с середины 60-х годов. Данный способ по сравнению с обратной промывкой даёт худшие результаты, т.к. в процессе бурения имеет место кольматация прифильтровой зоны продуктами разрушения породы,

особенно в тех случаях, когда в водоносном пласте имеются глинистые прослойки.

Вскрытие водоносных горизонтов с обратной промывкой чистой водой впервые было применено в Германии. С 1951г фирма «Винтер-Вейс» (ФРГ) выпустила первую установку для этой цели. В настоящее время данный способ за рубежом занял ведущее место в бурении скважин на водоносные горизонты, сложенные несвязными породами. На горных объектах бурение с обратной промывкой впервые было применено на Белозёрском железорудном месторождении при сооружении водопонижающих скважин [172].

В настоящее время эта технология получила широкое распространение при сооружении скважин на воду благодаря следующим достоинствам:

1. Резко уменьшается или полностью исключается кольматация прифильтровой зоны, в результате чего возрастают водопритоки к скважинам.

2. Начинается формирование естественного фильтра в процессе бурения.

3. Высокие по сравнению с другими способами скорости бурения.

4. Возможность бурения скважин большого диаметра при довольно небольшой их металлоёмкости.

5. Сокращаются сроки строительной прокачки и освоения скважин.

Наряду с положительными достоинствами этому способу бурения присущи особенности, которые следует учитывать.

1. Требует постоянного и тщательного контроля при бурении за положением уровня воды, доливаемой в скважину, так как снижение минимально допустимого перепада между гидростатическим столбом и пластовым давлением даже на короткие промежутки времени приводит к обрушению стенок стволов. Минимально допустимые перепады давления по данным ВОДГЕО [183] для неглубоких скважин должны быть в пределах 3-5 м водяного столба; для глубоких скважин этот показатель может быть другим.

2. Невозможность сооружения скважин на водоносные горизонты, статические уровни которых располагаются выше поверхности земли или ниже её менее, чем на 3-5 м.

3. Большие расходы воды, вызванные её фильтрацией в пласт вследствие повышенного напора жидкости в скважине по сравнению с естественным.

Следует заметить, что эту технологию всегда необходимо детально обосновывать в каждом конкретном случае.

5.2. Освоение скважин

Производительность скважин на воду, её долговечность, устойчивость в работе помимо ранее рассмотренных способов вскрытия водоносного горизонта зависит во многом от мероприятий, направленных на восстановление естественной проницаемости пласта в прифильтровой зоне после его вскрытия скважиной и формирования вокруг фильтра зоны с повышенной проницаемостью. Операции и методы, с помощью которых это достигается, принято называть освоением скважины.

Общеизвестно применение следующих способов: желонирование, свабирование, химическая обработка, прокачка, откачка, механический вибрационный и гидравлический способы разрушения глинистой корки и закольматированной зоны водоносного горизонта. Выбор того или иного способа зависит от назначения скважины, гидрогеологических условий, в которых ведется её сооружение, параметров скважины (диаметр, глубина, тип применяемого фильтра), дебита, сроков эксплуатации и др.

Получая задание на сооружение либо одиночной, либо группы скважин, проектировщик должен учесть гидрогеологические условия, разработать конструкцию скважины, способ бурения, обеспечивающий высокую производительность буровых работ, качественное вскрытие водоносного горизонта, выбор наиболее эффективного и долговечного фильтра, выбор технологии освоения скважины, при которой обеспечивается восстановление естественной проницаемости или её увеличение в прифильтровой зоне.

Анализом работ, посвящённых вопросам освоения скважин, установлено, что наиболее распространёнными являются промывки и откачки [155, 158, 159, 160, 165, 168].

Освоение скважины методом промывки основано на создании в скважинах скоростей восходящего потока жидкости, обеспечивающих удаление рабочего раствора и бурового шлама, очистку стенок скважины от глинистой корки и даже разрушение стенок скважин, подверженных кольматации.

Освоение скважины методом откачки жидкости из скважины основано на принципе принудительного (например, эрлифтом, насосом, желонкой) отбора жидкости из скважины с понижением её уровня ниже статического уровня подземных вод. При этом величина понижения и дебит откачки играют ключевую роль в технологии. Понижая уровень воды в скважине ниже статического уровня грунтовых вод водоносного горизонта, тем самым стимулируют приток воды к скважине. Величина понижения является ключевым параметром, от которого зависят скорости жидкости в прифильтровой зоне. В задачу откачек входит расчёт скоростей потока,

которые могут обеспечить не только декольматацию водоносного горизонта, но и вынос из прифильтровой зоны скважины наиболее мелких глинистых и пылеватых частиц, находящихся в порах пласта, с сохранением скелета пласта в устойчивом состоянии. Расчёт параметров откачки, при которых создаются условия постепенного перевода работы скважины в эксплуатационный режим, исключающий её «пескование», является первостепенной задачей.

В основе пескования скважин лежит явление переноса фильтрационным потоком жидкости мелких частиц песка. Для такого режима необходимо, чтобы энергия фильтрационного потока обеспечивала не только сдвиг частиц, но и перенос их со скоростью, равной средней скорости потока. Скорость движения потока, удовлетворяющая этим условиям, названа критической.

Для определения критических скоростей был предложен ряд зависимостей [184-186]. При гидрогеологических расчётах наиболее часто пользуются формулой С.К.Абрамова

$$V_{\varnothing}=65\sqrt[3]{k} \qquad (5.2)$$

где k и $V_{\varnothing}$ – соответственно коэффициент фильтрации водовмещающих песков и скорость потока, м/сут.

Не менее часто для расчёта таких скоростей, называемых входными, пользуются уравнением Избаш-Козловой [159], по которому

$$V_{\varnothing}=1000k\left(\frac{d_{50}}{D_{50}}\right)^2 , \qquad (5.3)$$

где d_{50} и D_{50} - средние диаметры соответственно песка и гравия. И.Ф. Володько предлагает для определения входных скоростей применять формулу [187]

$$V_{\varnothing}=36\sqrt{k} \qquad (5.4)$$

Н.Н.Маслов [186] считает, что критическая скорость ориентировочно равна коэффициенту фильтрации $V_ф = k$.

Ниже приводятся сведения о величинах $V_{кр}$ для различных размеров частиц по Н.Н.Маслову.

Размер частиц, мм	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,05	0,001
$V_{кр}$, см/с	10	7	3	2	0,5	0,12	0,02

Подсчёт $V_{кр}$ для песков мелкозернистого состава по формулам С.К. Абрамова, И.Ф. Володько, С.В. Избаш, Л.И.Козловой показывает удовлетворительную сходимость величин $V_{кр.}$

Критическая скорость движения потока может быть выражена и через градиенты напора, что более удобно при проведении лабораторных исследований и при известных напорах водоносного горизонта. Скорость фильтрации в песках подчиняется линейному закону Дарси

$$V=KJ \qquad (5.5)$$

где J - градиент напора;

K – коэффициент фильтрации, м/сут.

Критические градиенты напора могут быть определены по формулам:

а) С.К. Абрамова

$$J_{кр}= \frac{65}{\sqrt[3]{K^2}} \qquad (5.6)$$

б) С.В. Избаша-Л.И.Козловой.

$$J_{кр}=1000 \left(\frac{d_{50}}{D_{50}}\right)^2. \qquad (5.7)$$

В работах [159] для практических расчётов в зависимости от гранулометрического состава песков водоносного горизонта даются конкретные величины критических градиентов, приведенные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Критические градиенты напора для песков разного грансостава

№№ п/п	Показатели	Состав песков		
		Песок тонко-зернистый	Песок мелкозернистый	Песок средне-зернистый
1	Коэффициент фильтрации, К, м/сут	1-10	10-40	40-70
2	Критический градиент напора	36-11	11-7	6-4

Исследование устойчивости фильтров против пескования должно производиться при следующих градиентах напора:

а) пески тонкозернистые $J_{кр}=36\div11$;

б) пески мелкозернистые $J_{кр}=11\div7$;

в) пески среднезернистые $J_{кр}$ =6-4.

Из установленных анализом критических значений напора вытекает очень важный практический вывод. С целью снижения явлений «пескования» скважин необходимо включение её в работу на расчётную производительность осуществлять плавно, начиная с дебитов, при которых градиент напора в пласте остаётся ниже критического. По мере срабатывания напора водоносного горизонта необходимо регулировать дебит скважины. В тех случаях, когда фактический градиент в пласте меньше критического, скважина может быть запущена в работу сразу.

Исходя из информации о коэффициенте фильтрации водоносного горизонта, его гранулометрического состава необходимо предварительно установить критическую скорость движения пластовых вод. Например, по формуле С.К. Абрамова ($V_{кр} = 65\sqrt[3]{k}$).

Затем, зная проектные показатели скважины (диаметр, мощность водоносного горизонта), необходимо рассчитать допустимый приток воды к скважине по известной формуле:

$$Q_{доп} = V_{кр} \cdot F_{бок}, м^3/час, \qquad (5.8)$$

где $Q_{доп}$ - допустимый приток воды к скважине, $м^3$ /час;

$F_{бок}$ – боковая площадь скважины,

$F_{бок} = \Pi D l$,

где D - диаметр скважины, м;

l –мощность вскрытого водоносного горизонта, м.

Например, при коэффициенте фильтрации песков водоносного горизонта $К_ф$ =3,0 м/сут, диаметре скважины 180 мм (0,18 м) и мощности вскрытого водоносного горизонта l=10 м

$Q_{доп}$ = 529 $м^3$/сут (22 $м^3$/час)

Следовательно, дебит скважины в 22 $м^3$/час является предельным по выносу песка. Откачку при режиме плавного освоения скважины следует производить в три ступени. Первая ступень откачки производится при Q_1 =0,5 $Q_{доп}$. После осветления жидкости и установившегося понижения уровня воды в скважине приступают к выполнению откачки в режиме Q_2 =0,75 $Q_{доп}$. Последний режим откачки производится на предельной производительности $Q_З$ =$Q_{доп}$.

При производстве работ по реализации третьей ступени режима откачки непрерывно ведут наблюдения за понижением уровня, скоростью его падения, временем достижения установившегося уровня, содержанием песка в откачиваемой воде. В случае длительного, непрекращающегося пескования режим откачки следует изменить, уменьшив дебит скважины до предела, при котором исключается вынос песчаных частиц из пласта.

5.3. Оценка влияния конструкции водоприёмной части на эксплуатацию скважин на воду

Водоприёмная часть скважины конструктивно в большинстве случаев состоит из фильтра или из фильтра и гравийной обсыпки. Бесфильтровые скважины сооружают в трещиноватых скальных породах и весьма редко в рыхлых.

Разнообразие предлагаемых типов и конструкций фильтров, рекомендуемых для промышленного внедрения, и назревшая необходимость разработки типовых конструкций водоприёмной части дренажных устройств требуют выработки объективных критериев, которые позволили бы при сложной форме входных отверстий фильтра и различных сочетаниях каркаса и водоприёмной поверхности сделать вывод об их гидравлических характеристиках [188, 189]. В соответствии с основными параметрами, определяющими гидравлику фильтров, имеющиеся предложения базируются на конструктивных особенностях фильтров или специфике эксплуатации скважин. Конструкция фильтра предполагает наличие одной фильтрующей поверхности (например, труба с отверстиями), или несколько (например, труба с отверстиями, покрытая сеткой) [159].

Для характеристики фильтров применялись такие геометрические параметры, как скважность, определяемая как отношение площади отверстий фильтра к общей площади, размер и расположение отверстий. Теоретическое обоснование для фильтров-каркасов (перфорированная труба, стержневой каркас) эти параметры получили при аналитическом рассмотрении задачи о притоке жидкости к фильтру, когда в расчётные зависимости вводилось сопротивление фильтра, зависящее от скважности, формы, числа и размеров отверстий. На основе полученных решений и вытекающих из них результатов были даны общие рекомендации по применению фильтров, состоящих из одного трубчатого каркаса. Суть их сводилась к преимущественному использованию фильтров с горизонтальными щелями, имеющих меньшие сопротивления и интерференцию отверстий.

Учёт только геометрических особенностей фильтров не позволяет решить вопрос о предпочтительности той или иной конструкции. Это связано с тем, что скважность фильтра весьма приближённо определяется для отверстий сложной формы и при наличии нескольких фильтрующих поверхностей. При этом скважность существенно меняется при контакте фильтра с породами водоносного горизонта, её величина не позволяет также учесть конструктивные особенности фильтра при гидродинамических расчётах и сравнивать гидродинамические параметры фильтра с таковыми для дренируемых пород, а для дренажных устройств и длительно эксплуатируемых водозаборных сооружений оказывается важной оценка

устойчивости их действия во времени.

Эффективность фильтров скважин на воду однозначно определяется начальными гидравлическими параметрами и интенсивностью их изменения во времени вследствие развития кольматационных процессов.

Гидравлические параметры фильтров следует определять, как функцию гидравлики собственно фильтра-каркаса, дополнительной водоприёмной поверхности и особенностей взаимодействия этих элементов фильтров с водоносной породой. В качестве таких параметров используются удельный дебит скважины, показатель обобщённого сопротивления фильтра, комплексный параметр, связывающий скважность и коэффициент расхода фильтра, коэффициент водопроницаемости фильтра, а также комбинации этих параметров [159].

Применение удельного дебита скважин в качестве показателя гидравлической характеристики фильтра возможно только для ориентировочной оценки. Сравнительные исследования в пределах одного опытного участка фильтров различных конструкций предпочтительнее производить при близкой величине понижения уровня в ходе опытной откачки или при различных понижениях уровня по известной индикаторной кривой. В общем же случае следует иметь в виду, что удельный дебит является комплексной характеристикой фильтрационных свойств водоносного пласта, особенностей его вскрытия, освоения и собственно фильтра.

Показатель обобщённого сопротивления фильтра $\eta_{2ф}$ – один из наиболее представительных параметров, поскольку позволяет дифференцированно оценивать гидравлические потери на фильтре и в прифильтровой зоне скважин.

Комплекс исследований, проведённых во ВНИИ ВОДГЕО, подтвердил правомерность этого вывода. Лабораторные и полевые работы показали важность учёта контактных потерь напора и их изменения, связанного с кольматацией водоприёмной поверхности. Наиболее плодотворной оказывается оценка $\eta_{2ф}$ в полевых условиях как важного критерия качества работ по бурению, оборудованию и освоению скважин. В лабораторных (стендовых) условиях воспроизводимость результатов экспериментов не удовлетворяет предъявляемым требованиям из-за возможного влияния особенностей опробования на формирование контактных потерь напора.

Комплексный параметр гидравлических потерь на фильтре $H = \mu n$ (μ - коэффициент расхода, n-скважность фильтра) оценивается при известном распределении потерь напора или скоростей по длине фильтра. Представительность этого параметра обусловливается также учётом контактных потерь напора и их ощутимой связью с геометрическими характеристиками фильтра. Исследования, проведенные Э.А. Грикевичем,

свидетельствуют о близком соответствии сопоставленных определений по фильтрам с использованием в качестве критериев $\eta_{2ф}$ и Н [190].

Обширный комплекс исследований фильтров, выпускаемых серийно в США и ФРГ, был проведен Д. Клотцем. В качестве характеристики, описывающей их гидравлические свойства, использовался коэффициент водопроницаемости K_1. Определение данного показателя позволило Д. Клотцу указать основные направления в конструировании фильтров на современном этапе, выделить наиболее перспективные их типы [191, 192].

Рассматривая в целом имеющиеся предложения по определению гидравлических свойств фильтров, необходимо отметить, что методически только для простых конструкций $\eta_{2ф}$ определяется аналитически, во всех остальных случаях требуется проведение экспериментальных исследований, основу которых составляет оценка разности уровней воды снаружи и внутри фильтра (ΔS). Достоверно величина ΔS определяется при оценке фильтров, имеющих большие величины сопротивлений (блочные фильтры, некоторые конструкции сетчатых и т. д.), для большинства же перспективных типов фильтров величина ΔS при обычных градиентах потока сравнима с точностью замеров и надёжность рассчитываемых показателей резко уменьшается.

Наиболее перспективной является оценка гидравлических свойств фильтров по коэффициенту водопроницаемости. Имеющиеся предпосылки свидетельствуют о достаточно надёжной методике его определения, кроме того, данный показатель по своему физическому содержанию идентичен коэффициенту фильтрации водоносных пород, что позволяет сопоставить гидравлические свойства фильтров с фильтрационными характеристиками пористой среды, в которой они устанавливаются.

В качестве основы для оценки водопроницаемости фильтров и методики проведения экспериментов используются исследования С. А. Коля и Н. А. Огильви по определению скорости фильтрации подземных вод по одиночной скважине прослеживанием разбавления в ней индикатора [193, 194]. Рабочей предпосылкой служит положение об искажении фильтрационного потока вблизи скважины вследствие наличия фильтра, причём параметр α, характеризующий степень этого искажения, однозначно связан с проницаемостью фильтра. Для скорости фильтрационного потока, определённой по интенсивности разбавления индикатора, имеем

$$V_{ф} = \frac{\pi d}{4\alpha t} \ln \frac{C_0}{C}, \qquad (5.10)$$

где $V_{ф}$ – скорость фильтрации, см/мин.;
d –диаметр фильтра скважины, см;
t –время, мин;

C – концентрация индикатора в момент t, мг/л;

C_0 – концентрация индикатора при t=0, мг/л;

α - коэффициент искажения фильтрационного потока.

Зависимости между α и коэффициентом водопроницаемости фильтра представляются в следующем виде [191, 195, 196]:

$$K_1 = \frac{K_3\left[1-(\frac{r_1}{r_2})^2\right]}{\frac{4}{\alpha}-\left[1+(\frac{r_1}{r_2})^2\right]}; \qquad (5.11)$$

$$K_1 = \frac{K_2\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2+\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2-\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]+K_3\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2-\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]}{\frac{8}{\alpha}-\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2+\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]-\frac{K_3}{K_2}\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2-\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2-\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]}, \qquad (5.12)$$

где K_1 – проницаемость фильтра, см/с;

r_1 –внутренний радиус фильтра, см;

r_2 – наружный радиус фильтра, см;

K_2 – коэффициент фильтрации гравийной обсыпки, см/с;

r_3 – радиус гравийной обсыпки, см;

K_3 – коэффициент фильтрации пласта, см/с.

Из приведенных зависимостей видно, что существует принципиальная возможность проведения как расчёта, так и экспериментов по двум схемам. Первая схема основывается на использовании формулы (5.11), которая применима в случае равенства проницаемостей пласта и прифильтровой зоны. Вторая – предполагает неравенство коэффициентов фильтрации пласта и прифильтровой зоны, что может быть достигнуто сооружением гравийной обсыпки в прифильтровой зоне, расчёт в таком случае ведётся по формуле (5.12).

Оценка возможностей каждой схемы, а также погрешности, обусловленной характером зависимости получаемого решения от входных данных, показала, что вся область исследований может быть разбита на три участка [197, 198]. В пределах первого ошибка в значении α для данной конструкции фильтра соизмерима с погрешностью в найденном значении K_1. На втором участке происходит постепенный рост погрешности в искомом решении при мало меняющейся ошибке α, и на третьем участке малые погрешности входных данных вызывают большие ошибки в величине K_1. Из

оценки погрешности следует, что проведение экспериментов по первой схеме наиболее эффективно для фильтров, обладающих низкими гидравлическими свойствами (K_1 < 0,5 см/с). Некоторое расширение возможностей этой схемы наблюдается при значительном увеличении коэффициента фильтрации моделируемого пласта.

Использование второй схемы (с гравийной обсыпкой) более предпочтительно, так как появляется возможность не только расширения интервала исследуемых конструкций фильтров, но и более оперативного изменения его. Это достигается при постоянной проницаемости пласта увеличением как коэффициента фильтрации обсыпки, так и её радиуса. Комбинацией указанных величин в каждом конкретном случае можно подобрать оптимальный вариант схемы моделирования.

При постановке задачи по определению проницаемости фильтров необходимо выделение интервала изменения α, в пределах которого погрешность вычисления K_1 не превышала бы заданной величины. Для этой цели можно воспользоваться формулой [5.13]

$$\alpha < F\frac{1-\frac{\delta_\alpha}{\delta_K}}{1+\delta_\alpha}, \qquad (5.13)$$

где для первой схемы

$$F = \frac{4}{1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}, \qquad (5.14)$$

для второй схемы

$$F = \frac{8}{1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2+\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2+\frac{K_3}{K_2}\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2-\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]}, \qquad (5.15)$$

где δ_α - относительная ошибка α,

δ_K – относительная ошибка K_1.

Расчёты показали, что при интервалах изменения α и K_1 для второй схемы при заданных погрешностях – 5 % в определении α и 20 % в определении коэффициента водопроницаемости фильтра и при увеличении коэффициента фильтрации применяемой обсыпки в 7 раз (от 2,5 до 18 см/сек) и её радиусе 110 мм позволяет использовать диапазон исследуемых фильтров до значений K_1 = 5,2 см/с. Изменение радиуса гравийной обсыпки также расширяет пределы возможного определения коэффициента водопроницаемости: так, при K_2 = 9,2 см/с и r_3 = II см можно исследовать фильтры с K_1 < 3 см/с, при увеличении r_3 до 50 см с K_1 < 5 см/с.

Проведение расчётов по формуле (5.13) позволяет сократить время исследований, хотя в общем случае для этого необходимо также априорное задание возможных пределов изменения коэффициента проницаемости исследуемого фильтра. Основываясь на этих расчётах и примерном значении K_1 фильтра, выбирают состав и радиус гравийной обсыпки для опытных работ в фильтрационном лотке [198].

Обработка опытных данных заключается в следующем:

- осуществляется построение графика зависимости $ln(C_0/C)$ от t и расчёт по прямолинейному участку величины α;
- рассчитывается с использованием зависимостей (5.11), (5.12) коэффициент водопроницаемости фильтра;
- вычисляется коэффициент сопротивления T по известным зависимостям и производится построение графика T от $r_н/r_2$ [195];
- по известным геометрическим характеристикам фильтра и построенному графику $T = f(r_н/r_2)$ рассчитываются значения K_1 для фильтров данного типа без проведения опытных работ ($r_н$ – гидравлический радиус фильтра).

Интерпретация результатов экспериментов показала, что опытные данные в координатах $\ln(C_0/C)$ и t не всегда аппроксимируются прямой линией. На графике обычно отмечается точка перегиба, причём на начальном участке изменение концентрации происходит с большей интенсивностью (рис.5.3). Особенно чётко такой участок выражен в опытах с крупнозернистыми обсыпками, уменьшение же диаметра зёрен обсыпки заметно сокращает его величину по времени. С увеличением скорости фильтрации перегиб на графике выражается менее резко, и выше определённой скорости фильтрации он становится практически незаметным в наблюдаемых интервалах времени (см. рис. 5.3, линия 4). Такой характер зависимости концентрации от времени, видимо, обусловлен тем, что в начале опыта наблюдается усиленная диффузия растворённого вещества за счёт разницы удельных весов и концентрации растворов в порах породы и внутри фильтра. Увеличение размера пор обсыпки создаёт благоприятные условия для конвекции и дисперсии, увеличение же скорости фильтрации приводит к вуалированию физико-химических процессов конвективным переносом вещества, обусловленным общим градиентом потока.

Следовательно, при оценке водопроницаемости фильтров по начальному участку необходимо учитывать процессы диффузии и весовой конвекции, в противном случае получаются завышенные значения K_1. Поскольку зависимость (5.10) получена при пренебрежении диффузией индикатора из опытной скважины, во всех экспериментах, когда получается точка излома на графике $\ln(C_0/C) = f(t)$, для расчётов берётся второй участок. Расчёты коэффициентов проницаемости фильтров по формулам (5.11) или

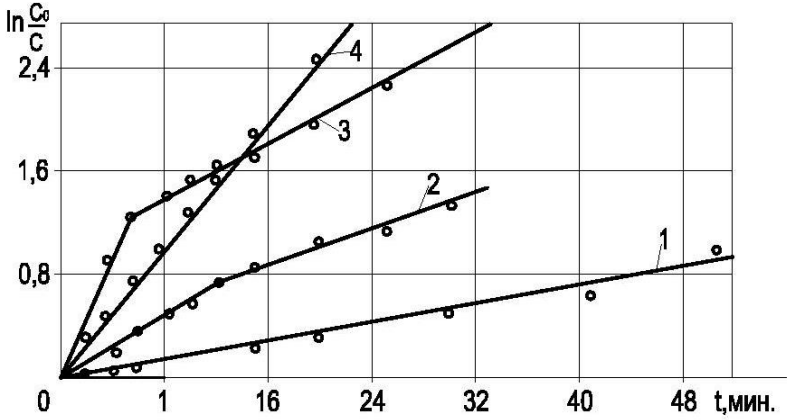


Рис.5.3. Изменение концентрации индикатора в фильтре по экспериментальным данным:
1 – трубофильтр из пористого бетона; 2 – каркасно-стержневой фильтр($v_ф<4\cdot10^{-3}$см/с); 3 – проволочный фильтр на трубчатом каркасе ($v_ф<4\cdot10^{-3}$см/с); 4 – каркасно-стержневой фильтр ($v_ф>4\cdot10^{-3}$см/с)

(5.12) обычно не вызывают затруднений.

Полученные экспериментальным путём величины K_1 в дальнейшем используются для оценки сопротивления фильтров. Основной для этого служит взаимосвязь между проницаемостью фильтра и его геометрическими параметрами. Для проволочных и каркасно-стержневых конструкций эта зависимость имеет вид [199]:

$$K_1 = A\frac{\eta r_н^2}{ST}, \qquad (5.16)$$

для фильтров с водоприёмной поверхностью из штампованного листа

$$K_1 = A\frac{\eta r_н}{ST\varphi(D_e)}, \qquad (5.17)$$

где А – физическая константа воды, равная при температуре 20°С $97{,}7\cdot10^4$ $см^{-1}с^{-1}$;

η- скважность фильтра;

$r_н$ – гидравлический радиус фильтра, см;

S –показатель сопротивления щели;

T – показатель сопротивления фильтра;

$\varphi(D_e)$ – функция от числа Деана.

Исходные параметры h, $r_н$, S в выражениях (5.16) и (5.17) для фильтров с одной фильтрующей поверхностью оцениваются однозначно по известным методикам [199]. При испытании фильтров с несколькими фильтрующими поверхностями и, в частности, в наиболее распространённом случае с двумя поверхностями (каркас – проволочная обмотка или штампованный лист) необходимо введение параметров, учитывающих геометрические характеристики как каркаса, так и обмотки. В качестве таких параметров можно использовать [159] скважность фильтра, равную произведению скважностей каркаса и обмотки; суммарный показатель сопротивления, равный сумме сопротивлений каркаса и обмотки; гидравлический радиус, оценивающийся с учётом наложения обмотки на отверстие в каркасе фильтра. Для проволочных фильтров гидравлический радиус рассчитывается по формуле

$$r_н = \frac{2h_1b_1h_2}{\pi b_1(h_2+d)+2(h_2+d)(h_1-b_1)-2h_1d}; \qquad (5.18)$$

для фильтров с водоприёмной поверхностью из штампованного листа по формуле:

$$r_н = \frac{L}{(h_2+h_4)[\pi b_1(b_2+b_3)+2(h_1-b_1)(b_2+b_3)+2(h_4+b_3)(b_2+b_3)-2b_3b_1-\frac{2h_4h_1(b_2+b_3)}{h_4+h_2}]}, \qquad (5.19)$$

где h_1 – длина щели каркаса, см;

b_1 – ширина щели каркаса, см;

h_2 – высота щели обмотки или длина отверстия штампованного листа;

d –диаметр проволоки обмотки, см;

$L = h_1b_1b_2(h_2+b_3)$ – для отверстия в форме трапеции;

$L = 2h_1b_1b_2h_2$ – для прямоугольного отверстия;

b_2 – высота отверстия штампованного листа, см;

h_3 – длина верхнего основания отверстия штампованного листа, см;

h_4 – высота перемычки на штампованном листе, см;

b_3 – ширина перемычки на штампованном листе.

Так как в выражениях (5.16) и (5.17) неизвестным остаётся параметр T, то вначале при определённом K_1 рассчитываются сопротивления T, которые затем для каждого типа фильтра представляются графически как функция от $r_н/r_2$ (рис. 5.4). В дальнейшем, исходя из полученных графиков, при известных геометрических размерах фильтра можно найти его сопротивление и по выражениям (5.16) или (5.17) рассчитать коэффициент водопроницаемости без проведения опытных работ на лабораторном стенде.

Пример оценки расчёта коэффициента водопроницаемости фильтра.

Моделирование проводилось по второй схеме:

K_2 = 16,5 см/с; K_3 = 0,106 см/с; r_1 = 4,0 см; r_2 = 5,2 см; r_3 =11,1 см.

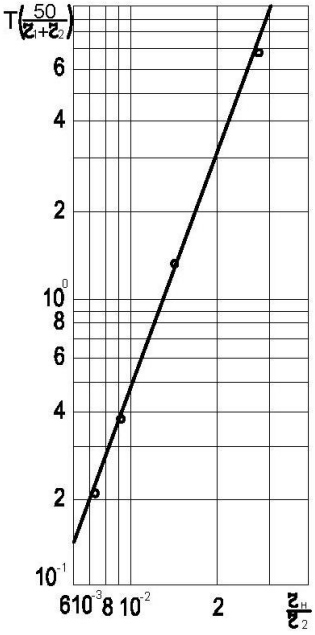


Рис.5.4. Изменение сопротивления *T* каркасно-стержневых фильтров в зависимости от геометрических размеров

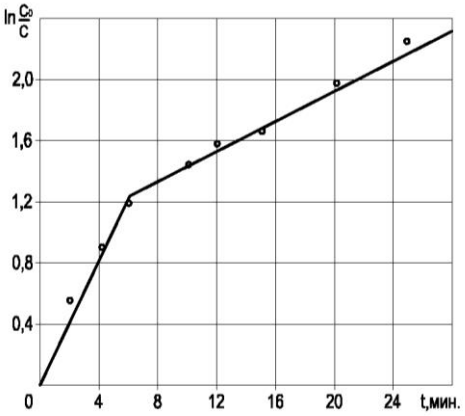


Рис.5.5. Изменение концентрации индикатора в фильтре по экспериментальным данным

Опытные данные по оценке коэффициента водопроницаемости проволочного фильтра приведены на рисунке 5.5.

По опытным данным находим скорость фильтрации при поперечном сечении потока 40*32,6 см^2:

$V_ф$= (130*2)/(40*32,6)=0,207 см/мин.

Исходя из $V_ф$ и графического представления опытных данных (см. рис. 5.5) с использованием зависимости (5.10) определяем степень искажения фильтрационного потока

0,207 α = (3,14*8)/(4*5)*ln(190/145),

$\alpha = 1{,}640$.

Рассчитываем коэффициент водопроницаемости по формуле (5.12)

$K_1 = 1{,}82$ см/с.

При известном K_1 находим сопротивление фильтра

$r_н = 0{,}856$ см; $T = 494{,}4$.

В дальнейшем показатель T определяется для всех опытных образцов фильтров данного типа и строится графическая зависимость T от $r_н/r_2$ (рис. 5.6). Имея данную зависимость, можно по выражению (5.16) найти коэффициент водопроницаемости фильтра без проведения опытных работ.

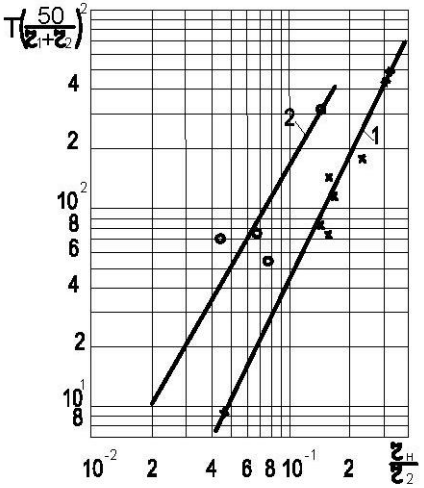


Рис.5.6. Изменение сопротивления T различных типов фильтров в зависимости от геометрических размеров: 1 – проволочный на трубчатом каркасе; 2 – с водоприёмной поверхностью из штампованного листа

Анализ применяемых конструкций фильтров при сооружении систем осушения на горных предприятиях показал [200], что наиболее распространёнными в водопонижающих скважинах являются проволочные фильтры на трубчатом каркасе, в восстающих – трубчатые каркасы, некоторое использование на отдельных месторождениях получили также фильтры с водоприёмной поверхностью из штампованного листа, количество других конструкций не превышает 2 – 3 %. Результаты исследований данных конструкций фильтров по определению коэффициента водопроницаемости приведены на рис. 5.7, на котором также показано изменение K_1 наиболее

перспективных типов фильтров, в частности, каркасно–стержневых. Подробный анализ экспериментов дан в работе [196], здесь же отметим, что коэффициент водопроницаемости каркасно–стержневых фильтров изменяется от 1,5 см/с при скважности 11 % до 2,5 см/с при предельном её значении 38 %. Для проволочных фильтров на трубчатом каркасе величина K_1 находится в пределах 0, 42 – 1,8 см/с при соответствующем изменении скважности от 4,7 до 25 %. Фильтры с водоприёмной поверхностью из штампованного листа имели размер отверстий, близкий по величине к зазору проволочной обмотки, скважность их изменялась от 2,3 до 17,5 %, соответствующие предельные значения коэффициента водопроницаемости составили 0,23 и 0,52 см/с. Сетчатые фильтры изготовлены на основе сеток галунного плетения № 48 и 7/70. Коэффициент водопроницаемости сетчатых фильтров (при трубчатом каркасе) изменяется от 0,08 до 0,37 см/с. При наложении сетки на стержневой каркас было получено среднее значение K_1 = 0,41 см/с.

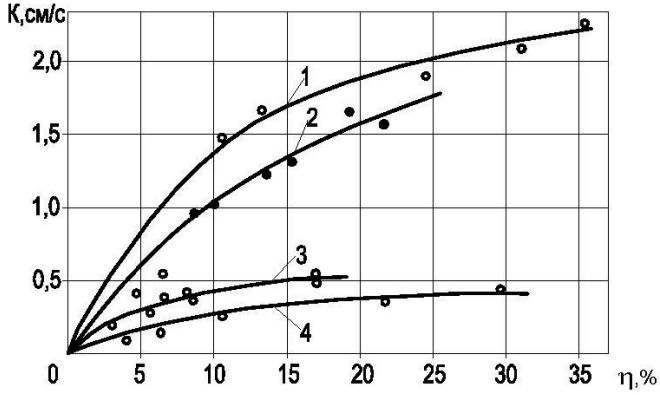


Рис.5.7. Водопроницаемость фильтров различных типов в зависимости от скважности: 1 - каркасно-стержневые; 2 – проволочные на трубчатом каркасе; 3 – с водоприемной поверхностью из штампованного листа; 4 – сетчатые с сетками галунного плетения

Обобщение данных о закономерностях изменения коэффициента водопроницаемости исследованных типов фильтров от скважности указывают на улучшение гидравлических свойств при её увеличении. Аппроксимирующая функция имеет степенной вид с дробным показателем.

Весьма показательным является опробование фильтров предлагаемых новых конструкций. В качестве таковых был определён K_1 многослойных проволочных фильтров на трубчатом каркасе и трубофильтров из пористого

бетона. Для первых получено среднее значение коэффициента водопроницаемости в пределах 0,14 см/с, для вторых – 0,04 и 0,007 см/с. Полученные данные показывают отсутствие каких-либо гидравлических преимуществ предлагаемых конструкций фильтров по сравнению с выпускаемыми серийно.

Сравнение коэффициентов водопроницаемости фильтров с фильтрационными свойствами осушаемых пород показано в табл. 5.3.

Таблица 5.3 - Сравнение коэффициентов водопроницаемости фильтров с фильтрационными свойствами осушаемых пород

-lgΔ при K_1=1см/с	Тип фильтра	Породы	Характеристика породы
0 1	Каркасно-стержневой Проволочный	Гравий	Весьма проницаемые
2	Сетчатые, с водоприёмной поверхностью из штампованного листа	Крупнозернистый и среднезернистый	Хорошо проницаемые
3 4 5 6 7 8	Блочные	Мелкозернистый и тонкозернистый песок	Проницаемые

Из таблицы следует, что применение каркасно–стержневых и проволочных фильтров в водоносных горизонтах, представленных среднезернистыми, мелкозернистыми и тонкозернистыми песками, должно производиться с проведением мероприятий по улучшению фильтрационных свойств прифильтровой зоны (например, сооружение гравийной обсыпки), в противном случае будем иметь весьма нерациональное сочетание двух проницаемых сред.

Требования к конструкциям фильтров, которые следуют из сравнительной оценки коэффициентов водопроницаемости, сводятся к следующему: предпочтительнее фильтры с одной антикоррозийной фильтрующей поверхностью, величина скважности фильтра не менее 10 %, форма входных отверстий должна способствовать уменьшению контактных потерь.

В последнее время при оборудовании водоприёмной части скважин находят применение витые дренажные трубы из жёсткого поливинилхлорида [201], стеклопластиковые фильтры [51, 159] и фильтры с волокнисто–пористым полиэтиленовым покрытием. Все эти конструкции характеризуются весьма неопределённой формой и сложной конфигурацией входных отверстий, что затрудняет использование для характеристики их гидравлических свойств такого показателя, как скважность. Разработанная методика определения коэффициента водопроницаемости применима для данных конструкций и позволяет найти рациональную область их использования исходя из сравнительной характеристики фильтров по этому показателю. В качестве примера можно указать, что в определённых гидрогеологических условиях, несмотря на относительно низкие гидравлические свойства волокнисто–пористого полиэтиленового покрытия, оно может применяться для предотвращения выноса песка из скважин.

Рассмотрим более детально варианты применения в скважинах на воду стеклопластиковых фильтров.

Стеклопластиковые фильтры (СПФ) характеризуются тем, что изготавливаются из антикоррозийных материалов, исключающих или снижающих их химическую кольматацию за счёт разрушения материала фильтра [51, 159].

СПФ имеют объёмно–сетчатую структуру, образующуюся путём косой перекрёстной намотки на оправку стекложгута, или стеклоткани пропитанных компаундом на основе эпоксидной смолы и отвердителя. Параметры выпускавшихся серийных СПФ: длина с патрубками 7200 или 3850 мм, внутренний диаметр 165 или 270 мм, наружный – 185 или 290 мм, толщина стенки 10 мм. Толщиной стенки можно варьировать за счёт изменения слоёв намотки. В фильтры с двух сторон вклеены стальные патрубки диаметром соответственно 168 и 273 мм. Технология производства СПФ позволяет создавать конструкции с заданным размером водопропускных отверстий (от 1 до 2…3 мм). Форма отверстий квадратная или ромбическая. Прочность СПФ на сжатие и растяжение составляет 60…70 % прочности перфорированной стальной трубы скважностью 18 – 20 %. Число слоёв намотки в фильтрах с небольшой скважностью – 6…8, при скважности более 20 % - 4. Исследовались образцы СПФ в основном с ромбической формой пропускных отверстий. Число их на 1 м^2 поверхности фильтра достигло 60 тысяч.

Сложную структуру течения жидкости в пористой среде СПФ исследовали в лабораторных и полевых условиях. В лабораторных экспериментах использовался индикаторный метод [196], позволявший определить коэффициент водопроницаемости фильтра.

Гидравлические испытания показали, что коэффициент водопроницаемости K_1 образцов изменяется в пределах от 0,17 до 1,17 см/с. Водопроницаемость СПФ оказалась промежуточной между водопроницаемостью фильтров на трубчатом каркасе проволочных и с водоприёмной поверхностью из штампованного листа, исследованных в аналогичных условиях.

Систематизация стеклопластиковых фильтров по коэффициенту водопроницаемости показывает, что при малых его значениях K_1 сопоставим с аналогичным коэффициентом среднезернистых песков, при $K_1 > 0{,}8$ см/с – крупнозернистых.

Для определения показателя обобщённого сопротивления СПФ и прифильтровой зоны ζ_2 были проведены опытные работы с фильтрами различных модификаций в различных гидрогеологических условиях [159]. Значение ζ_2 устанавливали вычитанием из общего коэффициента дополнительного сопротивления ζ показателя сопротивления ζ_1, обусловленного несовершенством скважины по степени вскрытия пласта:

$$\zeta_2 = \zeta - \zeta_1 \qquad (5.20)$$

Общее дополнительное сопротивление ζ оценивали графоаналитически по формуле:

$$\zeta = \{[2\pi K_m (S_0 - S_i)]/Q\} - (N_0 - N_i), \qquad (5.21)$$

где K_m – водопроводимость пласта, $м^2$/сут; S_0 – понижение уровня в опытной скважине, м; S_i – понижение уровня в наблюдательной скважине или пьезометре, м; Q – дебит опытной скважины, $м^3$/сут; N_0, N_i – безразмерные гидравлические сопротивления тех же скважин при условии их гидравлического совершенства.

Полевые испытания показали, что общее дополнительное сопротивление СПФ изменяется в пределах 1,62…5,3, что лучше, чем у проволочных и сетчатых фильтров на трубчатом каркасе (от 4,19 до 33,82).

Оценка изменения гидравлических свойств СПФ в зависимости от способа вскрытия водоносного горизонта показала, что в скважинах, пробуренных ударно–канатным способом, сопротивление прифильтровой зоны ζ_2 составляло 1,2…5,3 – в 2,5…3 раза больше, чем в скважинах, пробуренных роторным способом с обратно–всасывающей промывкой чистой водой ($\zeta_2 = -1{,}62…1{,}06$).

Установка СПФ в скважинах с гравийной обсыпкой при вскрытии безнапорных и слабонапорных водоносных горизонтов с промывкой глинистым раствором, несмотря на применение методов разглинизации (свабирование, желонирование, откачка эрлифтом), снижала удельный дебит

в 2…6 раз по сравнению с таковым в скважинах, пробуренных другими способами.

Анализ результатов лабораторных и полевых испытаний СПФ позволяет сформулировать ряд положений для выбора их конструктивных параметров. Основными факторами, обуславливающими такой выбор, являются гидрогеологические условия и геологическое строение, литологический и механический состав контактирующих с фильтром водоносных пород, условия эксплуатации скважин, гидродинамические процессы в прифильтровой зоне, технология оборудования водоприёмной части скважин, гидрохимические и бактериологические условия, технико–экономические показатели.

Гидрогеологические условия и геологическое строение следует анализировать, исходя из глубины установки стеклопластиковых фильтров, сравнивая величину горного давления, действующего на стенку скважины и прочностные показатели СПФ.

Литологический и механический состав водонасыщенных пород необходимо учитывать по геометрическим критериям проявления суффозии и фильтрационным свойствам. При установке фильтров в трещиноватых породах основное значение следует придавать обеспечению допустимых норм выноса через них мелких частиц. В таких породах можно устанавливать СПФ с шагом намотки до 6 мм. В рыхлых крупно – и среднезернистых песках стеклопластиковые фильтры можно устанавливать без гравийной обсыпки при соблюдении требований формирования естественного фильтра.

При отборе подземных вод из мелко-, тонкозернистых и пылеватых песков СПФ целесообразно устанавливать с устройством гравийной обсыпки или предусматривать её в конструкции самого фильтра. Подбор гравийной обсыпки для СПФ выполняют в соответствии с известными положениями для проволочных фильтров [159].

При оборудовании СПФ скважин, сооружаемых для отбора воды из суглинков и пылеватых песков, обсыпку в случае их низкого дебита (< 5 м^3/ч) можно не выполнять. Конструкция СПФ должна исключать при этом заиливание ствола скважины.

Фильтрация подземных вод в прифильтровой зоне скважины вызывает механическую и химическую кольматацию фильтра и его коррозийное разрушение. СПФ устойчивы к коррозии и в большинстве случаев химической кольматации. Механическая же кольматация при выборе параметров СПФ с учётом известных соотношений протекает с малой интенсивностью.

По технологии оборудования водоприёмной части СПФ рекомендуется устанавливать в скважинах, сооружение которых не требует вскрытия водоносных пород фильтровой колонной.

Гидрохимический и бактериологический анализ связан с оценкой возможности выпадения в осадок кольматирующих соединений и создания на СПФ условий, способствующих активной биологической деятельности бактерий. При отборе вод, склонных к выделению кольматирующих осадков, следует применять СПФ, скважность которых не менее 20 %. В условиях активного развития бактерий следует предусматривать мероприятия, предотвращающие разрушение фильтров.

Экономические факторы учитываются при оценке стоимости СПФ. В скважинах временного назначения можно устанавливать фильтры с использованием более дешёвых компонентов и более простой технологии, чем в скважинах, рассчитанных на длительный срок эксплуатации.

Для восстановления дебита скважин, оборудованных СПФ, можно применять все известные методы, используемые для металлических фильтров, кроме взрыва ТДШ. Примеры практического использования СПФ приведены в работе [51, 159]. СПФ не рекомендуется применять в скважинах, предназначенных для хозпитьевого водоснабжения.

5.4 Оптимальные параметры фильтров и водоприёмной части скважин на воду

Решение сложной и многогранной проблемы повышения эффективности систем осушения в процессе их проектирования, сооружения и эксплуатации связано в значительной мере с разработкой перспективных конструкций водоприёмной части дренажных скважин. Особенности, присущие процессу осушения, и, в частности, тот факт, что система осушения должна эксплуатироваться период времени, существенно превышающий срок стабильной работы практически всех типов дренажных устройств, не позволяют в полной мере использовать разработки, относящиеся к водозаборным сооружениям. В настоящем разделе обосновывается именно такой подход к выбору конструкций фильтра и в целом водоприёмной части, который учитывает указанные особенности дренажных скважин [202, 203, 204].

5.4.1.Требования к фильтрам дренажных устройств

Требования к конструкциям фильтров в значительной мере обуславливаются функциональным назначением дренажных скважин. Они определяются также общей структурой дренажной системы и технологией сооружения водоприёмной части скважин.

При сооружении дренажных систем применяются несколько типов скважин.

Водопонижающие скважины сооружаются с поверхности и предназначены для снижения уровня при принудительном отборе подземных вод насосами.

Сквозные фильтры сооружаются с поверхности с выходом забоя в подземную горную выработку и предназначены для понижения уровня при самотёчном поступлении подземных вод в подземную выработку.

Восстающие скважины сооружаются из подземной горной выработки под различными углами к горизонту и предназначены для понижения уровня при самотёчном поступлении подземных вод в горную выработку.

Водопоглощающие скважины сооружаются с поверхности или из горной выработки и предназначены для осушения верхних водоносных горизонтов за счёт перетока воды из них в нижние.

Иглофильтровые скважины с поверхности сооружаются путём гидравлического заглубления фильтровых элементов небольшого диаметра и длины, предназначены в основном для принудительного осушения слабопроницаемых грунтов небольшой мощности.

Горизонтальные скважины сооружаются в горизонтальной или слабонаклонной плоскости из открытых выработок или шахтных стволов и предназначены для уменьшения водопритока к откосам и уступам выработки, понижения уровня подземных вод под защищаемым объектом.

Лучевые скважины представляют собой разновидность горизонтальных, отличительной особенностью их является то, что они проходятся из вертикальной горной выработки (шахтного колодца) и по радиальным направлениям от неё.

Скважины горизонтально-направленного бурения сооружаются с поверхности с постепенным переходом из вертикальной плоскости в горизонтальную.

Забивные фильтры сооружаются из подземных выработок для осушения водоносных слоёв в её кровле.

В структуре дренажной системы скважины могут располагаться на временных (например, рабочий борт карьера) и постоянных участках (например, нерабочий борт карьера или дренажная подземная горная выработка), на внешнем дренажном контуре (за пределами зоны ведения горных работ) и на внутреннем (в зоне ведения горно-транспортных работ), на водообильных участках и в пределах распространения слабопроницаемых пород (коэффициент фильтрации меньше 10^{-3} см/с).

Технология сооружения скважин может предусматривать установку фильтра после вскрытия водоносного горизонта (водопонижающие и горизонтальные скважины, сквозные фильтры), бурение через фильтр после

ввода в эксплуатацию скважины (как правило, сквозные фильтры), установку фильтра одновременно с вскрытием водоносного горизонта (восстающие и горизонтальные скважины), вскрытие водоносного горизонта фильтровой колонной (восстающие скважины и забивные фильтры).

С учётом целевого назначения, структуры дренажной системы и технологии сооружения скважины требования к фильтрам могут быть подразделены на две группы: общего и специфического характера. В пределах каждой группы могут выделяться направления: конструктивно – технологическое, экономическое и экологическое. Конструктивно – технологические требования составляют наиболее обширное и разработанное направление [189, 204, 205, 159]. Формулировка требований экономического и экологического направлений разработана в основном в общем виде.

Конструктивно – технологические требования общего характера включают:

- обеспечение стабильной и высокопроизводительной работы дренажной скважины;
- исключение разрушения фильтра под действием механических нагрузок, проявления горного давления и динамических сил потока воды;
- создание условий для устойчивого отбора воды из скважины при использовании современных погружных электронасосов;
- обеспечение оптимальных условий для эксплуатации погружных электронасосов;
- обеспечение образования устойчивой структуры прифильтровой зоны скважины;
- снижение интенсивности выделения соединений, способных кольматировать породы водоносного горизонта, контактирующие с фильтром и сам фильтр;
- обеспечение использования для притока воды всего поперечного сечения пор породы в зоне контакта фильтр – порода;
- исключение разрушения при механическом и химическом удалении кольматирующих осадков;
- технологичность изготовления;
- исключение заиливания ствола скважины;
- использование недефицитных материалов.

Конструктивно–технологические требования специфического характера проявляются в зависимости от конкретных условий и довольно многообразны. К числу наиболее распространённых требований к фильтрам при эксплуатации дренажных систем относятся [204, 205]:

- способность легко разрушаться вскрышными механизмами при подработке скважин бортом карьера;

• способность противостоять механическим нагрузкам при вскрытии водоносного горизонта фильтровой колонной;
• обеспечение возможности нанесения антикоррозийных покрытий;
• гарантировать надёжную эксплуатацию скважин в самотёчном режиме при незатопленной водоприёмной части;
• исключение в прифильтровой зоне больших величин скин–эффекта (потерь напора);
• создание условий для получения в прифильтровой зоне отрицательных значений обобщённого показателя сопротивления при отсутствии гравийной обсыпки;
• обеспечение отбора воды из слабопроницаемых пород;
• устойчивость против химической и электрической коррозии при отборе вод с повышенной минерализацией (агрессивных вод).

Параметры фильтра должны обеспечивать оптимальные экономические показатели работы скважины в течение всего расчётного периода. Следует отметить, что выбор параметров фильтра для условий

$$Q_c = Q_n \quad \text{и} \quad t_э = t_p,$$

где Q_c и Q_n – эксплуатационный и требуемый (проектный) дебиты скважин,
$t_э$ и t_p – время эксплуатации и расчётный период времени,
соответственно неоднозначно влияет на капитальные вложения и затраты на откачку воды. При установке фильтра с высокими значениями гидравлических потерь на нём капитальные вложения, как правило, меньше, чем для фильтра с небольшими потерями. Для текущих затрат на откачку воды соотношение имеет обратный характер. При эксплуатации скважин в самотёчном режиме экономия капитальных вложений на одной скважине может привести к росту затрат по всей дренажной системе.

Экологические требования к фильтрам заключаются главным образом в использовании материалов, исключающих загрязнение подземных вод и не ухудшающих их качественный состав. Это требование выдерживается практически во всех случаях.

5.4.2. Факторы, учитываемые при выборе фильтров скважин

Основными факторами, которые учитываются при выборе конструкции фильтра, являются: гидрогеологические условия и геологическое строение месторождения полезных ископаемых; литологический и механический состав контактирующих с фильтром водоносных пород; фильтрационные и кольматационные процессы в прифильтровой зоне; условия эксплуатации скважины; технические средства и технология оборудования водоприёмной части; требуемая степень

снижения уровня подземных вод; гидрохимические и бактериологические условия; технико–экономические показатели [205].

Гидрогеологические условия и геологическое строение анализируются с позиций глубины распространения водоносного горизонта, его мощности, анизотропии фильтрационных свойств как в плане, так и в разрезе. С ростом глубины установки фильтра должны увеличиваться его прочностные свойства. В водоносных горизонтах большой мощности при длине фильтра меньше мощности пласта и установке с примыканием к кровле нижнего водоупора следует учитывать несовершенство скважины по степени вскрытия пласта. Установка фильтра в рыхлых обводнённых породах при небольшой глубине скважины позволяет упростить его конструкцию, так как в этих условиях обычно применяется гравийная обсыпка, при больших же глубинах скважин конструкции фильтров, как правило, усложняются в связи с трудностью сооружения гравийных обсыпок.

Литологический и механический состав водонасыщенных пород, которые находятся в непосредственном контакте с фильтром, во многом определяет конструкцию последнего. При дренировании скальных и полускальных трещиноватых пород применяются наиболее простые конструкции, состоящие из трубчатого каркаса и обеспечивающие эффективную работу скважин. Достаточно легко решается вопрос выбора параметров фильтра (формы и размеры проходных отверстий, скважность и пр.) и при дренаже рыхлых пород, имеющих средний размер частиц $d_{50} > 1$ мм. Как правило, в таких породах могут использоваться однокаркасные конструкции с щелевой перфорацией. Сложнее принять решение по конструкции водоприёмной части при водоотборе из средне–, мелкозернистых и пылеватых песков. В этих условиях скважины, кроме фильтра, имеют или гравийную (водопонижающие скважины и сквозные фильтры), или естественную обсыпку, а в некоторых случаях водоприёмную каверну (восстающие скважины, забивные фильтры). Состав и параметры гравийных обсыпок рассчитываются в соответствии с имеющимися рекомендациями [159, 206] на основе фильтрационных свойств водоносного горизонта, обсыпки и геометрических критериев процесса суффозии. Гравийные обсыпки являются эффективным средством регулирования поступления песка в скважину. Их основным преимуществом является то, что они обеспечивают пропуск в скважину вместе с потоком воды наиболее мелких частиц песка при одновременном формировании устойчивого скелета в прифильтровой зоне. При этом за пределами фильтра образуется зона повышенной проницаемости, состоящая из более крупных частиц песка и которая служит как бы вторым слоем обсыпки.

Для эффективной работы гравийной обсыпки необходимо правильно подобрать соотношение между размерами гравия и песка. Подбор

осуществляется по величине межслойного отношения или гравийно-песчаного отношения (ГПО). За величину ГПО принимается отношение диаметров частиц гравия и песка водоносного горизонта. В различных условиях оно колеблется в пределах от 5 до 14. Наиболее распространённым признается ГПО, равное 5-6, при котором «мостикообразование» происходит за пределами фильтра [207, 208, 209].

Принимая, что в гравийной обсыпке размер поры в 4-5 раз меньше крупности зёрен гравия [210, 211] и величину гравийно-песчаного отношения в пределах 5-10, можно определить необходимый размер среднего диаметра гравийной обсыпки.

В США создание гравийной обсыпки даёт положительные результаты в 85-90 % от общего числа скважин, в которых она сооружалась [209].

Управление созданием в прифильтровой зоне естественных обсыпок или водоприёмных каверн весьма сложный процесс и обосновывается в каждом конкретном случае специальными расчётами. Имеющиеся рекомендации свидетельствуют о существенном увеличении дебита таких скважин и появление возможности быстрого и интенсивного снижения уровня подземных вод (скорость снижения уровня увеличивается в 1,5 – 2 раза). Наибольшая интенсивность роста дебита отмечается при объёмах вынесённых через фильтр мелких частиц песка, изменяющихся в пределах до 3 $м^3$.

Особенности фильтрации подземных вод в прифильтровой зоне скважины таковы, что они вызывают ряд явлений, существенно влияющих на выбор конструкции и параметров фильтра. Применительно к условиям эксплуатации дренажных скважин можно выделить три наиболее существенных по влиянию группы явлений [205]:

- механические деформации грунта, вызываемые динамическими силами протекающей воды (суффозия), а также механическая кольматация при осаждении взвешенных частиц;
- осадкообразование, зависящее от химического состава подземных вод, микробиологических условий, материала фильтра и режима эксплуатации дренажного устройства;
- химическая и электрохимическая коррозия, обусловленная материалом фильтра и агрессивностью подземных вод.

Развитие структурных деформаций связано со сложным гранулометрическим составом водосодержащих пород, завышением размеров проходных отверстий фильтра и несоблюдением оптимального режима водоотбора. В период освоения скважины структурные перестройки в прифильтровой зоне играют положительную роль, в период эксплуатации они должны быть исключены для водопонижающих и горизонтальных скважин с малой интенсивностью протекать некоторый небольшой период

времени на восстающих скважинах и сквозных фильтрах.

Осадкообразование наиболее интенсивно протекает при отборе вод, содержащих слаборастворимые соли или с повышенной минерализацией, и установке фильтров без антикоррозийного покрытия. Существенно ускоряются процессы накопления осадков в водоприёмной части сквозных фильтров, восстающих скважин, а также на неэксплуатируемых скважинах при установке фильтров из легко корродируемых материалов. В составе осадков, кольматирующих прифильтровую зону скважин, преобладают соли железа и кальция (до 60 – 70 %), прочность осадков на внешней стенке фильтра после 10–летней эксплуатации скважин достигает 2 – 3 МПа при сжатии по направлению радиуса фильтра.

Химическая и электрохимическая коррозия развивается практически во всех случаях, когда фильтр имеет металлические элементы конструкции. Данные натурных исследований свидетельствуют, что диаметр опорных стержней проволочных фильтров в отдельных случаях уменьшается в 3 раза по сравнению с первоначальным.

Наиболее сильно условия эксплуатации влияют на выбор конструкции водоприёмной части при сооружении сквозных фильтров, восстающих и горизонтальных скважин. Для этих видов дренажных устройств характерным является наличие свободного доступа воздуха к фильтру, что интенсифицирует процессы осадкообразования и ведёт к ухудшению гидравлических свойств фильтра. Рационально для оборудования водоприёмной части в таких условиях использовать инертные материалы или применять антикоррозийное покрытие. На горизонтальных скважинах во многих случаях следует исключить также заиление ствола, используя для этого защитные покрытия (сетки из синтетических волокон) или фильтры на их основе.

Технология оборудования водоприёмной части достаточно хорошо разработана для водопонижающих скважин. Имеется ряд эффективных приёмов, позволяющих использовать рациональные конструкции фильтров [159, 205]. Технология сооружения сквозных фильтров имеет ряд существенных недостатков. При переоборудовании водопонижающих скважин в сквозные фильтры бурением с промывкой глинистым раствором происходит сильная кольматация водоприёмной части, ведущая к уменьшению дебита в 2 – 3 раза, и такое положение не может быть изменено подбором более совершенного фильтра. При сооружении восстающих скважин водоносный горизонт зачастую вскрывается фильтровой колонкой, что предполагает, по крайней мере, бурение последней некоторого интервала по глинистому водоупорному слою, а это при сложной конструкции фильтра (например, состоящего из трубчатого каркаса и проволочной обмотки) создаёт благоприятные условия для его заглинизации. Перспективным

представляется использование фильтров, состоящих только из перфорированного каркаса или специальной конструкции.

В сложных случаях могут применяться защитные составы: водорастворимые пасты, предохраняющие водоприёмную часть фильтра от кольматации глинистыми частицами, или экран на основе водорастворимого полимера и зернистого наполнителя. У такого экрана при установке фильтра в водоносном горизонте происходит постепенное растворение полимера, а зернистый наполнитель образует обсыпку.

Требуемая степень снижения уровня подземных вод в настоящее время весьма редко учитывается при выборе конструкции как фильтра, так и всей водоприёмной части скважины. Однако этот фактор играет основную роль, так как является целью эксплуатации системы осушения. Оборудование скважин фильтрами, обладающими высокими гидравлическими сопротивлениями и склонными в конкретных условиях к значительному увеличению этих сопротивлений в короткий промежуток времени, приводит к существенным потерям напора в фильтровой зоне (до 10 м и более). При этом даже большие понижения уровня в самой скважине не позволяют достичь необходимых остаточных напоров в пласте. Результатом является уменьшение расстояний между скважинами, увеличение их количества и удорожание системы осушения. Практически всегда, в особенности при некоторых системах подземной разработки месторождений, следует стремиться к сооружению водоприёмной части, имеющей отрицательные значения показателя обобщённого сопротивления в течение всего расчётного периода работы скважин.

Анализ гидрохимических и биологических условий связан с оценкой возможности выпадения в осадок кольматирующих соединений при изменении термодинамических параметров в водоносном горизонте и взаимодействия подземных вод с воздухом и фильтром. При интенсивном протекании химического и биологического кольматажа в прифильтровой зоне скважин и длительном периоде эксплуатации требуется установка фильтров с большой величиной скважности или изготовленного из инертных материалов.

Экономические факторы учитываются при оценке стоимости фильтра. Обычно в скважинах временного назначения устанавливаются менее дорогие фильтры, чем в скважинах, рассчитанных на длительный срок эксплуатации.

Анализ перечисленных факторов значительно усложняется вследствие их взаимодействия между собой, а также вероятностного характера их проявления в конкретной обстановке. Тем не менее, функционирование производства требует надёжной эксплуатации дренажных скважин в течение всего расчётного периода. Поэтому выбор конструкции фильтра и всей водоприёмной части является ответственной задачей, успешное решение

которой не всегда может быть обеспечено путём логических построений, основанных на уже выявленных закономерностях, но в любом случае обоснованный подход создаёт условия для более эффективной эксплуатации дренажных скважин.

5.4.3. Параметры фильтров скважин, оценка их гидравлических свойств

Фильтры скважин характеризуются геометрическими и гидравлическими параметрами. Для простых конструкций фильтров практически все параметры могут быть получены по аналитическим зависимостям, для сложных требуется дополнительно проведение стендовых испытаний.

К геометрическим параметрам фильтра относятся его диаметр, длина, форма и размеры пропускных отверстий, скважность и т.д. Среди гидравлических параметров наибольшее распространение получили комплексный показатель $\mu\eta$, связывающий скважность η и коэффициент расхода фильтра μ, сопротивление фильтра; показатель обобщённого сопротивления фильтра, являющийся также комплексной характеристикой, указывающей на общее сопротивление фильтра и прифильтровой зоны; коэффициент водопроницаемости фильтра. Эффективность фильтра оценивается также величиной удельного дебита скважины. Однако последний показатель большей частью зависит от фильтрационных свойств водоносного пласта, особенностей его вскрытия и освоения [159, 205].

Геометрические параметры фильтра в настоящее время подбираются однозначно в соответствии с уровнем технического развития, составом контактирующих пород, мощностью водоносного горизонта и величинами гидравлических потерь на несовершенство по степени вскрытия пласта.

Комплексный параметр $\mu\eta$ даёт представление о распределении потерь напора по длине фильтра. Достоинством этого параметра является учёт контактных сопротивлений и возможность его определения в лабораторных и полевых условиях (по данным расходометрии).

Сопротивление фильтра $\zeta_{2\phi}$ в чистом виде определяется по аналитическим зависимостям для простых конструкций фильтров, состоящих из трубчатого каркаса. В остальных случаях достоверность определения этой величины значительно снижается.

Показатель обобщённого сопротивления фильтра является одним из наиболее представительных параметров и может служить критерием эффективности той или иной конструкции водоприёмной части. Методика его определения позволяет выполнять оценочные работы в полевых условиях в различные периоды эксплуатации скважины и тем самым следить за динамикой изменения сопротивления и гидравлических потерь в

прифильтровой зоне во времени. В настоящее время имеется обширный фактический материал по величине этого показателя для разных конструкций фильтров в различных гидрогеологических условиях.

Коэффициент водопроницаемости фильтра оценивается сравнительно недавно. Достоинством этого показателя является возможность проведения испытаний на любых конструкциях фильтров, независимо от сложности водоприёмной поверхности, что позволяет производить объективную сравнительную оценку фильтров и вырабатывать направления в их конструировании. Коэффициент водопроницаемости фильтра по своему физическому содержанию идентичен коэффициенту фильтрации пород, что позволяет сопоставлять свойства фильтров с фильтрационными характеристиками пористой среды, в которой они устанавливаются. Результаты определений коэффициента водопроницаемости различных типов и конструкций фильтров приведены в разделе 5.3 и в работе [212].

По величине коэффициента водопроницаемости $К_1$ лучшими гидравлическими свойствами обладают каркасно–стержневые ($К_1$ = 1,5 – 2,5 см/с), спирально – проволочные ($К_1$ = 1,9 – 2,0 см/с) и приближающиеся к ним по этому параметру проволочные фильтры на трубчатом каркасе ($К_1$ = 0,42 – 1,8 см/с). Для сетчатых фильтров и фильтров с водоприёмной поверхностью из штампованного листа с трубчатым каркасом коэффициент водопроницаемости примерно в 5 раз меньше. Образцы блочных конструкций фильтров из пористого бетона характеризуются значениями $К_1$, равными 0,04 и 0,007 см/с; из титановой крошки - $К_1$, равными 0,016 и 0,002 см/с [213].

5.4.4. Материалы, применяемые для изготовления фильтров

Фильтры дренажных устройств изготавливаются из двух основных групп материалов – металлов и неметаллов.

Металлы являются основным, наиболее традиционным материалом. На горных предприятиях металлическими фильтрами оборудуется около 70% дренажных устройств. Это обусловлено тем, что металлические фильтры обеспечивают высокую прочность конструкции. Металлические фильтры простых конструкций изготавливаются из стали, реже из нержавеющей. Изготовление фильтров простых конструкций осуществляется двумя способами – перфорацией труб или жёстким скреплением отдельных элементов.

Для защиты металлических фильтров от коррозии могут применяться покрытия на основе цветных металлов (цинк, латунь) и химических составов на основе полимерных материалов.

Для подземных вод с высокой минерализацией возможно применение

фильтров из некорродируемых металлов (никеля, титана), а также фильтров блочного типа, получаемых спеканием металлических частиц. У таких фильтров высокая химическая стойкость обеспечивается за счёт образования на поверхности оксидной защитной плёнки.

Неметаллические фильтры изготавливаются в основном из керамики, гончарных труб, бетона, стеклосетки, гравия и пластмасс.

Фильтры из пористых материалов (керамики, пористого бетона, керамзито–бетона) используются в основном в горизонтальных дренажных устройствах (с применением песчаных гравийных обсыпок) с низкими дебитами и при относительно невысокой минерализации подземных вод.

Гравийно–клеевые фильтры получают склеиванием частиц гравия различными составами. Эти фильтры целесообразно применять в горизонтальных дренажных устройствах, хотя иногда они используются и в вертикальном дренаже.

Фильтры из пластмасс получают перфорацией полимерных труб. В качестве материала используется полиэтилен, поливинилхлорид, полимерные композиционные материалы. В сложных по конструкции фильтрах, с несколькими поверхностями фильтрации, используются сетки и шнуры из этих материалов.

Возможно использование полимерных композиционных материалов на основе стекломинерального наполнителя и эпоксидных связующих, которые обладают высокой механической прочностью, устойчивы к агрессивному воздействию минерализованных подземных вод.

5.4.5. Практика применения различных конструкций фильтров в скважинах при осушении месторождений

Наибольшее распространение при осушении месторождений твёрдых полезных ископаемых получили четыре типа фильтров: проволочные, с водоприёмной поверхностью из штампованного листа, сетчатые и фильтры-каркасы из перфорированных труб [214,215]. При оборудовании водопонижающих скважин и сквозных фильтров в рыхлых породах применяются в основном два первых типа. Ими оборудовано на разных месторождениях от 75 до 95 % скважин. В качестве примеров ниже описаны конструкции водоприёмной части дренажных скважин на отдельных железорудных месторождениях.

На водопонижающих скважинах и сквозных фильтрах дренажных систем карьеров Старооскольского железорудного района КМА применялись в основном проволочные фильтры с гравийной обсыпкой (95 % от общего количества). Фильтры имели длину, равную 0,4 – 0,7 мощности осушаемых пород, представленных песками со следующими параметрами: эффективный

диаметр d_{10} = 0,08 – 0,12 мм, средний диаметр d_{50} = 0,16 – 0,39 мм, коэффициент неоднородности $K_н \leq 5$. Каркас фильтров был перфорирован отверстиями круглой (20 % от общего количества) или щелевой формы. Скважность каркаса изменялась от 11 до 27 %. Проволочная обмотка имела зазоры от 0,5 до 2,0 мм, штампованный лист – до 1,0 мм. Гравийная обсыпка имела толщину до 70 мм, размер зёрен 2 – 6 мм.

На скважинах систем осушения железорудных карьеров РК КАЗАХСТАН также применялись проволочные фильтры с гравийной обсыпкой. Осушаемые породы были представлены песками с характерными параметрами: d_{10} = 0,007 – 0,053 мм, d_{50} = 0,11 – 0,67 мм, $8 \leq K_н < 50$. Каркасы фильтров были перфорированы круглыми (около 75 % от общего количества) или щелевыми отверстиями. Скважность каркасов изменялась от 17 до 28 %. Водоприёмная поверхность выполнялась из нержавеющей проволоки с зазором между витками 1 – 2 мм. Обсыпка фильтров выполнялась из гравия с размером зёрен 1 – 7 мм [214].

На водопонижающих скважинах Южно – Белозёрского месторождения преимущественно использовались фильтры проволочные и из штампованного листа на трубчатом каркасе. Параметры дренируемых песков: d_{10} = 0,06 – 0,18 мм, d_{50} = 0,27 – 0,9 мм, $3 < K_н < 13$. Пропускные отверстия на каркасах в основном щелевые (до 80 %), скважность каркаса изменялась от 10 до 25 %. Проволочная обмотка имела зазоры между 0,5 – 1,5 мм (без гравийной обсыпки) и 1,0 – 3,5 мм (с гравийной обсыпкой). Штампованный лист имел отверстия 1,0 – 1,5 мм (при установке фильтра без обсыпки) и 2,5 – 3,0 мм (при наличии гравийной обсыпки). 40 % скважин было оборудовано гравийной обсыпкой уширенного контура (толщина достигала 500 мм) [204].

На всех месторождениях применяемые фильтры не имели антикоррозийного покрытия. Период эффективной работы составлял 2 – 3 года при толщине гравийной обсыпки до 70 мм и 5 – 7 лет при увеличении толщины до 500 мм. Показатель обобщённого сопротивления в первые года эксплуатации на высокодебитных скважинах достигал значений – 4,0.

Завышение коэффициента межслойности при подборе гравийной обсыпки приводило к снижению дебитов скважин до 10 $м^3$/ч (вследствие механической кольматации фильтра и прифильтровой зоны).

При отсутствии гравийных обсыпок в большинстве случаев для высокодебитных скважин отмечался устойчивый во времени вынос песка из водоносного горизонта в количествах, превышающих допустимые нормы.

В восстающих скважинах основное применение находят фильтры – каркасы и проволочные фильтры. Скважность фильтров не превышает 10 – 15 %. Размеры пропускных отверстий при исключении выноса песка находятся в пределах среднего диаметра частиц, контактирующих с

фильтром пород, при формировании естественной обсыпки или каверны в прифильтровой зоне ширина щелей увеличивается до 3 – 5 мм. Иногда фильтры для восстающих скважин имеют второй каркас (из перфорированной трубы), предназначенный для защиты собственно фильтра от заглинизации при бурении водоупорных глинистых слоёв.

Конструкции фильтров на дренажных системах указанных месторождений обеспечили их высокую механическую прочность, производительность скважин в пределах 30 – 80 $м^3$/ч в первые три года эксплуатации (на Южно – Белозёрском месторождении дебиты скважин достигали 300 $м^3$/ч), позволяли применять на скважинах различные методы интенсификации водоотбора.

К числу основных недостатков конструкций водоприёмной части следует отнести отсутствие защиты от химической кольматации, и вследствие этого наблюдалось заметное снижение дебитов скважин после 2 - 3 лет работы. Не учитывалась также дифференциация конструкций по структурному расположению скважин в системе осушения. Конструкция фильтра не всегда рассчитывалась из требования достижения необходимой степени осушения месторождения в заданные сроки.

5.4.6. Подбор оптимальных параметров фильтров дренажных скважин и определение межремонтного периода

Интенсификация работы дренажных скважин может быть достигнута выбором рациональной конструкции водоприёмной части, имеющей наилучшие гидравлические показатели на протяжении всего расчётного периода работы скважин.

Задача об определении параметров водоприёмной части дренажных скважин, сооружаемых в рыхлых водоносных отложениях, формируется следующим образом. Требуется подобрать такие геометрические характеристики r_1, r_2 r_3 и $r_к$, которые соответствуют радиусам фильтра, радиусу прифильтровой зоны и зоны кольматажа, и гидравлические параметры $К_1$ и $К_2$, соответствующие коэффициентам водопроницаемости фильтра и фильтрации гравийной обсыпки (прифильтровой зоны), чтобы в течение расчётного периода времени $t_р$ скважина работала с наибольшей эффективностью [212]. Следует также учесть, что через определённый промежуток времени (межремонтный период), равный $t_м$, на скважине могут проводиться работы по улучшению гидравлических свойств водоприёмной части.

Гидравлические свойства водоприёмной части комплексно выражаются через показатель обобщённого сопротивления, который определяется из выражения [205]

$$\zeta = 2\left(\frac{K_3}{K_1}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{K_3}{K_2}\ln\frac{r_3}{r_2}\right)+\left(\frac{K_3}{K_2}\exp 3\frac{t}{\tau_0}-1\right)\ln\frac{r_k}{r_1}, \qquad (5.23)$$

где K_3 – коэффициент фильтрации водоносного пласта;
τ_0 – время релаксации, мес.;
t- время эксплуатации скважины, мес.
Из зависимости (5.23) следует, что при выполнении условия

$$\frac{K_3}{K_2}\exp(3\frac{t}{\tau_0})\geq 1 \qquad (5.24)$$

показатель обобщённого сопротивления скважины будет положительным. В этом случае коэффициент фильтрации прифильтровой зоны K_2 всегда меньше коэффициента фильтрации пласта K_3. Поэтому, начиная с момента выполнения условия $\zeta = 0$, гравийная обсыпка и фильтр, предназначенные для улучшения гидравлических свойств прифильтровой зоны, теряют свой основной конструктивный смысл. Время, когда наступает равенство $\zeta = 0$, можно считать максимальным пределом времени эффективной эксплуатации $t_э$, при $t \geq t_э$ эксплуатация скважины становится неэффективной.

Для подбора параметров водоприёмной части, обеспечивающих эффективную работу скважины в течение требуемого времени, следует выполнить многовариантные расчёты по зависимости (5.23) при $\zeta = 0$ и ограничениях технического характера:

$$r_k > r_1 e^{A-\zeta}; \qquad (5.25)$$

$$A = \frac{K_3}{K_1}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{K_3}{K_2}\ln\frac{r_3}{r_2}; \qquad (5.26)$$

$$r_1 < r_2 < r_3 < r_k; \qquad (5.27)$$

$$K_3 < K_1 < K_2; \qquad (5.28)$$

$$r_1 \leq r_{1g}; \quad r_2 \leq r_{2g}; \qquad (5.29)$$

$$K_1 \leq K_{1g}; \qquad K_2 \leq K_{2g}; \qquad (5.30)$$

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 8 \div 12; \qquad (5.31)$$

$$t_m \leq t_p, \qquad (5.32)$$

где r_{1q}, r_{2q} – допустимые значения соответственно внутреннего и внешнего радиуса фильтра, см;

K_{1q}, K_{2q} – допустимые значения соответственно коэффициента водопроницаемости фильтра и гравийной обсыпки (прифильтровой зоны);

D_{50} – средний диаметр частиц обсыпки, см;

d_{50} – средний диаметр частиц песка водоносного пласта, см.

Выполнение расчётов по зависимости (5.23) может производиться на ЭВМ по программе, блок – схема которой представлена на рис. 5.8.

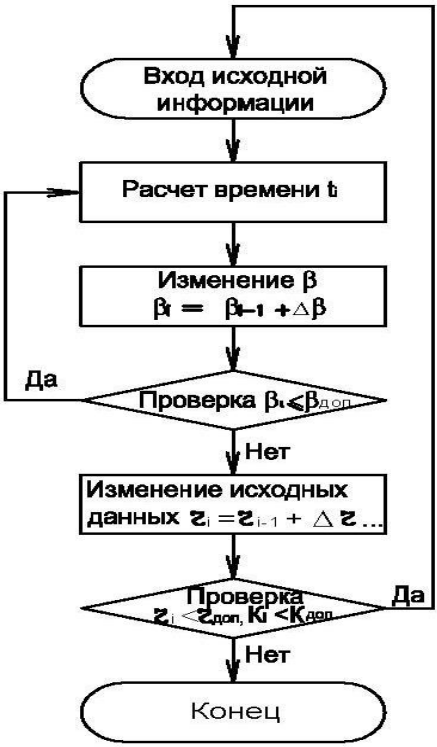


Рис.5.8. Блок-схема для расчёта времени эксплуатации скважин

Ниже приводятся результаты анализа расчётов по вариантам, представляющим наибольший практический интерес (рис. 5.9 – 5.12).

Наибольшее влияние на величину времени эффективной работы скважины оказывает изменение гидродинамических параметров K_3/K_2 и K_3/K_1. При этом для малых величин этих параметров основным является

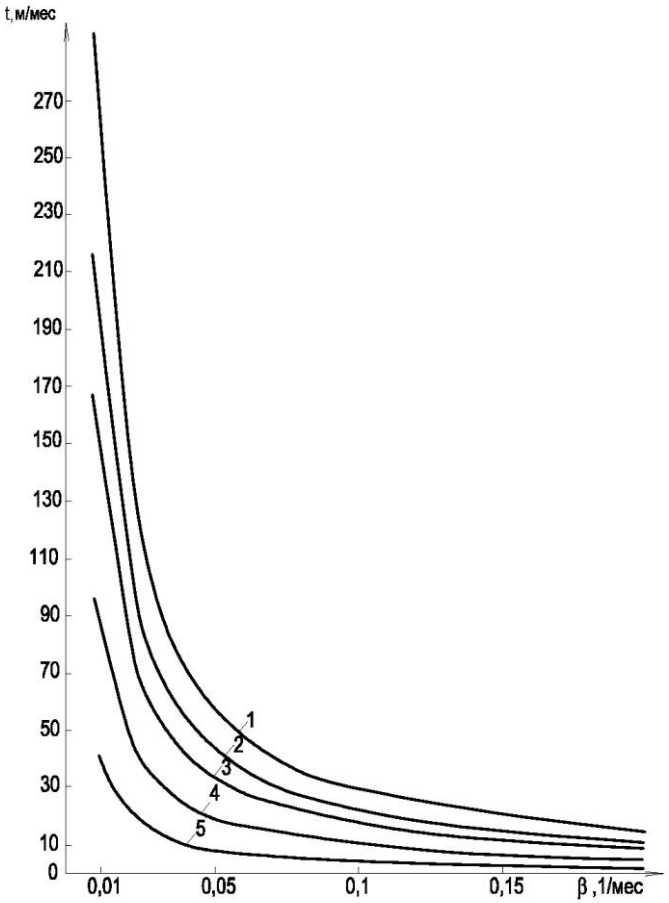


Рис.5.9. Изменение времени эффективной работы скважины в зависимости от кольматажа при равных конструктивных параметрах водоприемной части:

1 – при K_3/K_1=0,1; K_3/K_2=0,05;
ζ_1=0,14 м; ζ_2=0,15 м; ζ_3=0,2 м; $\zeta_к$=0,25 м;
2 – то же, соответственно 0,2; 0,1; 0,19 м; 0,2 м; 0,25 м; 0,3 м;
3 – то же, 0,3; 0,15; 0,24 м; 0,25 м; 0,3 м; 0,35 м;
4 – то же, 0,5; 0,25; 0,34 м; 0,35 м; 0,4 м; 0,45 м;
5 – то же, 0,7; 0,35; 0,44 м; 0,45 м; 0,5 м; 0,55 м

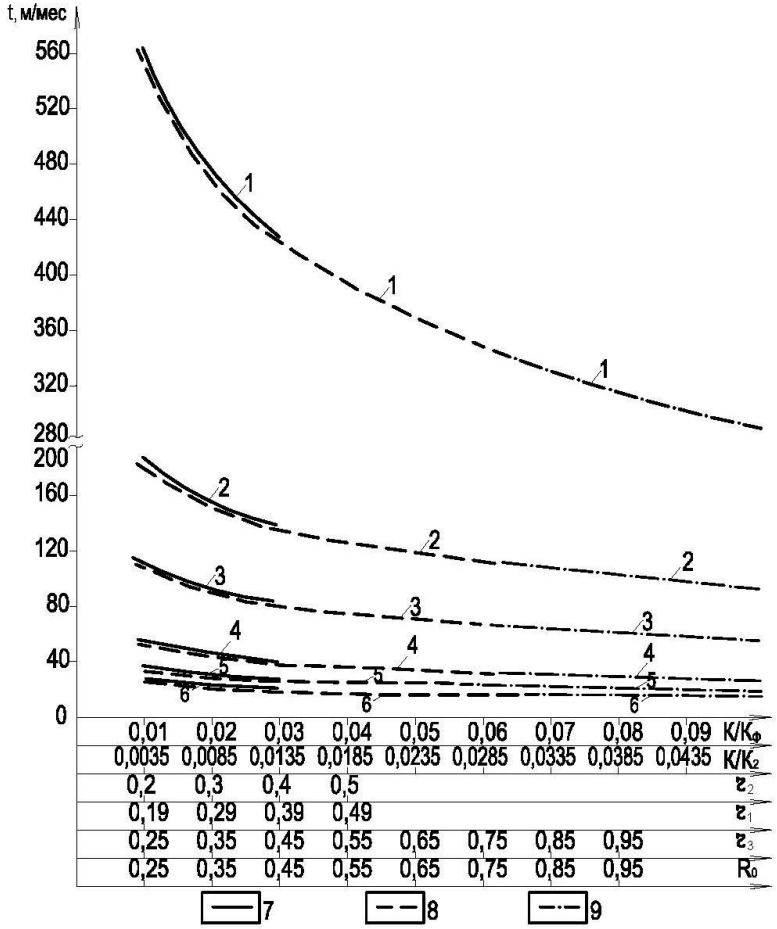


Рис.5.10. Изменение времени эффективной эксплуатации скважины в зависимости от конструктивных параметров водоприемной части при различной интенсивности кольматажа:
1 – при β=0,01 мес$^{-1}$; 2 – то же, 0,03 мес$^{-1}$; 3 – то же, 0,05 мес$^{-1}$; 4 – то же, 0,1 мес$^{-1}$; 5 – то же, 0,15 мес$^{-1}$; 6 – то же,0,2 мес$^{-1}$; 7 – изменяются величины K_3/K_1, K_3/K_2, ζ_1, ζ_2, ζ_3, $\zeta_к$; 8 – изменяются величины K_3/K_1, K_3/K_2, ζ_3, $\zeta_к$ при ζ_1=0,14 м; ζ_2=0,15 м; 9 – изменяются величины K_3/K_1, K_3/K_2 при ζ_1=0,14 м; ζ_2=0,15 м; ζ_3=0,20 м; $\zeta_к$=0,20 м

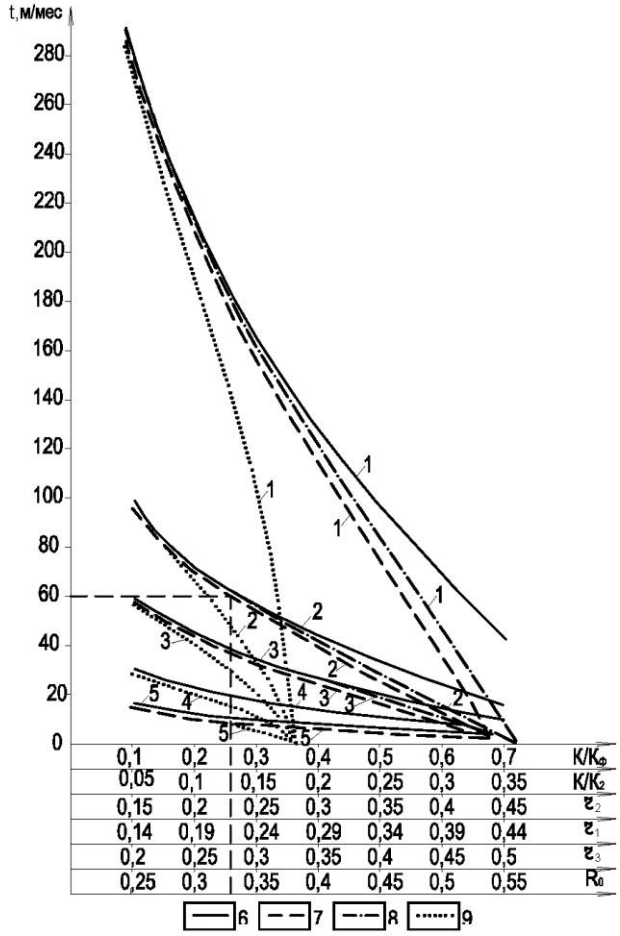


Рис.5.11. Изменение времени эффективной эксплуатации скважины в зависимости от конструктивных параметров водоприемной части при различной интенсивности кольматажа:

1 – при β=0,01 мес$^{-1}$; 2 – то же, 0,03 мес$^{-1}$; 3 – то же, 0,05 мес$^{-1}$; 4 – то же, 0,1 мес$^{-1}$; 5 – то же, 0,2 мес$^{-1}$; 6 –изменяются величины K_3/K_1, K_3/K_2, ε_1, ε_2, ε_3, $\varepsilon_к$; 7 – изменяются величины K_3/K_1, K_3/K_2, ε_3, $\varepsilon_к$ при ε_1=0,14 м; ε_2=0,15 м; 8 – изменяются величины K_3/K_2, ε_3, $\varepsilon_к$ при K_3/K_1=0,1; ε_1=0,14 м; ε_2=0,15 м; 9 - изменяются величины K_3/K_2 ε_3 при K_3/K_1=0,1; ε_1=0,14 м; ε_2=0,15 м; $\varepsilon_к$=0,21 м

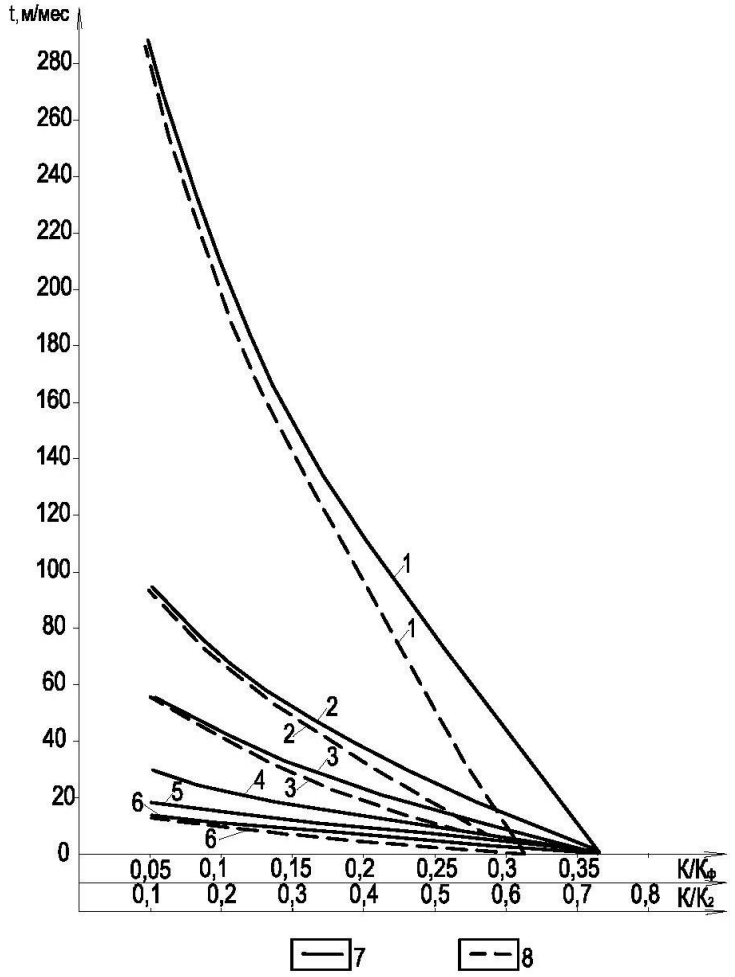


Рис.5.12. Изменение времени эффективной эксплуатации скважины от конструктивных параметров водоприемной части при различной интенсивности кольматажа:

1 – при β=0,01 мес$^{-1}$; 2 – то же, 0,03 мес$^{-1}$; 3 – то же, 0,05 мес$^{-1}$; 4 – то же, 0,1 мес$^{-1}$; 5 – то же, 0,15 мес$^{-1}$; 6 – то же, 0,2 мес$^{-1}$; 7 - изменяются величины K_3/K_2 при начальных значениях остальных параметров; 8 – изменяются величины K_3/K_1 и K_3/K_2 при начальных значениях остальных параметров

изменение $К_3/К_2$, т.е. фильтрационных свойств и состава сооружаемой в прифильтровой зоне гравийной обсыпки. При значениях $К_3/К_2$ от $2{,}5*10^{-3}$ до $5*10^{-2}$ и одной и той же величине $\beta = 1/\tau_0$ изменение других параметров (r_1, r_2, r_3, $r_к$, $К_3/К_1$) оказывают весьма несущественное влияние.

Увеличение интенсивности кольматажа существенно снижает во времени эффективность работы скважин. Так, при $\beta = 0{,}05$ и значениях параметров $К_3/К_1 = 0{,}1$; $К_3/К_2 = 0{,}05$; $r_1 = 0{,}14$ м; $r_2 = 0{,}15$ м; $r_3 = 0{,}2$ м; $r_к = 0{,}25$ м период эффективной работы $t_э = 58$ мес., увеличение же β в 2 и 3 раза приводит к уменьшению $t_э$ до 30 и 20 мес.

Преобладающее влияние изменения $К_3/К_2$ сохраняется до значений $К_3/К_1 = 0{,}1/0{,}2$ и $К_3/К_2 = 0{,}05/0{,}1$ (см.рис. 5.11, 5.12). Для $К_3/К_2 = 0{,}05/0{,}1$ и $\beta = 0{,}01$ мес$^{-1}$ время эффективной работы скважины составляет 294 и 208 мес., соответственно, в случае изменения двух параметров одновременно ($К_3/К_2 = 0{,}05/0{,}1$ и $К_3/К_1 = 0{,}1/0{,}2$) различие в продолжительности $t_э$ не превышает 2%.

Влияние изменения геометрических параметров водоприёмной части на период эффективной эксплуатации скважин показывает, что варьирование только этими величинами нецелесообразно. Можно отметить, что при уменьшении r_2/r_1 время $t_э$ несколько увеличивается.

В целом из анализа расчётов следует, что увеличение или уменьшение геометрических, или гидравлических параметров приводит к изменению времени эффективной эксплуатации скважины. Наиболее сильное влияние оказывает параметр, характеризующий соотношение коэффициентов фильтрации пласта и гравийной обсыпки ($К_3/К_2$). Во всех рассмотренных вариантах, учитывающих этот параметр, интенсивность изменения $t_э$ резко возрастала, и при достаточно большом значении $К_3/К_2$ время эффективной эксплуатации скважины уменьшалось до 1 мес.

Время эффективной эксплуатации скважины $t_э$ позволяет, исходя из технического состояния водоприёмной части, обосновать начало ремонта скважин (т.е. улучшение состояния прифильтровой зоны). Однако условие $\zeta = 0$ не является необходимым и достаточным для проведения самих ремонтных работ, оно должно быть увязано с критериями эксплуатации всей дренажной системы.

В качестве критериев процесса осушения могут использоваться требуемая величина понижения уровня подземных вод $S_к$ и (или) допустимая величина водопритока в горную выработку $g_{доп}$. С учётом этих критериев могут быть записаны следующие выражения:

$$\zeta < 0, S < S_k \quad \text{или} \quad g > g_{gon}; \tag{5.33}$$

$$\zeta \geq 0, S < S_K \quad \text{или} \quad g > g_{gon}; \tag{5.34}$$

$$\zeta < 0, S \geq S_K \quad \text{или} \quad g \leq g_{gon}; \tag{5.35}$$

$$\zeta \geq 0, S \geq S_K \quad \text{или} \quad g \leq g_{don}. \qquad (5.36)$$

В условиях (5.33 – 5.36) главное значение имеют $S_к$ и $g_{доп}$, обеспечивающие безопасную отработку месторождения. Если для какого-то участка системы осушения выполняется условие (5.36), то проведение ремонтных работ в скважинах не является обязательным, хотя величина $\zeta \geq 0$ на отдельных скважинах, но критерии осушения выполняются. При условии (5.35) вообще нет необходимости в ремонтных работах.

Условие, которое указывает, что на скважинах необходимо проведение ремонтных работ по улучшению гидравлических свойств фильтровой зоны, записывается в виде (5.34), т. е. время, когда справедливым становится выражение (5.34), и является межремонтным периодом для скважины.

Выражение (5.33) свидетельствует о том, что, несмотря на выполнение основных критериев осушения по величинам понижения уровня и водопритока, проведение ремонтных работ на скважинах нецелесообразно, более эффективными будут другие мероприятия (например, сооружение дополнительных скважин).

При практическом назначении $t_м$ для дренажных устройств следует учитывать также время, необходимое на выполнение соответствующих проектных проработок и проведение самих технологических операций по ремонту скважин.

Пример. Требуется подобрать гидравлические параметры и конструкцию фильтра для восстающих скважин с водоприёмной частью, оборудуемой в песках. Коэффициент фильтрации песков водоносного горизонта составляет 1 м/сут. Мощность водоносного горизонта 20 м. По техническим условиям наружный радиус фильтра составляет 0,15 м, внутренний 0,14 м. Срок эксплуатации скважины 10 лет, интенсивность кольматажа по опытным данным составляет 0,03 мес$^{-1}$.

По графикам рис. 5.11 имеем, что при такой интенсивности кольматажа и реальных значениях радиусов фильтра эффективная работа скважины в течение 120 мес. не может быть обеспечена без проведения ремонтных работ. Разбив расчётное время на два интервала по 60 мес. и считая, что при ремонтных работах гидравлические свойства фильтра восстанавливаются на 100 %, получаем, что отношение $К_3/К_2 = 0,15$, а $К_3/К_1 = 0,27$ или $К_1 = 4$ м/сут, а $К_2 = 7$ м/сут.

Учитывая, что сооружение восстающих скважин предполагает бурение фильтровой колонной, фильтр должен иметь повышенную механическую прочность. Этому условию соответствует фильтр на основе трубчатого каркаса. Исходя из значения $К_1$, скважность фильтра может составлять до 5%. Проницаемость прифильтровой зоны должна быть увеличена в 7 раз. Для восстающих скважин единственным технически осуществимым приёмом

увеличения проницаемости прифильтровой зоны является вынос песка из этой зоны. Из рис. 5.11 следует, что радиус выноса песка составляет около 30 см, а по значению $К_2$ = 7 м/сут должны быть вынесены частицы от пылеватых до мелкозернистых включительно. Диаметр отверстий фильтра при выносе мелкозернистых частиц должен составлять с учётом сводообразования около 1 – 2 мм. Через 5 лет работы, если будет выполняться условие (5.34), на скважине следует провести ремонтные работы по восстановлению гидравлических свойств фильтра и, возможно, прифильтровой зоны или сооружение новой скважины.

5.4.7. Параметры кольматации фильтров скважин

Кольматация дренажных скважин связана с нарушением естественного режима подземных вод при эксплуатации систем осушения. Причём время релаксации системы вода – порода – фильтр превышает период стабильной работы практически всех видов дренажных устройств.

Оценка параметров химического кольматажа может быть выполнена по изменению величины сопротивления прифильтровой зоны $\xi_к$ с использованием коэффициента кольматации $\gamma_{ср}$ по зависимости [195]:

$$\xi_k(t) = \left[\frac{K_3}{K_\varphi}\exp(3\Delta C\gamma_{cp}e) - 1\right]\ln\frac{R_o}{R_\varphi}, \qquad (5.37)$$

где $К_\varphi$ - коэффициент фильтрации прифильтровой зоны;

ΔC – изменение концентрации фильтрующих веществ в зоне кольматажа;

$\gamma_{ср}$ – среднее значение коэффициента кольматации;

t –время;

R_o – радиус контура питания;

R_φ -радиус зоны кольматажа.

Решение уравнения (5.37) возможно графико-аналитическим методом с построением графиков изменения сопротивления в координатах $\ln((\xi/\ln R_o/ R_\varphi)+1)$ и t.

По углу наклона прямой, полученной в данных координатах, находят величину $1{,}305\Delta C\gamma_{ср}$.

При работе систем осушения, когда смещение химического равновесия в подземных водах происходит в значительной по размерам зоне созданного возмущения в водоносном пласте, интенсивность кольматации может оцениваться с использованием соотношения [195]

$$q_t = q_o e^{-\beta t}, \qquad (5.38)$$

где q_t – текущий удельный дебит скважины;

q_o – начальный удельный дебит;

β - коэффициент старения скважины, учитывающий изменение её производительности в связи с кольматацией.

Выполнение гидравлического прогноза кольматажа скважин на основе зависимости (5.38) предполагает наличие известных удельных дебитов скважин. Оценка величин g_t часто затруднена, так как на дренажных скважинах обычно отсутствуют затрубные пьезометры и уровень воды в скважине неизвестен. Для нахождения удельных дебитов в таких условиях можно воспользоваться следующим приёмом [216, 195]. По данным режимных наблюдений за изменением уровня поземных вод в пределах системы осушения строятся карты гидроизогипс на каждый месяц её эксплуатации. Понижение уровня в скважине определяется исходя из имеющейся величины его статического положения и гидроизогипсы, проходящей от скважины на расстоянии, не превышающем мощность водоносного горизонта. Дальнейшая вычислительная схема строится следующим образом:

- в соответствии с найденной величиной понижения (S) и имеющимся дебитом скважины (Q) рассчитываются удельные дебиты q = (Q/S);
- методом наименьших квадратов полученные данные по изменению q_t/q_o аппроксимируются экспоненциальной функцией, определяется аналитическое представление искомой функции и коэффициент старения (β);
- строится фактический график изменения q_t/q_o от t, который совмещается с графиком рассчитанной аналитической функции, и уточняется значение коэффициента (β);
- производится статическая обработка полученных значений для однотипных дренажных устройств с одинаковой конструкцией водоприёмной части и находящихся в аналогичных гидрогеологических условиях. Рассчитываются основные обобщающие характеристики: среднее арифметическое, коэффициент вариации, доверительные интервалы, выборочная энтропия.

5.4.8 Сравнительная характеристика параметров кольматажа различных конструкций водоприёмной части скважин

Расчёты показателей кольматажа дренажных скважин Южно – Лебединского месторождения КМА (16 водопонижающих скважин), Южно – Белозёрского в Украине (10 водопонижающих скважин), Соколовского в Казахстане (14 восстающих скважин и 11 сквозных фильтров) по зависимости (5.38) даны в табл. 5.4 – 5.6 [6].

Таблица 5.4 - Показатели кольматажа дренажных скважин

Показатель	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Доверительные пределы
Коэффициент старения, мес.$^{-1}$	0,049	0,018	37	$\pm$ 0,0096
Начальный удельный дебит, м^3/ч·м	3,370	1,310	39	$\pm$0,56

Таблица 5.5 - Изменение показателей кольматажа дренажных скважин при разной конструкции водоприёмной части

Номер скважины	Тип фильтра и конструкция водоприёмной части	Начальный удельный дебит, м^3/ч·м	Коэффициент старения, $\beta \cdot 10^{-2}$ мес$^{-1}$
1	2	3	4
98	Проволочный с уширенным контуром гравийной обсыпки	7,33	1,3
149	То же	5,56	2,4
147	То же	6,63	5,0
99	Фильтр с водоприёмной поверхностью из штампованного листа с уширенным контуром гравийной обсыпки	6,24	2,6
94	То же	3,76	1,8
107	Проволочный	4,58	5,1
110	То же	3,95	6,7
113	Сетчатый	7,3	9,8
139	Фильтр с водоприёмной поверхностью из штампованного листа	3,78	4,2
134	Проволочный и с водоприёмной поверхностью из штампованного листа	0,91	4,1

Таблица 5.6 - Результаты статистической обработки

Тип дренажного устройства	Среднее арифметическое	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %	Доверительные пределы
Коэффициент старения, $мес^{-1}$				
Сквозные фильтры	0,047	0,021	43,0	±0,014
Восстающие скважины	0,036	0,009	25,4	±0,006
Начальный удельный дебит, $м^3/ч \cdot м$				
Сквозные фильтры	0,42	0,26	59,5	±0,14
Восстающие скважины	0,35	0,18	51,5	±0,09

Анализ приведенных данных свидетельствует о преимуществе дренажных скважин, имеющих уширенный контур гравийной обсыпки, до 1000 мм [195]. Коэффициент старения для них составляет в основном $(1,3-2,6)*10^{-2}мес^{-1}$, что свидетельствует о минимальной интенсивности процессов кольматажа. Наибольшие значения коэффициента старения получены по скважинам без гравийной обсыпки: так, при установке сетчатого фильтра он был равен $9,8*10^{-2}мес^{-1}$.

Для водопонижающих скважин Южно–Лебединского карьера, оборудованных проволочными фильтрами с гравийной обсыпкой, коэффициент старения в среднем составляет $(0,049 +-0,0096)$ $мес^{-1}$. На Соколовском месторождении средний коэффициент старения для восстающих скважин, водоприёмная часть которых оборудована проволочным фильтром, равен $(0,036+-0,006)$ $мес^{-1}$, для сквозных фильтров, где установлены проволочные фильтры с гравийной обсыпкой, $-(0,047+-0,014)$ $мес^{-1}$.

Исходя из параметров кольматажа дренажных скважин и межремонтного периода, следует наиболее перспективным в конструкции водоприёмной части считать сочетание проволочных фильтров с уширенным контуром гравийной обсыпки. Коэффициент старения для этих скважин имеет минимальные значения. Применение скважин с сооружением мощной гравийной обсыпки удлиняет срок их службы и сокращает эксплуатационные расходы.

Формулируя в целом требования, вытекающие из рекомендаций по применению рациональных типов фильтров, следует указать основные положения, которые нужно учитывать при разработке типовых конструкций

водоприёмной части дренажных скважин. К ним относятся: установка фильтров с высокими гидравлическими показателями для данных гидрогеологических условий; коэффициент водопроницаемости фильтра должен в 20 – 30 раз превышать коэффициент фильтрации пласта; применение фильтров на основе трубчатого каркаса и дополнительной водоприёмной поверхности (проволочная обмотка, штампованный лист и так далее) должно обосновываться необходимостью увеличения прочностных характеристик; конструктивно скважность (суммарная скважность) фильтра при эксплуатации дренажных устройств более 2 – 3 лет должна быть не менее 10 %; в большинстве случаев фильтр должен иметь антикоррозийное покрытие; применение мощных гравийных обсыпок (до 1000 мм на сторону); расчёт фильтров из условия выноса до 70 % частиц водоносного горизонта (формирование водоприёмных каверн).

Перспективные конструкции фильтров для некоторых типов дренажных скважин рассмотрены в разделах 6.8 и 10.

5.5. Технические средства для сооружения вертикальных скважин на воду

Ранее было отмечено, что при сооружении скважин на воду разработаны и используются три способа бурения: ударно-канатный, вращательный с промывкой скважины растворами и вращательный с прямой и обратной промывкой скважины водой.

Принцип ударно-канатного бурения основан на проходке скважины под защитой обсадной колонны, идущей с некоторым отставанием от породоразрушающего инструмента. Разрушение породы осуществляется путём сбрасывания с определенной высоты бурового долота. Глубина его внедрения зависит от физико-механических свойств горных пород и конструктивных особенностей долота. На скорость разрушения забоя влияет также частота ударов, нанесённых долотом по забою. Бурение ведётся заходками. Разрушенная за заходку порода извлекается другим инструментом – желонкой. В ряде случаев, когда в разрезе встречаются слабые грунты, разрушение породы и её извлечение совмещается. Для этих случаев предусмотрены специальные породоразрушающие инструменты – стаканы. Ввиду того, что породоразрушающие инструменты при ударном бурении при свободном падении совершают отклонение от вертикали, сечение скважины ниже башмака обсадной колонны бывает, как правило, больше диаметра колонны, вследствие чего колонна под действием собственного веса опускается вниз. Когда веса колонны недостаточно для преодоления сил трения, препятствующих её спуску, колонну опускают вниз принудительно. В этом случае она либо забивается специальным ударником с

большой массой, либо задавливается гидравлическими домкратами.

Как следует из вышеприведенного краткого описания технологического процесса бурения, ударно-канатный способ требует большого разнообразия породоразрушающих инструментов, глубоких знаний физико-механических свойств пород, понимания физических процессов, происходящих на забое скважины, состояния скважин в зоне нахождения обсадной колонны. Ещё сложнее осуществляется процесс проходки влажных пород, находящихся выше водоносного горизонта и вскрытие самого водоносного горизонта. Для реализации этого способа были созданы эффективные буровые станки УКС-22, УКС-22 М1, УКС-30, УКС-3-М1, которые модернизируются и используются в регионах.

Сложность проходки скважины, трудоёмкость, осложнения, большой расход обсадных колонн, низкая производительность вызвали необходимость разработки более совершенного бурового оборудования:

в строительстве – для проведения изысканий, направленных на изучение физико-механических свойств горных пород, гидрогеологических условий, создания наблюдательной сети скважин за режимом грунтовых вод, оценки влияния их химсостава на фундаменты, изучения подтопления и др.;

в геологии – для изучения строения геологических структур, поисков месторождений полезных ископаемых, определения их форм, структуры и запасов;

в горном деле – для снижения уровней подземных вод до безопасного, позволяющих проводить разработку месторождений как открытым, так и подземным способами, проведения укрепления откосов бортов карьеров, проведения специальных работ, связанных с замораживанием горных пород и т.д.;

в коммунальном, сельском хозяйстве, мелиорации - для водоснабжения населения промышленных и сельскохозяйственных объектов, для орошения и осушения земель и т.д.

Для решения такого огромного круга задач были задействованы учебные, научно-исследовательские и производственные организации имевших свои КБ и опытно-промышленные заводы. Конкретными примерами могут служить СКБ и ВИТР, разработавшие взамен станков серии ЗИФ (ЗИФ 300, ЗИФ 650, ЗИФ 1200А) параметрический ряд бурового оборудования серии ОКБ для бурения скважин глубиной от 25 м и до 3000 м [217, 218]. В параметрическом ряду основным классифицирующим фактором взята глубина сооружаемых скважин. Созданное оборудование позволяет бурить скважины в следующих диапазонах:

0-25 м – установка УКБ-1,

50-100 м – установка УКБ 50/100, комплектуется буровым станком СКБ-4,

100-300 м – установка УКБ 200/300 (УКБ-4П), комплектуется буровым станком СКБ,

300-500 м – установка УКБ 300/500 (УКБ-5П), комплектуется буровым станком СКБ-4,

500-800 м – установка УКБ 500/800, комплектуется СКБ-5,

800-1200 – установка УКБ 800/1200 (УКБ-7П), комплектуется станком СКБ-7, ЗИФ 1200МР,

1200-2000 – установка 1200/2000, комплектуется станком СКБ-7,

2000-3000 – установка 2000/3000, комплектуется станком СКБ-8.

Технические характеристики, особенности конструктивного исполнения этих установок изложены в работах [158, 217, 218 и др.]

В институте ВИОГЕМ разработан параметрический ряд установок:

для сооружения водозаборных скважин из подземных горных выработок высотой от 2,5 до 3,5 м с напорами на устье до 50 атм.;

для сооружения горизонтальных дренажных (водозаборных) скважин с уступов бортов карьеров создана установка УКД-70, для сооружения аналогичных скважин из шахтных стволов диаметром 4,0 м установки УЛБ-130 и УЛБ-130М.

Для решения задач при проведении гидрогеологических изысканий, сооружения сети наблюдательных и водозаборных скважин в условиях сельской местности, бездорожья МГРИ совместно с Щигровским заводом разработали и наладили выпуск установок УГБ-50, УГБ-50М. В дальнейшем, с учётом современных требований, ЗАО «ГЕОМАШ» создал более мощные установки, позволяющие вести бурение в широком спектре гидрогеологических условий различными способами: шнеками, ударно-вращательным, с промывкой до глубины 500 м и удлинённой штангой длиной от 2200 до 3400 мм (в зависимости от конструктивного исполнения). К таким установкам следует отнести самоходные буровые установки ПБУ-2, смонтированной на шасси автомобиля УРАЛ 4320, КАМАЗ 43114, ЛБУ-50 на базе ЗИЛ 131А, ЗИЛ 43344; вездеходные на транспортной базе гусеничных транспортёров МТЛБ-У, ТГМ-126, ТТ-4.

Параметрический ряд установок, выпускаемых «ГЕОМАШ» позволяют выполнять следующие виды работ:

- бурение сейсморазведочных скважин;
- бурение инженерно-геологических и технических скважин ударно-забивным способом;
- вращательное колонковое бурение;
- бурение гидрогеологических и инженерно-геологических скважин с применением широкого спектра промывочных агентов, в т.ч. и водой;
- инженерно-геологические изыскания посредством статического зондирования;

- вести ударно-вращательное бурение скважин различного назначения;
- вести бурение скважин на воду с обратной промывкой (установка УБВ-600).

Основные технические данные установок ОАО «ГЕОМАШ» приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Основные технические характеристики наиболее широко применяемых буровых установок ОАО «ГЕОМАШ»

№ п/п	Технические характеристики установок	ЛБУ-50	ПБУ-2	УШ-2Т4	УБВ-000
1	2	3	4	5	6
1.	Максимальный крутящий момент на шпинделе, кГс·м	2000	500	750	1200
2.	Частота вращения шпинделя, об/мин.	14…101	28…204 при 3-х скоростной коробке передач	40…240	14…268
3.	Максимальное усиление передачи, кГс	4000	3000	5650	5000
4.	Мах усилия обратного хода, кГс	12000	1000	12000	12000
5.	Длина хода подачи, мм	3250	2200/3400	3000	7000
6.	Грузоподъёмность лебедки на прямом канате, кГс	3250	2600	-	3000
7	Условная глубина бурения, м				
	- ударно-забивными снарядами	25	25	-	300
	- шнеками	70	50	60	≈70÷80
	- шнековым буром	16	16	-	16÷20
	- вращательное с промывкой	200	500	200	300
	- вращательное с продувкой	100	100	100	100
	- ударно-вращательное с применением погружных ударных машин	200	500	-	-

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5	6
	- ударно-вращательное с применением погружных пневмоударных машин	50	50	-	-
8.	Диаметр бурения, мм				с прямой промывкой: начальный 600 мм конечный 215 мм диаметр бур.труб 73, 89 диаметры двойных буриль-ных
	- ударно-забивными снарядами	135	135	-	
	- шнеками	500	250	-	
	- шнековым буром	1050	850	-	
	- вращательное с промывкой	250	250	165, 650	
	- вращательное с продувкой	132	132	-	
	- ударно-вращательное с применением погружных гидроударных машин	132	132	-	
	- ударно-вращательное с применением погружных пневмоударных машин	132	132	-	
9.	Шасси	ЗИЛ 131А, УРАЛ-4320, КАМАЗ-43114	ЗИЛ 131А, УРАЛ-4320 КАМАЗ-43114, трактор ТТ-4 и др.	трактор Т-170 и их аналогии	УРАЛ-4320-1912-30
10.	Привод рабочих органов	от двигателя транспорт-ной базы	палубный дизель, типа Д-65	от двигателя транспорт-ной базы	от двигателя транс-портной базы

Буровые установки в зависимости от условий ведения работ комплектуются буровыми насосами, компрессорами, буровыми штангами, приспособлениями для производства спускоподъёмных операций и другим инвентарём. Помимо самоходных установок, ОАО «ГЕОМАШ» для инженерных изысканий, геологоразведочных работ в стеснённых условиях выпускает малогабаритную блочную буровую установку ББУ-000 «Опенок», позволяющую наряду с вертикальными вести бурение горизонтальных скважин. Основные параметры установки:

крутящий момент на шпинделе, кГс·м – 150;

частота вращения шпинделя, об/мин. - 0 ÷700;
угол наклона скважины к вертикали, град. – 0-45 и 90;
диаметр бурения, мм – 250;
условная глубина бурения, м:
- шнеками Ø 135 мм – 25,
- с промывкой Ø 46 мм – 100,
- с продувкой Ø 112 мм – 50,
- пневмоударником Ø 250 мм – 50;
габаритные размеры, мм – 2100 х 800 х 1800;
масса установки с бензиновым двигателем, кг – 430;
масса мачты с лебедкой в сборе, кг – 77.

Помимо буровой техники, выпускаемой ОАО «ГЕОМАШ», разработкой и выпуском техники для инженерных изысканий, наблюдательных и водозаборных скважин занимаются и ряд других организаций. Так в ЗАО «Современная буровая техника» налажен выпуск от переносных станков легкой серии: СБ-ПМ «Колибри», СБГ-ПМ2 «Стерх», самоходных на гусеничном ходу УБГ-Л2 «Аллигатор» с приводами: от электродвигателя, от двигателя внутреннего сгорания (ВАЗ 2106), от дизеля. Более мощных на гусеничном ходу: УБГ-Л «Мангуст», УБГ-С «Барс» (УБГ-С-13201), УБГ-С «Беркут» (УБГ-С-5233, УБГ-С-5333, УБГ-С-5322, УБГ-С-2333) и УБГ-СА «Беркут» (УБГ-СА-5403, УБГ-СА-1403) на шасси КАМАЗа с буровым насосом и компрессором.

Установки типа УБГ-С «Беркут» могут применяться для инженерно-геологических изысканий, бурения скважин на воду, для водопонижения, производства геологоразведочных и других видов работ. Установки этого класса имеют модельный ряд по исполнению вращателя. Выпускаются установки с проходным и непроходным шпинделями с крутящим моментом до 850 кГс·м, с непроходными шпинделями с крутящими моментами 2500 кГс·м и 4000 кГс·м.

В зависимости от модификации мачты буровые установки выпускаются с ходом подачи 2000, 4000 и 5000 мм. Выпускаются 4 типа установок (на стационарной раме, передвижное на гусеничных бортах ТО 150А25, передвижное на раздвижных гусеничных бортах ТО 150А05, передвижное на гусеничных бортах РТ-70).

В зависимости от диаметра бурения разработаны 3 модификации бурового блока: один для диаметра бурения 1000 мм и два для диаметра бурения до 700 мм.

Установки имеют небольшую частоту вращения: в 1-ом режиме 0-24 об/мин, во втором 0-48 об/мин.

Механизм подачи бурового инструмента цепной с приводом от гидромотора, усилие подачи вверх – 10000 кГс.

Благодаря заложенным в установки техническим возможностям они позволяют осуществлять бурение шнеками, с прямой промывкой, с обратной промывкой, с продувкой воздухом, вести бурение пневмоударниками, осуществлять ударно-канатное бурение.

Установки ОАО «ГЕОМАШ», ЗАО НПЦ «СБТ» гидрофицированы, позволяют плавно менять частоту вращения, осевое усилие на забой, механизировать процесс свинчивания - развинчивания бурового снаряда, мобильны, обладают высокой маневренностью, оснащены современным насосным и компрессорным оборудованием, удобны в эксплуатации. Трудоёмкость процессов, начиная от монтажа, бурения и демонтажа установки значительно меньше, чем на установках предыдущего поколения.

Наряду с вновь созданной буровой техникой в организациях, занимающихся сооружением различного типа скважин на воду, сохранились и работают хорошо зарекомендовавшие себя в предыдущие десятилетия буровые установки, позволяющие бурение как глубоких большого диаметра скважин, таких, как УБВ 600 (глубина бурения 600 м при начальном диаметре бурения 490 мм и конечном 214 мм), БА-15В (глубина бурения 500 м при начальном диаметре бурения 394 мм и конечном 190 мм), УРБ-3АМ (глубина бурения до 500 м при начальном диаметре бурения 248 мм и конечном 164 мм), так и более мелких, таких, как УРБ-2А-2 (глубина бурения 200-300 м при начальном диаметре 151 мм и конечном 132 мм). После модернизации буровой установки УРБ-2А (современная версия УРБ-2А-2) её технические возможности расширены: увеличена глубина бурения до 300 мм, грузоподъёмность, крутящий момент, произведена замена шасси на современный, повышенной проходимости УРАЛ-4320-1112-41, укомплектована компрессорной станцией типа КСБЦ1-5А или КСБУ-4ВУ1-59 (4ВУ1) и буровым насосом НБ-32 или НБ-50.

Как видно, из далеко не полного списка, созданного в СССР и Российской Федерации перечня бурового оборудования, анализа их параметров, в настоящее время с его помощью можно решать любые инженерные задачи по разведке, проведению любых видов изыскательских работ, бурению скважин на воду и др.

Решением задач по обеспечению городского и сельского населения, промышленных предприятий водой за счёт подземных источников занимаются многие страны мира. Так же, как и в нашей стране, научные, проектно-конструкторские и производственные организации прошли длительный эволюционный путь развития по созданию высокоэффективных техники и технологий сооружения скважин на воду, инженерно-геологических изысканий и других целей.

ФРГ является лидером на данном направлении работ.

Наиболее известной фирмой, выпускающей буровое оборудование для

выполнения инженерно-геологических, гидрогеологических изысканий в горном деле является SALZGITTER Drehebohrmaschinen. Примерами могут служить установки H60, 6G750 в различных модификациях, включая самоходное шасси. Станки имеют шпиндель, гидравлическую подачу с развитием осевого усилия на забой до 6000 кГс и на подъём 8000 кГс, крутящие моменты до 200 кГс·м, диаметр буровых штанг: 42, 51, 60, 63,5 мм. Глубина бурения зависит от диаметра применяемых штанг и диаметра породоразрушающего инструмента.

Помимо этого, фирма выпускает серию более тяжёлых буровых установок на гусеничном ходу: (Salzqitter Larettenbohzanlaqe) LB-24 (тип I, тип II), LB-32, LB-46 (тип I, тип II), LB-406, LB-610.

Основные технические параметры установок LB24 и LB46, серии S приведены ниже в таблице 5.8 и 5.9.

Таблица 5.8 - Технические характеристики установок серии LB

Параметры	Установка LB-24		Установка LB-46	
	I тип	II тип	I тип	II тип
Глубина бурения, м	60	30	60	40
Диаметр штанг, мм	76	114	76	114
длина штанги, мм	4000	3000	4000	4000
Осевое усилие, кГс	6000	6000	6000	6000
Крутящий момент, кГс ·м	200	300	300	400
Приводная мощность, кВ	15	30	25	110
Шасси	гусеничный ход		гусеничный ход	

Фирмой предусмотрена комплектация буровых установок для бурения с обратной промывкой эрлифтом и вакуумным насосом. Для этих целей установки комплектуются соответствующим типом компрессора (вакуумного насоса), двойной колонкой бурильных труб, специальной промывочной головкой.

Фирма «Salzqitter» является ведущим производителем буровых установок на мировом рынке. Она осуществляет поставки бурового оборудования во все страны мира.

Не менее известна германская фирма WIRTH Maschinen – und Bohrqeräte – Fabrik GmbH, также выпускающая буровое оборудование для решения различных инженерных задач. Фирмой выпускается параметрический ряд буровых установок серии ECOdriLL: ECO 0; ECO 1; ECO 9; ECO 11; ECO 16; ECO 25; ECO 35, позволяющих вести бурение скважин диаметром от 150 до 2000 мм с прямой и обратной подачей промывочной жидкости.

Таблица 5.9 - Технические характеристики установок серии S

Параметры	S 150 H	S 200 H	S 300 H
1	2	3	4
Диаметр бурения, мм	400-1500	600-2500	600-2500
Глубина бурения, м	200	300	300-500
Приводная мощность л.с.	78	112	140
Ротор:			
крутящий момент, кГс·м (в зависимости от типа гидромотора)	1100 1800	1800 3600	3600 16000
диаметр проходного сечения ротора, мм	300/800	800	800/1200
Центробежный насос:			
сечение трубопровода, мм	150 ($6^{//}$)	200 ($8^{//}$)	300 ($12^{//}$)
производительность, л/мин	4000	8000	16000
высота подъёма жидкости, м.вод.ст.	14,5	13,0	12,0
вес приставки, кг	3200	4200	7800

Предприятия Salzqitter Maschine und Anlaqen AG выпускают параметрический ряд многофункциональных установок вращательного бурения типа RB: RB10; RB20; RB30; RB40; RB50; RB60; RB70; RB80; RB90 и др. Установки отличаются по грузоподъёмности мачт, начиная от 3-х т (RB10) и кончая 100 т (RB90), крутящие моменты - начиная от 200 кГс·м (RB10) до 5000 (RB90), частота вращения у агрегатов RB10, RB20 имеет 2 ступени: 1-ая имеет 0-170 об/мин, вторая 0-250 об/мин. Установки RB30 … RB60 имеют 3 ступени скоростей: 1-ая - от 0 до 40 об/мин, 2-ая - от 0 до 78 (RB30, RB40, RB50), 0-180 (RB60); последние RB70 … RB90 имеют одну частоту вращения – 120 об/мин.

Каждая из установок комплектуется различными типами поршневых, центробежных насосов и компрессорами.

Установка Multidrill RB225 имеет более мощное насосное и компрессорное оборудование (поршневой насос Q=760 л/мин и P=80 атм., центробежный насос Q_{min}=3000 л/мин, P_{max}=20 атм., компрессор 0-9,5 $м^3$/мин и P=7 атм или Q=7 $м^3$/мин и P=15 атм).

Salzqitter Maschine und Anlaqen AG кроме этих установок выпускает установки Rohranleqe UMA 2, по своим характеристикам отвечающие среднему классу установок RB: (RB40, RB50), установки с роторными приводами RC6; RC8; RC8L с приводами мощностью от 70 до 120 кВт, с крутящими моментами от 1100 до 2000 кГс·м и грузоподъёмностью мачты до 32 т и высотой 13,3 м.

Для водоснабжения Salzqitter Sauqbohrsatze выпускаются 3 типа установок для сооружения скважин разных диаметров глубиной от 200 до 500 м с обратной промывкой водой, а также параметрический ряд шпиндельных буровых установок серии В0 для разведочного бурения: В0А; В0/В1А; В1А; В1А/В2А; В2А; В3А; В4А; В8А; В10; В12 с мощностью привода от 51 кВт (В0А) до 2 х 17 кВт (В12), крутящими моментами от 238 кГс·м (В0А) до 2413 (В12), высотой мачты от 4210 мм (В0А) до 17300 мм.

Для бурения водозаборных скважин с обратной промывкой эрлифтом и приводом вращения колонны от ротора фирмой WIRTH выпускается серия буровых установок: L2A; L3A; L4; L10; L15, имеющих основные параметры, приведенные в таблице 5.10.

Известная фирма Nordmeyer GmbH&Co.KG выпускает буровые установки для проведения разведочных, инженерно-геологических, изыскательских и других видов работ. Фирмой выпускаются установки RSB0/1,4, а также установки серии DSB: DSB1/3,5; DSB1/5; DSB2/7; DSB2/10; DSB3/14; DSB4/40K; DSB4/35D; DSB5/75D; DSB6/80D, позволяющие вести бурение скважин в диапазоне глубин 0-1500 м.

То же самое можно сказать о фирме SATVIA Maschinen und Bohrqeratebau GmbH, выпускающей станки для бурения неглубоких скважин: VB101: VB101 R; 34/115; 24/350; 14/300; 24/3200, позволяющие вести бурение диаметром от 100 мм до 1400 мм на 25 м. Крутящий момент на вращателе самой маленькой установки – 11,5 кГс·м, самой мощной – 320 кГс·м. Исполнение установок – на гусеничном и на автомобильном шасси.

Таблица 5.10 – Основные параметры буровых установок, выпускаемых фирмой WIRTH

	L2A	L3A	L4	L10	L15
Приводная мощность, кВт	87	112	175	210	210
Длина бурильных труб, мм	3000	3000	3000	5000	5000
Частота вращения, об/мин (min/max)	15/87	10/60	10/60	10/43	10/43
Крутящий момент, кГс·м	3000	4000	8000	12000	12000
Производительность насоса $Q_н$, $м^3$/час	80	120	240	-	-
Производительность компрессора, $м^3$/час	3,5	5,7	2 х 5,7	20	20
Давление воздуха, атм.	10	10	10	20	20

Из приведенного описания деятельности фирм и выпускаемого ими оборудования следует, что в ФРГ выпускается буровое оборудование, способное удовлетворить нужды многих отраслей хозяйства, связанных с изучением структуры Земли, выполнением геологоразведочных, инженерно-геологических и изыскательских работ, сооружением скважин на воду для обеспечения населения и промышленных предприятий водой, сооружением технических скважин для нужд горного производства и строительства.

Рассматривая ведущие фирмы по производству буровой техники, нельзя не остановиться на разработках группы компаний Atlas Copco, производящих буровые станки, специальное оборудование и инструмент для геологоразведки, инженерных изысканий и строительства. Краткие сведения об этих установках приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Основные параметры буровых установок, выпускаемых группой компаний Atlas Copco

Параметры	Установки					
	Diamec 232	Diamec 252	Diamec 262	Diamec 46	Diamec 46 dh	Diamec 48
диаметр / глубина бурения, мм / м	46/200	46/650; 56/700	46/1200; 56/700; 66/500; 76/400	56/875; 66/625; 76/575; 86/500	56/1100; 56/850; 76/800; 88/700	48/2000
Усилие подачи, кГс	2000	3300	6500	6500	6500	13300
Крутящий момент, кГс·м	25 кГс·м при n=500 об/мин 75 кГс·м при n=2000 об/мин	55 кГс·м при n=500 об/мин 15 кГс·м при n=2000 об/мин	200 кГс·м при n=200 об/мин 35 кГс·м при n=2000 об/мин	180 кГс·м при n=500 об/мин 40 кГс·м при n=2000 об/мин	-	230 кГс·м при n=500 об/мин 75 кГс·м при n=1200 об/мин
Приводная мощность, кВт	15	45	45,68	55	68	110

Atlas Copco Explorac выпускает самоходные буровые установки как на автомобильном, так и на гусеничном ходу.

Исследуя технологические процессы и технику, с помощью которых ведётся сооружение скважин на воду, установлено, что из всего комплекса технологических операций самыми сложными и трудоёмкими являются операции, обеспечивающие качество вскрытия водоносного горизонта и оборудование его фильтрами. Заслуживают подробного рассмотрения разработанные в России способ и устройства [219, 220], с помощью которых снижаются трудозатраты и повышается качество работ при их выполнении.

Согласно этому способу бурение скважины ведётся одновременно двумя колоннами труб, одна из которых является защитной, а другая бурильной. Каждая из колонн имеет индивидуальный привод вращения, это позволяет для бурильной колонны обеспечивать эффективное разрушение породы (80-150 об/мин), а для защитной - вращение с частотой, обеспечивающей максимальное снижение сил трения поступательному движению. Определение этой частоты является важной практической задачей. При движении колонны вниз со скоростью $v_{мех}$ и с частотой вращения $n_т$ в условиях обжатия колонны, действие сил трения на колонну распределится по схеме, изображенной на рис.5.13.

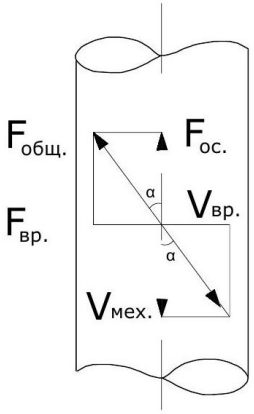


Рис. 5.13. Схема действия сил трения на элемент защитной колонны

$$F_{общ.} = f \cdot P_{бок.}, \qquad (5.37)$$

где $F_{общ.}$ – результирующая сила трения от бокового давления;

$P_{бок.}$ – боковое давление;

f –коэффициент трения породы о материал труб;

α – угол между векторами направлений поступательного и вращательного движения колонны.

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{F_{вр.}}{F_{ос.}}, \qquad (5.38)$$

где $F_{вр.}$ – силы терния вращательному движению;

$F_{ос.}$ – силы трения поступательному движению.

С учётом выражения (5.38) определяются силы трения поступательному и вращательному движению

$$F_{вр.} = F_{общ}\sin\alpha \qquad (5.39)$$

$$F_{ос.} = F_{общ}\cos\alpha \qquad (5.40)$$

Учитывая, что результирующие векторы сил трения и общей скорости движения колонны совпадают, угол наклона общего вектора скоростей может быть выражен через скорости движения колонн

$$\text{tg}\alpha = \frac{V_{вр}}{V_{мех}}, \qquad (5.41)$$

где $V_{мех}$ – механическая скорость бурения, м/мин;

$V_{вр}$ – линейная скорость вращения, м/мин.

$$V_{вр} = \frac{\pi R_T n_T}{30}, \qquad (5.42)$$

где $R_т$ – радиус защитной колонны;

$n_т$ – частота вращения защитной колонны, об/мин.

Подставив в выражение (5.41) значение $V_{вр}$, получим

$$n_т = \frac{30 V_{мех} tg\alpha}{\pi R_T}, \qquad (5.43)$$

откуда

$$\alpha = arc \cdot tg \frac{\pi R_T}{30 V_{мех}}, \qquad (5.44)$$

Исследования выражений (5.39 и 5.40) с конкретными значениями $V_{мех}$, $n_т$, $P_{бок}$ показали, что увеличение частоты вращения внешней колонны свыше 5 об/мин не имеет смысла, так как снижение силы трения поступательному движению колонны при $n_т > 5$ об/мин происходит всего на 5%, максимум 10 %. При $n_т = 1 \div 3$ об/мин силы трения осевому перемещению колонны снижаются до 10 раз. В связи с изложенным, создание низкооборотных вращателей с высокими крутящими моментами позволят решить проблему вскрытия рыхлых водоносных горизонтов фильтровой колонной даже в условиях полного её обжатия. Конкретным примером подхода к решению аналогичных задач может служить установка для сооружения горизонтальных скважин в песках УЛБ-130 [21, 50], у которой крутящие моменты достигают 2000 кГм (20 кНм), благодаря чему по

обводнённым пескам в условиях полного обжатия колонны сооружаются скважины длиной до 70 м.

Одним из важнейших преимуществ данного способа сооружения вертикальных скважин на воду двумя вращающими колоннами является возможность бурения скважин большого диаметра с применением обычного насосного оборудования. При этом способе промывочная жидкость подаётся на забой по внутренней бурильной колонне (например, Ø 89 мм), а подъём обогащённого буровым шламом раствора – по внутренней полости защитной колонны (например, Ø 168 мм). При стабильной площади кольцевого сечения легко обеспечить скорость восходящего потока в пределах 0,5-0,9 м/сек, достаточную для выноса бурового шлама при применении любой промывочной жидкости (в т.ч. воды).

Проведенные расчёты показывают, что для выноса бурового шлама глинистым раствором достаточно обеспечить подачу жидкости с расходом 320 л/мин, а при бурении с водой – 600 л/мин. С этой задачей справляются насосы НБ-320/6,3 и НБ-32.

При бурении скважин для кондуктора, промежуточных колонн, когда имеется необходимость перекрытия неустойчивых пород или изоляции водоносного горизонта от других вышерасположенных горизонтов, предложенный способ позволяет решить эти задачи за счёт оснащения торца защитной колонны кольцевыми породоразрушающими инструментами по схеме, приведенной на рис.5.14.

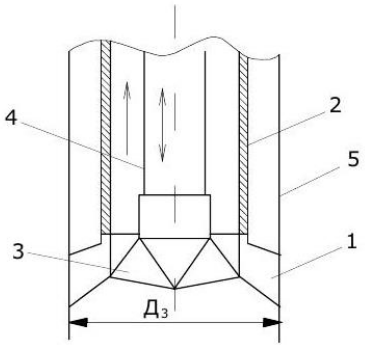


Рис.5.14. Схема бурения скважины двумя колоннами.
1 – коронка защитной колонны, армированная твердым сплавом;
2 – защитная колонна; 3 – долото внутренней бурильной колонны;
4 – бурильная колонна

Диаметр коронки выбирается в соответствии с требованиями геолого-технического наряда на скважину. Бурение до водоносного горизонта может

выполняться с применением глинистого раствора.

Перед вскрытием водоносного горизонта на защитную колонну устанавливается фильтровая колонна, параметры которой должны быть предварительно просчитаны (диаметр, длина, скважность, тип фильтрующего элемента и т.д.) и производится спуск в скважину.

Вскрытие водоносного горизонта осуществляют с промывкой скважины чистой водой, при этом диаметр коронки должен быть на 25 % больше внешнего диаметра фильтра.

Для реализации предложенного способа вскрытия рыхлых водоносных горизонтов разработана установка, изображенная на рис.5.15.

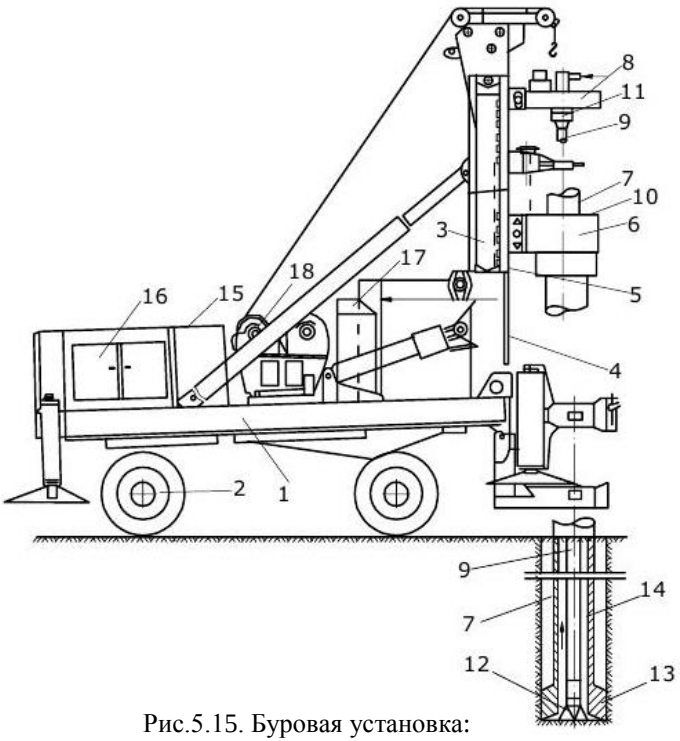


Рис.5.15. Буровая установка:
1 – горизонтальная платформа, 2 – шасси, 3 – вертикальная рама, 5 – подвижная рама, 6 – вращатель, 7 – обсадная колонна, 8 – вращатель, 9 – бурильная колонна, 10- шпиндель, 11- , 12 – долото, 13 – режущее кольцо

Установка [219, 220] представляет собой горизонтальную платформу 1, установленную на шасси 2 и жёстко связанную с вертикальной рамой 3,

имеющую направляющие 4 для передвижения по вертикали подвижной рамы 5.

На раме закреплены вращатель 6 обсадной колонны 7 и вращатель 8 бурильной колонны. На подвижной раме 5 перпендикулярно к ней установлена рама с направляющими, по которым перпендикулярно оси бурения перемещается вращатель к бурильной колонне 9 при помощи гидроцилиндра перемещения, установленного между направляющими и жестко связанного с корпусом вращателя 8. Для обеспечения особенности шпинделя 10, вращателя 6 и шпинделя вращателя 8 они снабжены устройством для жёсткой фиксации, исключающим уход бурильной колонны 9 от оси вращения. Для отвода вращателя 6 от оси скважины на подвижной платформе 5 установлена рама с направляющими и гидроцилиндром для перемещения вращателя 6. Передача вращения и осевого усилия обсадной колонне 7 осуществляется через узлы для механического свинчивания и развинчивания секций обсадных и бурильных труб в виде гидравлического захвата (патрона), установленного на корпусе вращателя 6 обсадной колонны 7, захватный механизм которого вращается вместе со шпинделем вращателя 6. Для удержания секций обсадных труб 7 на неподвижной платформе 3 установлен гидравлический захват (гидравлический ключ), который при захвате обсадной колонны 7 может удерживать ее от поворота.

Перемещение неподвижной рамы 5 по вертикальной раме 3 осуществляется с помощью гидроцилиндра 20. Так как бурение осуществляется двумя колоннами 7 и 9 одновременно, то и наращивание должно осуществляться последовательно (сначала бурильной, потом обсадной колонн). Длина обеих колонн должна быть одинаковой. В нижней части обе колонны 7 и 9 оснащены инструментами. На бурильной колонне 9 устанавливается в качестве такого инструмента либо шарошечное, либо лопастное долото 21. На обсадной колонне 7 устанавливается инструмент в виде режущего кольца 22 с углом резания $40\text{-}60^0$, коническая поверхность которого убрана вовнутрь, а наружная поверхность имеет цилиндрическую форму. Коническая поверхность армирована твёрдым сплавом. Наружный диаметр инструмента больше диаметра обсадной колонны до 10-15 %. Благодаря этому фактору и форме он срезает породу со стены скважины и направляет её внутрь скважины, что обеспечивает сохранение естественных свойств пород (проницаемости и структуры). При бурении подача промывочной жидкости к бурильной колонне осуществляется буровым насосом по нагнетательному шлангу через сальник - вертлюг, откуда по колонне 9 она подаётся на забой через долото 12 и выходит наверх по кольцевому пространству 14.

Внизу на вертикальной раме 3 установлен обсадной дополнительный гидравлический ключ для аварийного удержания обсадной колонны. Под

шпинделем вращателя 6 обсадной колонны устанавливается гидравлический захват для удержания бурильной колонны. Гидроприводы вращателя 6 и 8, система гидравлической подачи приводится в действие от маслостанции 15, гидронасосы, которые соединены с дизель-электростанцией 16 или электромотором, управление приводами осуществляется за счёт их связи с пультом управления 17.

С пульта управления 17 осуществляется управление подъёмом рамы 3 из горизонтального положения в вертикальное. Эта операция производится гидроцилиндрами. Поворот осуществляется вокруг шарниров.

Осуществление операций по подъёму и спуску секций обсадных и бурильных 9 труб обеспечено грузозахватным механизмом захватом 18. Нивелирование платформы 1 и восприятие осевых нагрузок при спускоподъёмных операциях и бурении осуществляется с помощью гидравлических домкратов, управляемых с пульта управления 17. Перевод в транспортное положение рамы 3 из вертикального в горизонтальное положение производится с помощью гидроцилиндров и путём поворота вокруг шарниров.

Буровая установка работает следующим образом. Устанавливают и монтируют на площадке, с помощью гидроцилиндров поднимают раму 3 в вертикальное положение и фиксируют. Подготовленную таким образом установку с помощью гидродомкратов нивелируют. После этого приступают к подготовке бурения, для чего собирают компоновку обсадной колонны 7 и бурильной 9. Осуществляется это следующим образом. На головной секции обсадной колонны трубы устанавливают инструмент. Грузозахватным механизмом с помощью лебедки сначала собирают рабочую компоновку обсадной колонны трубы. Для этого первую его рабочую секцию пропускают через шпиндель вращателя 6 и зажимают гидрозахватом (гидравлическим ключом), после чего поднимают следующую секцию труб 7, вновь пропускают через шпиндель вращателя 6. Зажимают её в патроне, включают вращение шпинделя 10 и соединяют секции в колонну. Эти операции продолжаются до тех пор, пока инструмент 12 не войдет в соприкосновение с грунтом. После этого аналогичным образом собирают компоновку внутренней колонны 9. Сначала на её головную секцию устанавливают долото, с помощью лебедки 17 и грузозахватного механизма её поднимают, спускают в обсадную колонну 7, ставят на вилку гидравлического захвата, фиксируют, грузоподъёмный механизм освобождают, поднимают очередную секцию труб 9 и производят наращивание колонны, используя гидравлический захват. Наращивание и спуск колонны осуществляется циклично, до тех пор, пока долото не коснётся поверхности земли.

Технологичность операций по наращиванию колонн достигается благодаря возможности отвода вращателя бурильной колонны от оси

скважины в сторону, при этом обеспечивается возможность маневрирования грузозахватным механизмом.

Выполнив эти операции, обсадную колонну 7 зажимают в гидравлическом захвате (патроне), освобождают захват из гидравлического ключа, подводят вращатель 8 к центру, шпиндель 10 соединяют с бурильной колонной 9 и настраивают на заданные частоты вращения бурильную колонну 9, затем обсадную 7 колонну и включают подачу подвижной рамы 5 вниз, с помощью гидроцилиндра регулируют величину осевого давления на забой, включают буровой насос и приступают к бурению. Частоту вращения бурильной колонны 9 выбирают из условий эффективного разрушения породы долотом 12 (обычно в пределах 80-200 об/мин). Частоту вращения обсадной колонны 7 в начальный момент, когда скважины устойчивы, принимают максимально возможной, в неустойчивых породах вращение в пределах 1-3 об/мин.

Предложенные способ и устройство для вскрытия водоносных горизонтов расширяют перечень устройств и технологий, направленных на совершенствование качества буровых работ на воду.

Особое место в практике сооружения всех типов скважин на воду (наблюдательных, водозаборных, водопонижающих) занимают вопросы технологии вскрытия водоносных горизонтов с напорами на устье, величина которых превышает величину противодавления на пласт, создаваемую столбом промывочной жидкости.

Необходимость сооружения таких скважин возникает при строительстве, реконструкции, эксплуатации производственных объектов с заглубленным основаниями. Это, прежде всего, потерны гидростанций, объекты метрополитенов, водозаборных ковшей береговых насосных станций и др.

При сооружении скважин в условиях самоизлива пластовых вод фильтрационный поток, действуя со стороны забоя, стенок скважины и направленный вверх, разрушает все структурные связи между частицами водоносного горизонта. Горная масса приходит в движение, заполняя не только скважину, но и проникает вовнутрь бурильной колонны, создавая песчаную пробку, что делает процесс углубки скважины невозможным.

Анализ существующего бурового оборудования показывает, что известными буровыми установками решить поставленную задачу невозможно. В наибольшей степени для вскрытия водоносных горизонтов с напорами отвечает способ вскрытия водоносного горизонта под защитой обсадной колонны и установка, основанная на этом принципе [219, 220].

На её основе разработана буровая установка и техническая оснастка для решения задач по вскрытию водоносных горизонтов с напорами [221].

Установка (рис. 5.16) оснащена специальными породоразрушающими инструментами (рис. 5.17; 5.18), с помощью которых решается вопрос предотвращения попадания песка вовнутрь бурильной колонны при отключенном буровом насосе, попадание песка в кольцевое пространство, образованное внешней поверхностью бурильной и внутренней поверхностью защитной колонны, перекрытие торца защитной колонны на период установки в ней фильтра. Сечения, через которые может происходить самоизлив водопесчаной смеси (кольцевые сечения между кондуктором и защитной колонной, между защитной и бурильной колоннами), оснащены герметизаторами, рассчитанными на предотвращение утечек жидкости (см.рис. 5.17) и системой подкачки жидкости с давлением, превышающим пластовое на 3-5 м вод. столба.

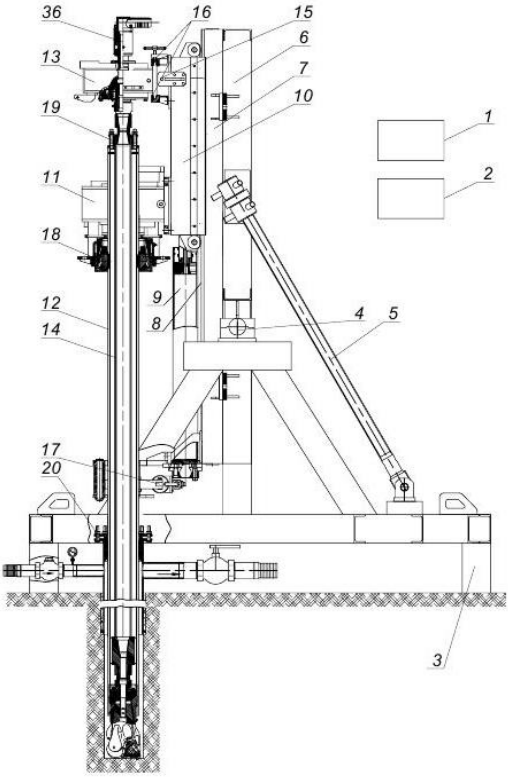


Рис.5.16. Буровая установка для вскрытия водоносных горизонтов с напорами, превышающими отметку поверхности земли

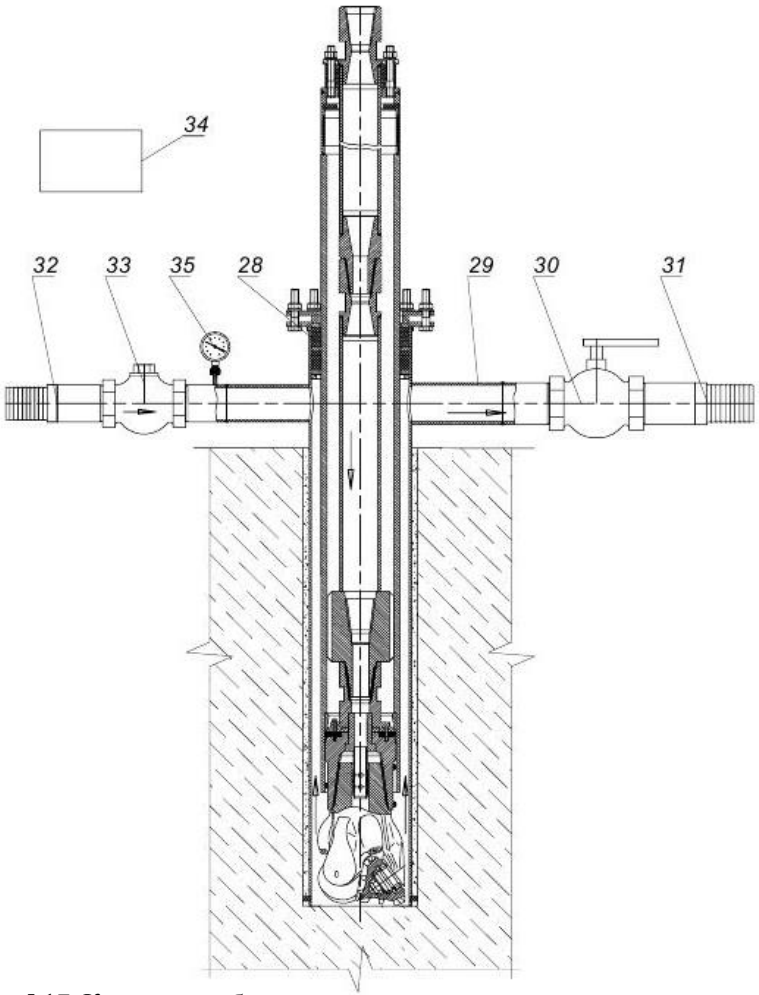


Рис.5.17. Компоновка бурового снаряда и конструкция кондуктора для вскрытия рыхлых водоносных горизонтов с напорами, превышающими отметку поверхности земли

В состав технологической оснастки входит пакерное устройство (рис.5.19), с помощью которого исключается попадание водопесчаной смеси в кольцевое пространство между фильтром и защитной колонной.

Буровая установка для сооружения дренажных скважин в рыхлых водоносных горизонтах с высокими напорами (см.рис. 5.16) содержит

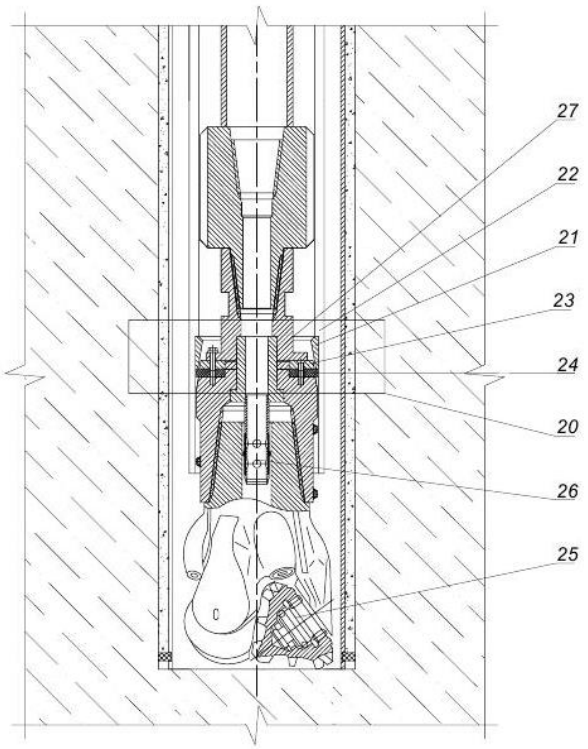


Рис.5.18. Компоновка забойной части бурового снаряда для вскрытия рыхлых водоносных горизонтов с напорами, превышающими отметку поверхности земли

маслостанцию 1 (см.рис. 5.16), пульт управления 2, платформу 3 с поворотной осью 4, подъёмник 5 и подрамник 6. На подрамнике 6 жёстко закреплена неподвижная рама 7 с направляющими 8 по которымгидроцилиндром 9 перемещается подвижная рама 10. На подвижной раме 10 размещён вращатель 11 защитной колонны 12 и вращатель 13 бурильной колонны 14. При наращивании защитной колонны 12 и бурильной колонны 14 вращатель 13 с помощью гидроцилиндра 15 может перемещаться по направляющей 16 перпендикулярно оси бурения. Для захвата защитной колонны 12 при её свинчивании – развинчивании на неподвижной раме 7 размещён гидроключ 17, а на вращателе 11 установлен патрон 18. Для исключения излива выше отметки поверхности земли (оборудование скважины фильтрами) пластовых вод через кольцевое пространство (на рис.

не показано), образованное внутренней поверхностью защитной колонны 12 и внешней поверхностью бурильной колонны 14 на торце защитной колонны 12 устанавливается герметизатор 19 бурильной колонны 14, который исключает самоизлив в процессе бурения. При снятом герметизаторе 19 (в фазе наращивания защитной колонны 12 и бурильной колонны 14) герметизация этого кольцевого пространства осуществляется устройством 20 (см.рис. 5.18), у которого опорное кольцо 21 с конусной поверхностью размещено в коронке 22, установленной на защитной колонне 12 (см.рис. 5.16), а запирающий кольцевое пространство конусный диск 23 (см.рис. 5.18) с уплотнительной манжетой 24 размещён на корпусе долота 25.

Перекрытие кольцевого пространства осуществляется только при наращивании путём постановки защитной колонны 12 и бурильной колонны 14 на забой. Перекрытие доступа напорных пластовых вод внутрь бурильной колонны 14 осуществляется обратным клапаном 26. Долото 25 соединено с бурильной колонной 14 через специальное отрывное устройство 27, способное передавать расчётный крутящий момент и осевое усилие на забой. При завершении бурения скважины до проектной глубины, когда необходимо извлечь бурильную колонну 14, специальное отрывное устройство 27 расчётным усилием вверх отсоединяется от бурильной колонны 14, исключая приток пластовых вод внутрь защитной колонны 12.

Для создания заданного давления в кольцевом пространстве (на рисунке не показано), образованном стенкой скважины (на рисунке не показана) и внешней поверхностью защитной колонны 12, в состав установки введен герметизатор 28 (см.рис. 5.17) защитной колонны 13 с внешней водоотводящей линией 29, запорной арматурой 30, отводным трубопроводом 31, нагнетательной линией 32 с обратным клапаном 33, дополнительным насосом 34 и контрольно-измерительной аппаратурой 35.

Подача промывочной жидкости в скважину осуществляется буровым насосом (на рисунке не показан) через сальник – вертлюг 36. Для оборудования скважины фильтром «впотай» установка включает пакер 37 (см.рис. 5.19), в котором вверху выполнен паз 38 под байонетный переходник 39, устанавливаемый на бурильной колонне 14. Расположение пакера 37 в защитной колонне 12 показано на рис. 5.19.

Сооружение скважин с изливом осуществляют следующим образом:

В горной выработке (котловане) монтируют буровую установку в соответствии с проектом и геолого-техническим нарядом на скважину (на рисунке не показана). Сначала, монтируют кондуктор (рис. 5.20) и цементируют его. На кондуктор устанавливают герметизатор 28 защитной колонны 12 с отводящей линией 29, запорной арматурой 30, отводным трубопроводом 31, нагнетательной линией 32 с обратным клапаном 33, дополнительным насосом 34 и контрольно-измерительной аппаратурой 35 и

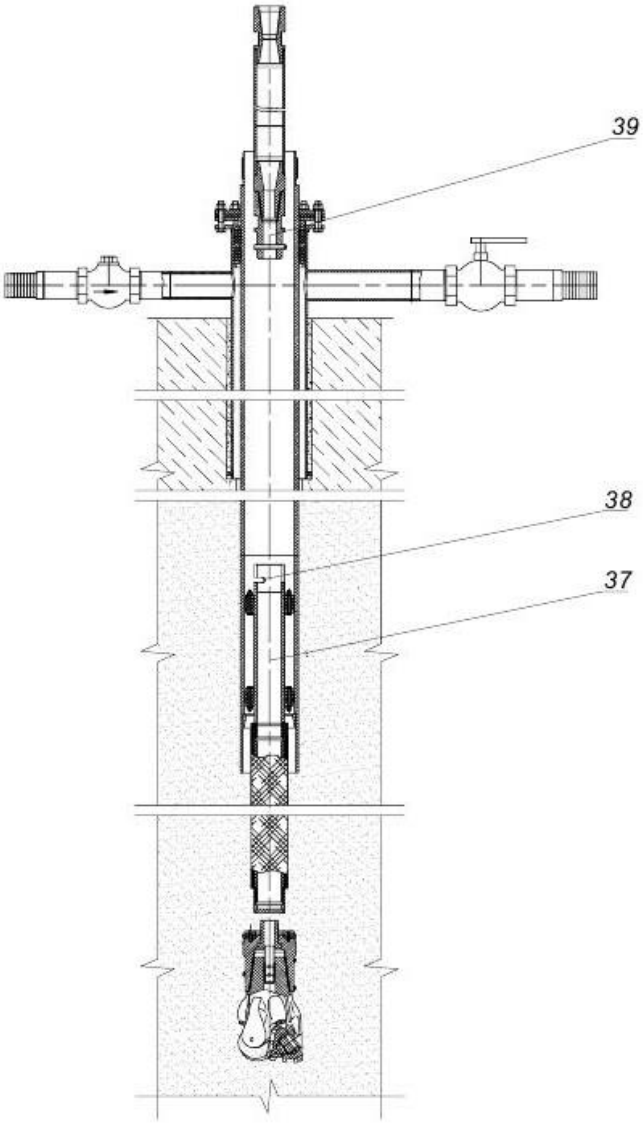


Рис.5.19. Завершающий этап в сооружении скважины с напорами выше поверхности земли

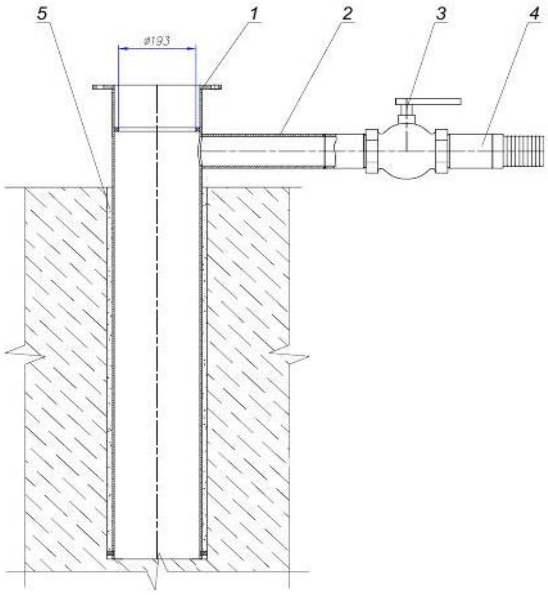


Рис.5.20. Схема установки кондуктора для вскрытия водоносного горизонта с напорами, превышающими отметку поверхности земли:
1 - кондуктор с фланцем для крепления рабочей колонны;
2- отводной патрубок; 3 – вентиль: 4 - присоединительный патрубок;
5 - тампонажный камень

производят сборку установки по схеме, изображённой на рис. 5.16. После этого подключают буровой насос и, пока долото 25 и коронка 22 находятся в кондукторе, проверяют работоспособность сальника - вертлюга 36, герметизатора 19 бурильной колонны 14, герметизатора 28 защитной колонны 12, настраивают запорную арматуру 30 и 33 на расчётное давление. Затем включают с заданной частотой вращатель 13 бурильной колонны 14, затем вращатель 11 защитной колонны 12, устанавливают расчётное давление на забой (на рисунке не показан) и приступают к бурению скважины. После завершения бурения на длину секции бурильной колонны 14 и защитной колонны 12 перекрывают торец коронки 22 долотом 25. Затем выключают буровой насос, с защитной колонны 14 снимают герметизатор 19, с помощью гидроцилиндра 15 отводят вращатель 13 от оси скважины. Сначала наращивают бурильную колонну 14, а затем – защитную колонну 12. На защитной колонне 12 устанавливают герметизатор 19, перемещают вращатель 13 к оси скважины и соединяют его с бурильной колонной 14, включают насос (на рисунке не показан). Бурильную колонну 14 вращением

подают вперёд на 30-50 мм, после чего патроном 18 захватывают защитную колонну 12, включают её вращение, и цикл бурения возобновляется.

По окончании бурения скважины (на рисунке не показано) до проектной глубины торец коронки 22 перекрывают долотом 26. С помощью отрывного устройства 27 отсоединяют бурильную колонну 14 от долота 25, промывают скважину от шлама и извлекают бурильную колонну 14.

После этого опускают в скважину сборную фильтровую колонну (на рисунке не показано). На нижнюю секцию бурильной колонны 14 устанавливают байонетный переходник 39, через паз 38 соединяют с пакером 37, на котором устанавливают фильтровую колонну и спускают её до забоя скважины бурильной колонной 14. После завершения этой операции на заданную высоту извлекают защитную колонну 12, удерживая бурильную колонну 14 в неподвижном состоянии. При её извлечении используют патрон 18 и гидроключ 17. Защитную колонну 12 извлекают до тех пор, пока опорное кольцо 21 не коснётся пакера 37. После этого поворотом бурильной колонны 14 выводят из зацепления байонетный переходник 39 из паза пакера 37 и извлекают бурильную колонну 14.

Рассмотрев влияние способов вскрытия водоносных горизонтов, их освоения, применяемых фильтров на возможность сооружения различных типов скважин на воду с достаточно высоким качеством выполнения работ, можно констатировать:

1. Исследования в области технологии вскрытия водоносных горизонтов шли в направлении изучения многих факторов, влияющих на сохранение его естественной проницаемости, в результате которых определены наиболее эффективные типы промывочных агентов и разработаны прогрессивные способы бурения, обеспечивающие производительность буровых работ в сочетании с высоким качеством вскрытия водоносных горизонтов.

2. Разработаны технические устройства и технологии, обеспечивающие устранение различных факторов, оказывающих влияние на проницаемость пласта; методики расчётов по определению скоростей фильтрации в прифильтровой зоне, исключающих их «пескование».

3. К настоящему времени создано большое разнообразие технических средств, позволяющих вести бурение всех типов скважин на воду: наблюдательных, разведочных, инженерно-изыскательских, водозаборных, дренажных, водопонижающих в широком спектре гидрогеологических условий.

ГЛАВА 6

ТЕХНОЛОГИЯ ВСКРЫТИЯ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ И ТЕХНИКА ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ

В современной терминологии горизонтальные скважины на воду называют горизонтальные дренажные скважины (ГДС). В случае если они пройдены с одной точки, но в разные направления, их называют лучевые дренажные скважины (ЛДС).

Разработка техники и технологии сооружения горизонтальных скважин началась в середине 30-х годов XX столетия при сооружении лучевых водозаборов [222, 223]. На начальном этапе развития технических средств и технологий внесли большой вклад зарубежные исследователи: Ранней, Фельман, Фалли, Небольсин и др., именами которых названы способы проходки скважин. Ими были разработаны способы сооружения горизонтальных дренажных скважин, основанные на принципе задавливания либо фильтровой (методы Раннея, Фельмана), либо защитной колонн (метод фирмы «Пройсаг»). Анализ имеющихся источников информации показывает, что развитие технических средств и технологии сооружения горизонтальных дренажных скважин шло в направлении усовершенствования вышеназванных способов, их гидрогеологического обоснования, определения рациональной области применения.

Большой вклад по разработке технологии вскрытия водоносных горизонтов, созданию технических средств для сооружения горизонтальных дренажных скважин, теоретическим обоснованиям параметров технических средств и фильтрационным расчётам по определению притока подземных вод к горизонтальным скважинам в зависимости от фильтрационных свойств водоносных горизонтов, их гидростатического напора внёс институт ВИОГЕМ [224, 80, 225-232 и др.]. Уже к 1988 г. более 90 % всех горизонтальных скважин в СССР сооружалось с применением техники и технологий, разработанных в институте ВИОГЕМ.

Приступая к созданию технических средств для сооружения горизонтальных скважин, разработчики исходили из того, что горизонтальные дренажные скважины бурят по простиранию водоносного горизонта и бурение от начала и до проектной глубины ведётся по водоносному пласту, и вся скважина на всю её длину может оборудоваться фильтром. Практически для горизонтального дренажного бурения по обводнённым грунтам технология бурения и является технологией вскрытия водоносного горизонта. Актуальными задачами при горизонтальном бурении являются:

- сохранение естественной проницаемости пласта;
- исключение выноса песка из пласта, способное привести к нарушению несущей способности грунтов водоносного горизонта;
- создание условий для беспрепятственной установки фильтра;
- подбор эффективных типов фильтров, обеспечивающих устойчивость против выноса песка и длительный срок эксплуатации;

- освоение скважины, исключающее вынос песка.

Был обоснован и принят для разработки способ вскрытия водоносного горизонта двумя колоннами с независимыми приводами вращения, одна из которых является защитной. Вынос разрушенной породы предусмотрен шнеками в потоке промывочной жидкости.

Способ поясняется фигурами, изображёнными на рис. 6.1.

На рис. 6.1а изображена фаза бурения скважин, основанная на принципе вращательного бурения двумя колоннами, одна из которых является защитной, а вторая бурильной.

Бурильная колонна выполнена в виде шнека с центральным проходным отверстием для подачи промывочной жидкости к забою. Для эффективного разрушения пород забоя каждая из колонн оснащена породоразрушающим инструментом. Так как внутренняя полость защитной колонны связана с атмосферой, а на забое песок находится под гидростатическим давлением столба жидкости, равного напору водоносного горизонта над скважиной, создаётся угроза неуправляемого выноса песка из пласта. Для исключения этого процесса породоразрушающий инструмент на шнековой колонне исполнен таким образом, что он позволяет перекрывать торец защитной колонны на период остановок при бурении (наращивания инструмента, промывки скважины от шлама и др.), а на период бурения изменять площадь кольцевого сечения, образованную внутренней поверхностью коронки защитной колонны и диафрагмой породоразрушающего инструмента шнековой колонны и, таким образом, осуществлять управление выносом песка из пласта.

На рис. 6.1б изображена фазы перекрытия торца защитной колонны породоразрушающим инструментом шнековой колонны и извлечения шнековой колонны.

На рис. 6.1в изображена фаза установки фильтров во внутреннюю полость защитной колонны.

На рис. 6.1г изображена фаза извлечения защитной колонны из скважины.

На рис. 6.1д изображена фаза оборудования скважины водовыпуском.

В соответствии с принятой схемой вскрытия водоносного горизонта предстояло решить следующие задачи:

1. Определить эффективность принятой схемы вскрытия водоносного горизонта.

2. Разработать методику расчёта величины горного давления, действующую на защитную колонну и определить силы трения.

3. Определить осевое усилие на разрушение породы породоразрушающими инструментами, установленными на защитной и шнековой колоннах.

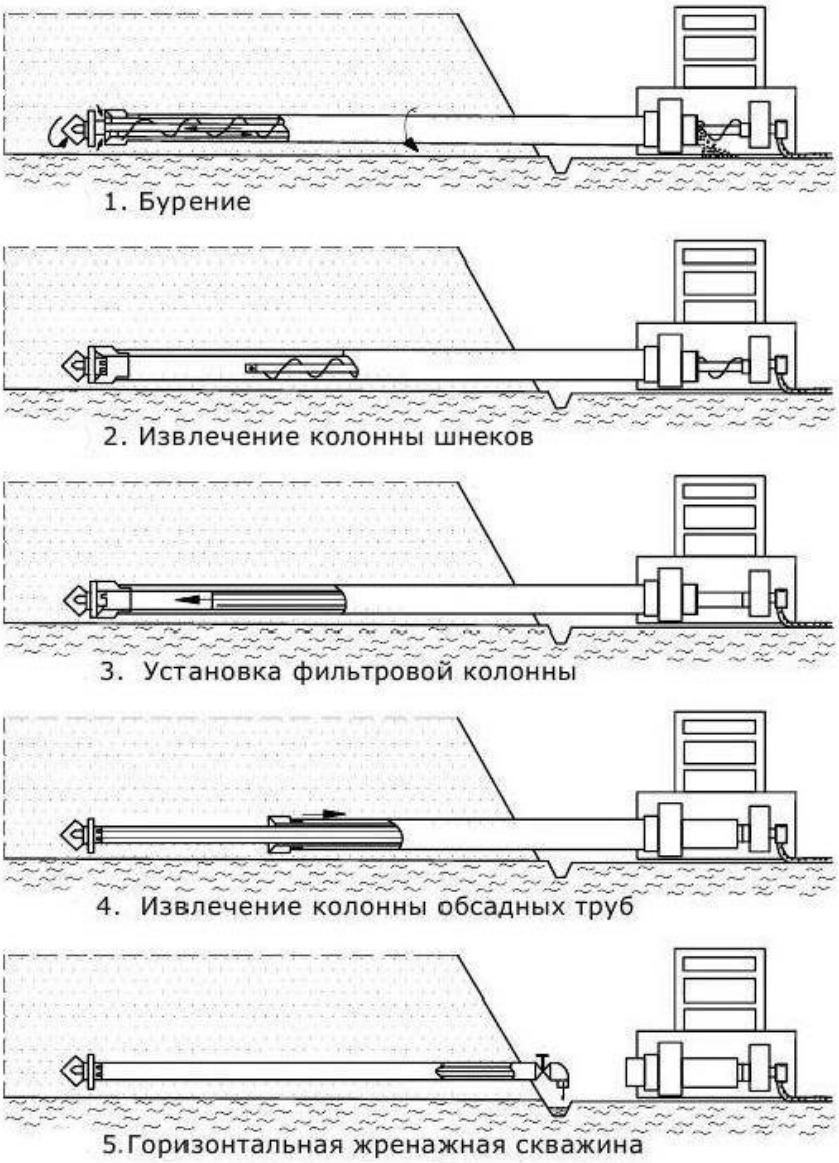


Рис. 6.1. Принципиальная схема вскрытия песчаных водоносных горизонтов при вращательном бурении под защитой обсадной колонны

4. Рассчитать силовые параметры (крутящие моменты) на вращателях защитной и шнековой колонн.

5. Разработать тип фильтра для горизонтальных дренажных скважин и технологию оборудования скважин фильтрами.

6. Решить задачу по механизации операций по свинчиванию-развинчиванию защитной колонны.

7. Разработать конструкции породоразрушающих инструментов, позволяющих осуществлять перекрытие торца защитной колонны на период остановок и регулирования поступления песка в защитную колонну при бурении.

8. Габаритные размеры, компоновка, принцип действия буровой установки должны удовлетворять требованиям техники безопасности при работе в шахтных стволах диаметром 3,5-4,0 м при наличии капежа в стволе, а также на бермах уступов борта карьера.

6.1. Определение влияния гидростатического давления столба жидкости водоносного горизонта на процессы выноса песка при бурении под защитой обсадной колонны

Рассмотрим случай вскрытия водоносного горизонта двойной колонной труб при открытом торце коронки защитной колонны, когда забой скважины связан с атмосферой воздуха. Схема вскрытия водоносного горизонта приведена на рис. 6.2.

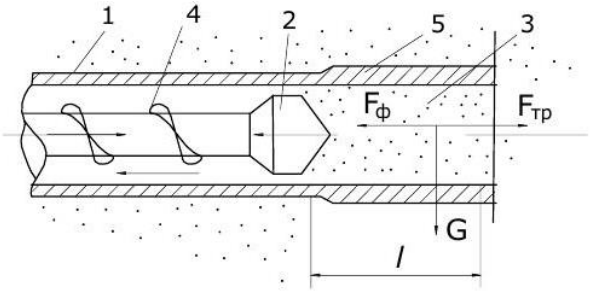


Рис. 6.2. Схема вскрытия водоносного горизонта:
1 – защитная колонна рабочих труб; 2 – породоразрушающий инструмент внутренней колонны; 3 – порода, находящаяся в рабочих трубах; 4 - шнековая колонна; 5 – коронка

По этой схеме породоразрушающий инструмент 2 шнековой колонны 4 идёт с некоторым отставанием от коронки 5. Величина отставания - ℓ -

переменная, зависящая от гидростатического напора применяемых технических средств, и в общем случае может быть рассчитана. Её определение возможно через систему сил, действующих на породу, находящуюся внутри рабочей трубы (см. рис. 6.2).

Как видно из приведенного рисунка, перемещению породы в этом случае будут препятствовать силы трения, вызванные собственным весом породы ($F_{тр}$). Условия равновесия будут определены из равенства:

$$F_ф = F_{тр}, \qquad (6.1)$$

где $F_ф$ – сила гидростатического давления, Н;
$F_{тр}$ – сила трения, Н.

Величина силы трения ($F_{тр}$) может быть определена по общеизвестной формуле:

$$F_{тр} = fG, \qquad (6.2)$$

где f – коэффициент трения;
G – вес породы, Н. Принимая форму находящейся в трубах породы цилиндрической,

$$G = \frac{\pi d^2}{4}\gamma_n \ell ,$$

где d, ℓ, $\gamma_п$– соответственно диаметр, длина, удельный вес образца, м, м, Н/м^3.

Величина силы, вызванная гидростатическим давлением, ($F_ф$) может быть определена по известной формуле [163]:

$$F_ф = h\,\gamma_в\,s, \qquad (6.3)$$

где h, γ – соответственно напор воды в пласте и её удельный вес, м, Н/м^3;
s –площадь сечения образца ($S=\pi d^2/4$), м^2.

Подставив значения $F_{тр}$ и $F_ф$ в выражение (6.1), получим:

$$\ell = \frac{\gamma_B h}{f\gamma_n}, \qquad (6.4)$$

где ℓ – длина образца, м;
$\gamma_в$ – удельный вес воды, Н/м^3;
$\gamma_п$ – удельный вес породы, Н/м^3;
f –коэффициент трения.

Ориентировочные расчёты, проведенные по этой формуле, показывают, что при напоре 10 м величина отставания находится в пределах 6-7 м. На практике она должна быть меньше, т.к. эта формула не учитывает сил бокового распора. Для уменьшения величины ℓ можно ввести

дополнительные конструктивные элементы, способные увеличить сопротивление передвижению смеси.

Если принять во внимание работу шнека как транспортёра породы, то при такой схеме вскрытия пласта вынос песка может быть весьма значительным, что конечно является недопустимым. Экспериментальные работы на одном из нерабочих бортов Лебединского ГОКа подтвердили возможность таких процессов.

Рассмотрим процесс выноса песка по 2-ой схеме вскрытия водоносных горизонтов, к которой пришли в ходе проведения экспериментальных работ, и, которая стала основной при сооружении ГДС. Согласно этой схеме, изображенной на рис. 6.3, шнековая колонна 1 оснащается специальной коронкой 3, имеющей диафрагму 6, башмак 2 защитной колонны изнутри имеет конусную поверхность 7. При перемещении коронки 3 в осевом направлении вдоль участка башмака 2 с конусной поверхностью 7 изменяется площадь кольцевого сечения и таким образом производится регулирование выноса песка из пласта. В башмаке 2 вмонтирован ограничитель 4 хода шнека вперёд и устройство 5 для посадки фильтровой колонны.

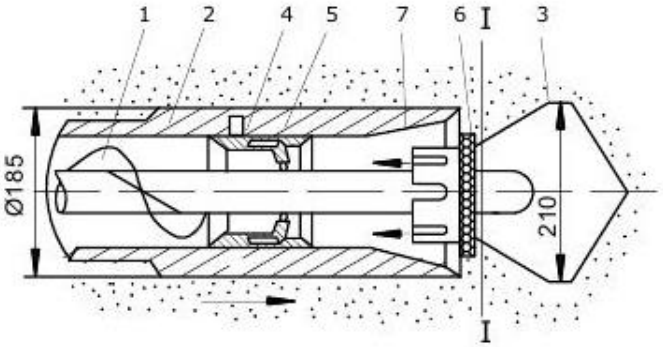


Рис. 6.3. Схема вскрытия песчаных водоносных горизонтов вращательным способом под защитой колонны:
1 – шнек, 2 – башмак, 3 – коронка, 4 – ограничитель хода шнеков, 5 – устройство для посадки фильтров, 6 – диафрагма, 7 – конусная поверхность

После завершения бурения, промывки скважины коронка 3 отсоединяется от шнековой колонны 1, которая извлекается из защитной колонны. После чего в ней устанавливается фильтровая колонна, а защитная колонна извлекается.

Определим условия, при которых нарушится устойчивость стенок скважины в зоне обнажения забоя. При решении поставленной задачи будем

рассматривать движения одиночной частицы, полагая при этом, что её движение идентично движению водопесчаной массы. Рассмотрим систему действующих на неё сил в поперечном сечении 1-1 при вскрытии водоносного горизонта по схеме, изображённой на рис. 6.3. Схема действия сил на обнаженном участке приведена на рис. 6.4.

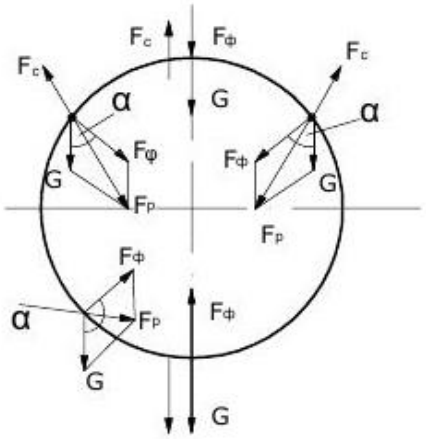


Рис. 6.4. Схема сил, действующих на частицу

На частицу будут действовать её собственный вес G, сила гидростатического давления – $F_ф$ и сила $F_{тс}$, определяемая характером внутренних связей между частицами. Направление действия силы $F_ф$ и G в верхней части скважины совпадают, а в нижней – они направлены в противоположные стороны. Сила F_c препятствует отрыву частиц от массива.

Результирующая сил $F_ф$ и G, может быть определена из треугольника сил, изображённого на рис. 6.4.

$$P_p = \sqrt{G^2 + F_ф^2 - 2GF_ф \cos(180^0 - \alpha)} = \sqrt{G^2 + F_ф^2 - 2GF_ф \cos\alpha}\,, \qquad (6.5)$$

где $P_р$ – результирующая сила, н;

G –вес частицы, Н;

$F_ф$ – гидростатическое давление, Н;

α – угол между направлениями действия сил G и $F_ф$, рад.

Анализ полученной зависимости позволяет определить форму зоны, из которой происходит вынос песка. Основная его масса будет поступать из верхней части скважины. В нижней её части при $G \geq F_ф$ выноса песка не будет. Объяснение закономерности образования и размеров зоны выноса

имеет важное практическое значение для объяснения причин образования прихватов бурового инструмента, его искривление вверх. При перемещении колонны рабочих труб вперёд выпуск песка над ней прекращается, но под действием гидродинамических сил и собственного веса песка начнётся замещение вынесенной при бурении водопесчаной смеси, в результате чего произойдет разуплотнение массива.

Определим размеры зоны разуплотнения. Согласно распределению действующих на частицу сил, можно считать, что зоны выноса и разуплотнения имеют параболическую форму, как это показано на рис. 6.5.

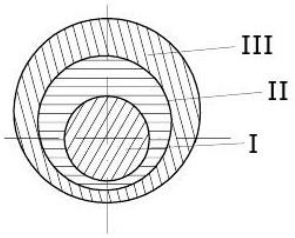


Рис.6.5. Схема образования зон разуплотнения над колонкой рабочих труб:

I – пространство, занятое колонной рабочих труб; II – зона, из которой произошёл вынос водопесчаной смеси; III – зона, подвергнутая разуплотнению

Из рис.6.5 видно, что замещение вынесенной при бурении породы может произойти только за счёт увеличения первоначальной пористости массива.

Объём замещённой зоны определяется из уравнения

$$n_2(V_3 - V_1) - n_1(V_3 - V_2) = V_2 - V_1, \qquad (6.6)$$

где V_1 – объём, занятый колонной рабочих труб, м^3;

V_2 – объём породы, вынесенной при бурении, м^3;

V_3 – объём массива пород, подвергнутого процессу разуплотнения, м^3;

n_1 и n_2 – соответственно первоначальная и конечная пористость массива.

Отсюда

$$V_3 = \frac{n_2V_1 - n_1V_2 + V_2 - V_1}{n_2 - n_1} = \frac{V_2(1-n_1) - V_1(1-n_2)}{n_2 - n_1}. \qquad (6.7)$$

Объём выносимой породы V_2 может быть определён по формуле

$$V_2 = s \cdot v \cdot t, \qquad (6.8)$$

где s – площадь свода (площадь поверхности, через которую происходит вынос песка), м^2;

v –скорость истечения (поступления) пульпы, м/с;

t –время, в течение которого происходит вынос песка, с.

Скорость поступления пульпы через зазор ориентировочно может быть определена по формуле [233]:

$$V = \sqrt{2qh}\,, \qquad (6.9)$$

где V – скорость истечения водоносной смеси, м/с;

q –ускорение силы тяжести, м^2/с;

h –напор, м.

Из анализа выражения (6.7) видно, что размеры зоны разуплотнения находятся в линейной зависимости от объёма вынесенной породы. Считая, что предельная пористость (критическая пористость), при которой песок может воспринимать нагрузку, составляет 45-47 % и естественная пористость массива 32-34 %, можно определить размеры этой зоны. Предварительные расчёты показывают, что при выносе породы, в объёме, равном двум-трём объёмам скважины, размеры зоны разуплотнения значительно превышают размеры свода обрушения, определяемые по методике [234] и объясняют причину интенсивного роста нагрузок на рабочих трубах при бурении скважин в области высоких гидростатических давлений. Таким образом, анализируя приведенные расчёты, можно сказать, что применяемая схема вскрытия водоносных горизонтов несовершенна, имеет недостатки, которые не позволяют вести бурение скважин в областях высоких гидростатических напоров.

Очевидно, что дальнейшее совершенствование технологии вскрытия песчаных водоносных горизонтов должно идти по пути создания более совершенных технических средств, обеспечивающих регулирование выноса песка из пласта при любых гидростатических напорах.

С учётом вышеизложенных взглядов на вскрытие водоносного горизонта представляется возможным использовать силу веса породы в качестве противодействующей фильтрационным силам. На этой основе разработана более совершенная технология вскрытия водоносных горизонтов и созданы породоразрушающие инструменты для бурения скважин в различных гидрогеологических условиях. Схемы компоновок приведены на рис. 6.6 и 6.7.

В результате проведенного анализа существующего способа вскрытия водоносного горизонта и вышеприведенных исследований установлено:

- гидростатическое давление в пласте играет важную роль на формирование размеров зоны выноса и разуплотнения массива в зоне;

- разработанная методика определения зоны выноса с учётом влияния гидростатического давления позволила разработать более совершенные породоразрушающие инструменты, которые обеспечивают проходку горизонтальных дренажных скважин в широком спектре гидрогеологических условий.

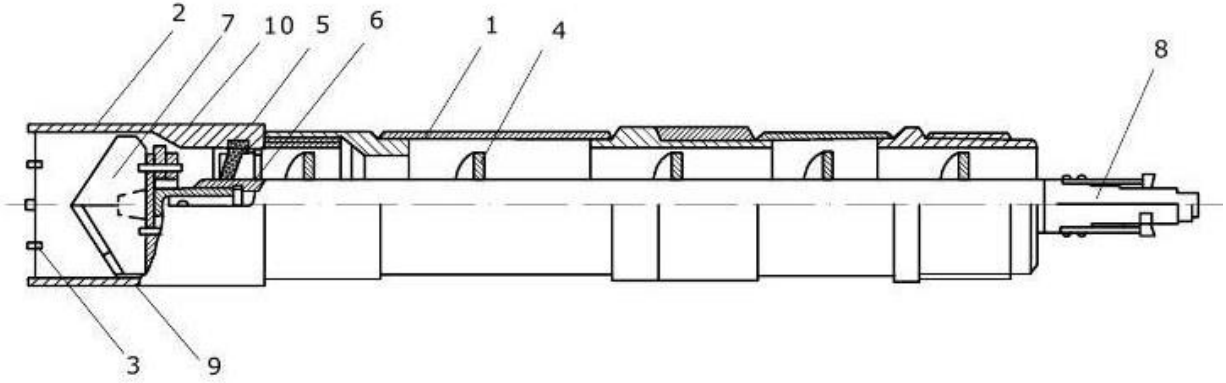


Рис. 6.6. Схема компоновки бурового снаряда для сооружения горизонтальных скважин в напорных песчаных горизонтах:
1 – защитная колонна; 2 – коронка; 3 0 победитовая коронка; 4 – шеки; 5 – резиновая манжета; 6 – соединительный переводник; 7 – долото; 8 – замок; 9 – режущие лопасти; 10 – диафрагма

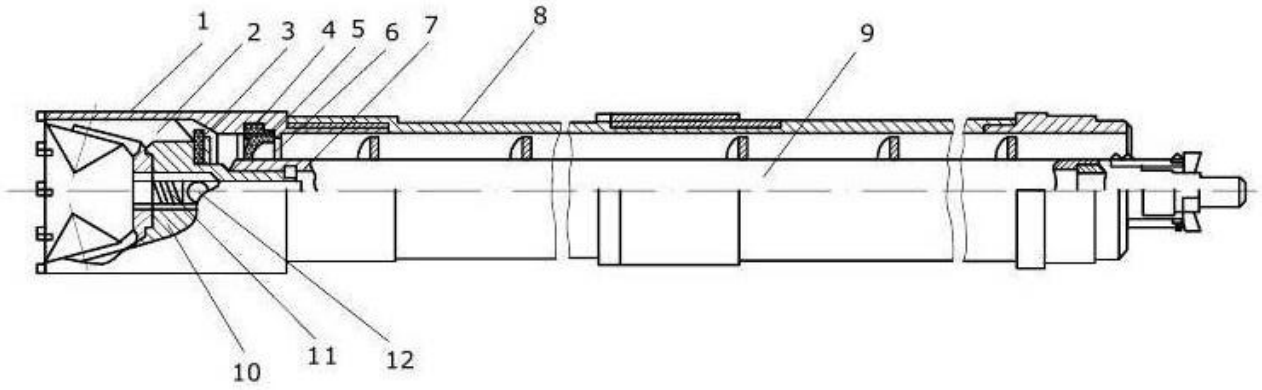


Рис. 6.7. Схема компоновки бурового снаряда для бурения в песках с пропластками твёрдых пород:
1 – коронка; 2 – центраторы; 3 – манжета; 4 – уплотнительное резиновое кольцо; 5 – втулка;
6 – стопорное кольцо;7 – переходник отсоединительный; 8 – защитная труба;
9 – внутренняя (шнековая) колонна; 10 – долото; 11 – пружина; 12 - шарик

6.2. Определение осевых усилий при бурении в неустойчивых обводнённых грунтах вращательным способом под защитой обсадной колонны

Общее осевое усилие, необходимое для бурения горизонтальных скважин в неустойчивых грунтах, складывается из сил трения рабочей (защитной) колонны о породу и осевого усилия, необходимого для разрушения горной породы.

Осевое усилие, необходимое для преодоления трения рабочих труб о породу, при бурении относительно устойчивых пород зависит от силы нормального давления, создаваемого весом рабочих труб и шнеков вместе с находящейся в них породой ($F_{рт}$). При бурении неустойчивых пород, например, песков, осевому перемещению труб, кроме того, будут препятствовать силы трения, вызванные горным давлением ($F_{гд}$), величина которого зависит от физико-механических свойств горных пород (угла внутреннего трения, сцепления, обводнённости и др.).

Величины $F_{рт}$ и $F_{гд}$ могут быть определены следующим образом:

$$F_{рт} = q_o L \mu, \qquad (6.10)$$

где q_o – вес 1 м труб вместе со шнеками и транспортируемой породой;

L –длина колонны труб;

μ –коэффициент трения колонны труб о породу.

При расчёте горного давления в качестве рабочей гипотезы была принята теория арочного эффекта, согласно которой при проходке над выработкой образуется свод естественного равновесия (свод обрушения), и на крепь выработки давит не вся толща породы, а лишь в объёме этого свода [235, 236].

Высота свода обрушения (рис. 6.8)

$$h_{св} = \frac{B}{2f}, \qquad (6.11)$$

где B – ширина свода обрушения;

f –коэффициент трения (для плывунов f=0,3; насыпного песка f=0,6; глинистых грунтов f=0,8).

В свою очередь

$$B = D\left[1 + 2tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right], \qquad (6.12)$$

где φ – угол внутреннего трения.

Горное давление вызывается весом породы в объёме свода обрушения, т.е. $P_{гд}=P_{\gamma}$. Вес породы в объёме свода обрушения

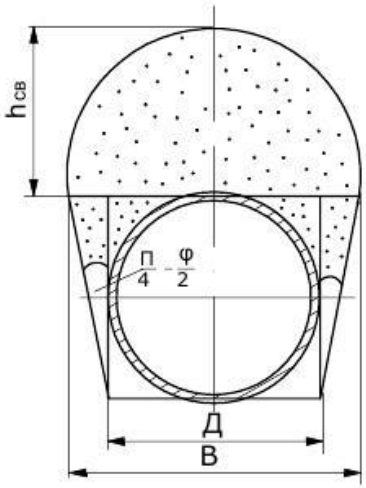


Рис. 6.8. Схема сводообразования при бурении горизонтальных скважин в обводненных песках

$$P_\gamma = \gamma_п \cdot S_{св} \cdot L = P_{гд}, \qquad (6.13)$$

где $\gamma_п$ – объёмный вес породы в своде обрушения;
$S_{св}$ – площадь свода обрушения;
L –глубина скважины.

Ввиду того, что бурение ведётся в обводнённых песках, необходимо учитывать эффект гидростатического взвешивания. В этом случае объёмный вес породы определяется по формуле

$$\gamma_п = (\gamma_с - \gamma_в)(1 - n), \qquad (6.14)$$

где $\gamma_с$, $\gamma_в$ – соответственно удельный вес песка и воды;
n –пористость в долях единицы.

Площадь свода обрушения

$$S_{св} = \frac{1}{3} D\left(\left[1 + 2tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right](D + 2h_c) - \frac{3}{8}\pi D\right), \qquad (6.15)$$

Подставив значения $\gamma_п$ и $S_{св}$ в уравнение (2.10), получим величину горного давления

$$P_{гд} = \frac{1}{3} DL(\gamma_с - \gamma_в)(1 - n)\left[\left(1 + 2tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right)(D + 2h_c) - \frac{3}{8}\pi D\right]. \qquad (6.16)$$

Сила трения, вызванная горным давлением, определится по формуле

$$F_{гд} = \mu P_{гд} = \frac{1}{3}\mu DL(\gamma_c - \gamma_в)(1-n)\left(\left[1+2tg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right](D+2h_c)-\frac{3}{8}\pi D\right), \qquad (6.17)$$

Суммарная сила трения, действующая на поверхности труб вдоль ствола скважины, составит $F_г = F_{рт} + F_{гд}$ или

$$F_r = L\mu\left(\frac{1}{3}D(\gamma_c - \gamma_в)(1-n)\left[\left(1+2tg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right)(D+2h_c)-\frac{3}{8}\pi D\right]+q_o\right), \qquad (6.18)$$

По этой формуле можно определить силы трения рабочей колонны о породу при извлечении труб без вращения.

При бурении колонна совершает поступательное движение вперёд со скоростью, равной механической скорости бурения, и вращательное движение вокруг оси. В этом случае сила трения в любой точке трубы будет направлена в сторону, противоположную абсолютной скорости её движения. Направление абсолютной скорости может быть определено из уравнения (рис. 6.9).

$$tq\beta = \frac{V_в}{V_г}, \qquad (6.19)$$

где $V_в$ и $V_г$ – соответственно линейная скорость вращения и скорость поступательного движения точки трубы

$$V_в = \omega R;\ V_г = V_{мех}, \qquad (6.20)$$

где ω – угловая скорость точки трубы; R – радиус вращения точки трубы

$$tq\beta = \frac{\omega R}{V_{мех}};\ \beta = arctq\frac{\omega R}{V_{мех}}, \qquad (6.21)$$

Поступательному движению колонны будет препятствовать сила трения F, которую можно определить из следующего уравнения:

$$F = F\cos\beta, \qquad (6.22)$$

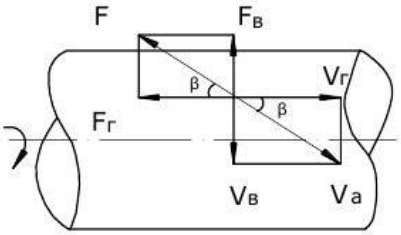


Рис. 6.9. Распределение скоростей и сил трения
на поверхности рабочих труб при бурении

С учётом выражения (6.22) силы трения определяются:

а) от горного давления

$$F_{гд} = \frac{1}{3}\mu DL(\gamma_c - \gamma_в)(1-n)\left(\left[1+2tq\left(45^0 - \frac{\varphi}{2}\right)\right]\cdot(D+2h_c) - \frac{3}{8}\pi D\right)\cos\beta\,, \qquad (6.23)$$

б) от собственного веса колонны

$$F_{рт} = \mu q_o L\cos\alpha\,, \qquad (6.24)$$

Суммарные силы трения

$$F = \mu L\left[\frac{D}{3}(\gamma_c - \gamma_в)(1-n)\left[\left(1+2tq\left(45^0 - \frac{\varphi}{2}\right)\right)\cdot(D+2h_c) - \frac{3}{8}\pi D\right] + q_o\right]\cos\beta\,. \qquad (6.25)$$

Для практического пользования формулами (6.23) и (6.24) построены номограммы (рис. 6.10), позволяющие в зависимости от механической скорости бурения, частоты вращения труб и коэффициентов трения определять силы трения на 1 м скважины от горного давления и от собственного веса колонны.

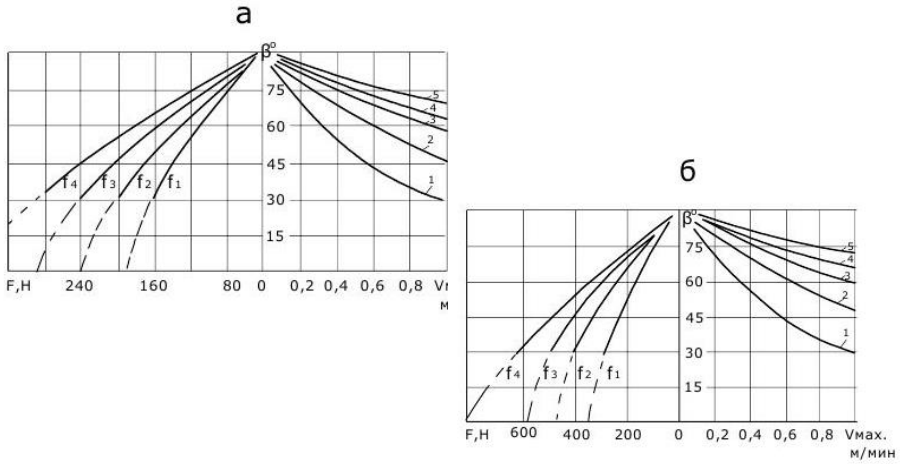


Рис. 6.10. Номограммы для определения сил трения на рабочих трубах, вызванных собственным весом колонны (а) и горным давлением (б) в зависимости от частоты вращения $n_т$, механической скорости бурения $V_{мех.}$ и коэффициента трения f :1, 2, 3, 4, 5 – соответствуют частоте вращения $n_т$ = 0,017; 0,033; 0,05; 0,07; 0,083 c^{-1}; f, f_3, f_4, f_4 – соответствуют коэффициентам трения f=0,3; 0,4; 0,5; 0,6

6.3. Обоснование частоты вращения шнековой колонны при вскрытии водоносных горизонтов под защитой обсадной колонны

Частота вращения шнеков играет важное практическое значение, от неё зависит скорость транспортирования породы, механическая скорость бурения, к.п.д. установки. Вопросам транспортирования породы шнеками посвящено значительное количество работ [237-252], основная масса которых отражает теорию работы вертикальных и наклонных шнеков. Анализ этих работ показывает, что для транспортирования породы с помощью вертикальных и крутонаклонных шнеков необходимо выполнение двух условий.

1. Для обеспечения смещения частицы к стенке скважины центробежные силы ($P_ц$) должны быть больше сил трения её о шнек ($F_{трш}$):

$$P_ц > F_{трш}$$

2. Частица не должна скатываться с поверхности спирали шнека вниз.

Выполнение первого условия достигается путём сообщения шнекам определенной частоты вращения, а второго – углом наклона спирали. Невыполнение любого из этих условий делает невозможным транспортирование частицы. Условия транспортирования породы горизонтальным шнеком существенно отличается от работы вертикального и наклонного шнека. При транспортировании породы горизонтальным шнеком центробежные силы и силы собственного веса частицы лежат в одной плоскости, причём центробежная сила постоянно меняется по направлению, а сила собственного веса всегда действует в одном. Вследствие этого результирующая сила, действующая на частицу, а, следовательно, сила трения частицы о спираль шнека и поверхности труб зависят от угла поворота шнека относительно оси вращения. При этом очевидно, что при условии $P_ц < G$, где $P_ц$ – центробежная сила, G – собственный вес частицы, частица будет находиться на лежачей стенке обсадной трубы и двигаться поступательно со скоростью

$$V = n_ш H, \qquad (6.26)$$

где $n_ш$ – частота вращения шнеков;

H – шаг спирали.

Б.А.Катанов в работе [238] показал, что поступательное движение транспортируемой частицы может быть и для случая наклонного шнека при угле

$$\beta_1 = \varphi_1 + \alpha, \qquad (6.27)$$

где α – угол наклона спирали;

φ_1 – угол трения частицы о спираль.

Известно, что при разрушении мягких пород с увеличением частоты вращения породоразрушающего инструмента до 200-300 об/мин с одной стороны происходит рост механической скорости бурения (причём, зависимость между ними носит линейный характер), а с другой стороны за счёт увеличения центробежных сил может произойти перебрасывание частицы, что является нежелательным, т.к. при этом снижается скорость её транспортирования. Практическое значение имеет определение частоты вращения шнеков, при которой это перебрасывание происходит.

Учитывая, что сооружение дренажных скважин в обводнённых грунтах осуществляется под защитой обсадной колонны, вращающейся в ту же сторону, что и шнеки, необходимо оценить влияние этого фактора. Заметим, что в вышеназванных работах, отражающих теорию наклонных и горизонтальных шнеков, этот фактор не рассматривался. Рассмотрим влияние вращения защитной колонны на транспортирование породы шнеком.

Рассмотрим равновесие частицы на винтовой поверхности невращающегося шнека и невращающейся защитной трубы. Уравнения равновесия частицы в проекциях на оси координат x; y; z (рис. 6.11) при наивысшем положении примут следующий вид.

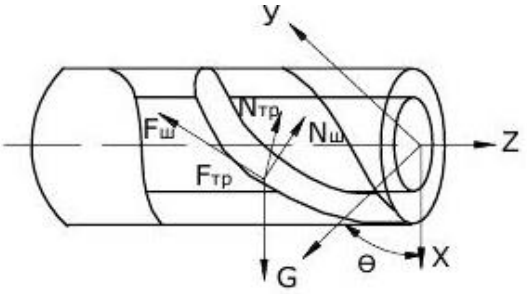


Рис. 6.11. Схема действия сил на частицу при невращающихся шнеке и рабочей трубе

$$\begin{cases} -\left(F_{mp}+F_{ш}\right)\sin\alpha+N_{ш}\cos\alpha=0, \\ G-\left(F_{mp}+F_{ш}\right)\cos\alpha\sin\theta-N_{mp}\cos\theta-N_{ш}\sin\alpha\sin\theta=0, \\ \left(F_{mp}+F_{ш}\right)\cos\alpha\cos\theta-N_{mp}\sin\theta+N_{ш}\sin\alpha\sin\theta=0 \end{cases} \qquad (6.28)$$

где $N_ш$ – реакция винтовой поверхности шнека;

$N_{тр}$ – реакция обсадной трубы;

$F_ш$ – сила трения частицы о винтовую поверхность шнека;

$F_{тр}$ – сила трения частицы о поверхность обсадной трубы;

α – угол подъёма винтовой поверхности шнека;

θ – угол поворота частицы относительно неподвижной системы координат x, y, z.

Учитывая, что

$$F_{тр} = f_{тр} N_{тр} \qquad (6.29)$$

и

$$F_{ш} = f_{ш} N_{ш}, \qquad (6.30)$$

где $f_{тр}$ и $f_{ш}$ – соответственно коэффициенты трения частицы об обсадные трубы и винтовую поверхность шнека.

Решение вышеприведенной системы приводит к следующему уравнению для определения критического значения θ:

$$tq\theta = \frac{f_{mp}}{\cos\alpha - f_{ш}\sin\alpha}. \qquad (6.31)$$

Так как в нашем случае $\alpha = 16^0 30'$ и $f_{тр} = f_{ш} = f$,, то при f=0,5; $\theta = 31^0 29'$; при f=0,4; $Q = 26^0 19'$ и при f=0,3; $\theta = 18^0 56'$.

Определим условия перебрасывания частицы при вращающемся шнеке и неподвижной обсадной трубе. При этом будем рассматривать установившийся режим транспортирования частицы, т.к. продолжительность неустановившегося движения по имеющимся данным составляет доли секунды. Уравнение равновесия частицы в проекциях на оси координат x, y, z в этом случае будут иметь следующий вид (схема действия сил приведена на рис. 6.12).

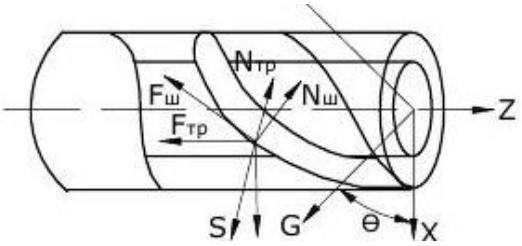


Рис. 6.12. Схема действия сил на частицу при вращающемся шнеке и невращающейся рабочей трубе

$$\begin{cases} -F_{mp} + N_{ш}\cos\alpha - F_{ш}\sin\alpha = 0, \\ G - F_{ш}\cos\alpha\sin\theta + (S - N_{mp})\cos\theta - N_{ш}\sin\alpha\sin\theta = 0 \\ (S + N_{ш})\sin\theta + N_{ш}\sin\alpha\cos\theta + F_{ш}\cos\alpha\cos\theta = 0 \end{cases}, \qquad (6.32)$$

где S – центробежная сила.

$$S = 4\pi^2 n_ш^2 mr \qquad (6.33)$$

m – масса частицы;

r –расстояние от частицы до оси шнека;

$n_ш$ –частота вращения шнека.

Решение системы (6.32) даёт следующее уравнение, связывающее параметры шнека с параметрами технологии транспортирования частицы:

$$n_ш^2 = \frac{q}{4\pi^2 r}\left(-\cos\theta + \frac{\cos\alpha - f_ш \sin\alpha}{f_{mp}(f_ш \cos\alpha + \sin\alpha)\sin\theta}\right), \qquad (6.34)$$

где q – ускорение силы тяжести.

Исследование на максимум, выраженная (6.34), показывает, что при

$$n_ш \langle \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{q}{r}\left(-\cos\theta + \frac{\cos\beta - f\sin\alpha}{f_{mp}(f_ш\cos\alpha + \sin\alpha)}\sin\theta\right)}, \qquad (6.35)$$

где θ определяется из выражения

$$tq\theta = -\frac{\cos\alpha - f_ш \sin\alpha}{f_{mp}(f_ш\cos\alpha + \sin\alpha)}, \qquad (6.36)$$

транспортирование частицы будет происходить без перебрасывания. При

$$n_ш \rangle \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{q}{r}\left(-\cos\theta + \frac{\cos\beta - f\sin\alpha}{f_{mp}(f_ш\cos\alpha + \sin\alpha)}\sin\theta\right)} \qquad (6.37)$$

будет происходить перебрасывание частицы.

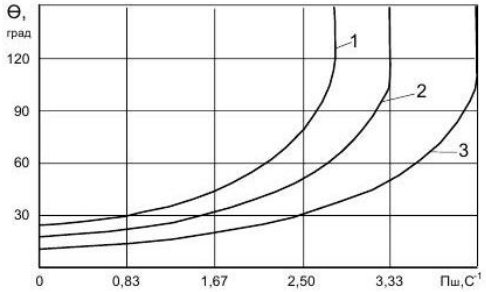


Рис. 6.13. Графики зависимости изменения угла подъема частицы (θ) от частоты вращения шнеков ($n_ш$) при коэффициентах трения:
1 – f=0,5; 2 – f=0,4; 3 – f=0,5

Зависимость угла поворота θ от частоты вращения шнека при неподвижной рабочей трубе для различных коэффициентов трения проиллюстрированы графически (рис. 6.13).

Определим влияние вращения обсадных труб на характер транспортирования частицы. Схема действующих на неё сил приведена на рис. 6.14.

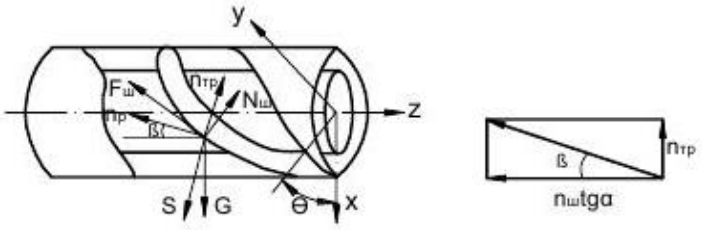


Рис. 6.14. Схема действия сил на частицу
при вращающихся шнеке и рабочей трубе

Уравнения равновесия частицы в проекциях на координаты x, y, z в установившемся режиме бурения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} -F_{mp}\cos\psi + N_{ш}\cos\alpha - F_{ш}\sin\alpha = 0 \\ mq - F_{mp}\sin\psi\sin\theta - F_{ш}\cos\alpha\sin\theta + 4\pi^2 m n_{ш}^2 r\cos\theta - N_{mp}\cos\theta - N_{ш}\sin\alpha\sin\theta = 0, \\ F_{mp}\sin\psi\cos\theta + N_{ш}\sin\alpha\cos\theta = 0 \end{cases} \quad (6.38)$$

где

$$\psi = arctq\frac{n_m}{n_{ш}tq\alpha}, \quad (6.39)$$

Решение полученной системы даёт следующее уравнение, связывающее параметры шнека с параметрами технологии транспортирования частицы

$$n_{ш}^2 = \frac{q}{4\pi^2 r}\left(-\cos\theta + \frac{\dfrac{\cos\alpha - f_{ш}\sin\alpha}{f_{mp}\cos\psi}}{(\cos\alpha - f_{ш}\sin\alpha)tq\psi + f_{ш}\cos\alpha + \sin\alpha}\right). \quad (6.40)$$

Исследование на максимум выражения (6.40) показывает, что при

$$n_{ш} \langle \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{q}{r\cos\theta}}, \quad (6.41)$$

где θ определяется из выражения

$$tq\theta = -\frac{\cos\alpha - f_{ш}\sin\alpha}{f_{тр}\cos\psi\left(\left(\cos\alpha - f_{ш}\sin\alpha\right)tq\psi + f_{ш}\cos\alpha + \sin\alpha\right)}, \qquad (6.42)$$

транспортирование частицы будет происходить по прямой линии.

При увеличении частоты вращения шнека свыше критической, определенной по формуле (6.41), происходит перебрасывание частицы.

Зависимость между $n_т$ и критическими значениями $n_ш$ и θ при f=0,5 представлена графически на рис. 6.15. Из графика видно, что вращение рабочих труб способствует перебрасыванию частицы, но в пределах частот вращения обсадных труб 2-4 об/мин это влияние незначительно. Для улучшения транспортирующей способности шнека желательно вращение обсадной колонны и шнеков направить в противоположные стороны. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

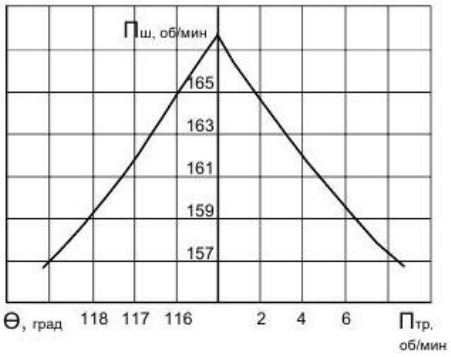


Рис. 6.15. Зависимость критических значений частоты вращения шнеков ($n_ш$) и угла поворота частицы (θ) от частоты вращения труб ($n_т$) при коэффициенте трения $f_т$=0,5

Определим теперь частоту вращения шнеков, при которой будет достигнут режим эффективного удаления всего объёма разрушенной породы.

Эффективное удаление разрушенной породы будет при условии, что

$$Q_{ш} \rangle Q_{б} \quad , \qquad (6.43)$$

где $Q_ш$ – производительность шнека;

$Q_б$ – объём разрушенной породы в единицу времени.

Считая, что частица движется поступательно, производительность шнеков определится из выражения

$$Q_ш = n_ш H \psi_1 F_c, \qquad (6.44)$$

где Ψ_1 - коэффициент заполнения шнеков. По данным [238] для нормальной работы шнека он должен находиться в пределах Ψ_1=0,25-0,3; в общем можно считать Ψ_1=0,25;

F_c – площадь поперечного сечения шнека

$$F_c = \frac{\pi\left(Д_ш^2 - d_в^2\right)}{4}, \qquad (6.45)$$

где $Д_ш$ и $d_в$ – соответственно диаметр спирали и вала шнека. Объём разрушенной породы при бурении определится из выражения:

$$Q_б = \frac{\pi Д^2}{4} \cdot K_1 K_2 V_{мех}, \qquad (6.46)$$

где $Д$ – диаметр породоразрушающего инструмента коронки (башмака) обсадных труб;

K_1 – коэффициент, учитывающий расширение скважины;

K_2 – коэффициент разрыхления породы (для песков K_2=1,5);

$V_{мех}$ – механическая скорость бурения.

Представив значения $Q_ш$, $Q_{бур}$ в выражение (6.43) и, сделав преобразования относительно $n_ш$, получим:

$$n_ш \min = \frac{Д^2 K_1 K_2 V_{мех}}{H(Д_ш^2 - d_в^2)\psi_1}, \qquad (6.47)$$

Формула выражает связь между геометрическими параметрами шнека, диаметром породоразрушающего инструмента, механической скоростью бурения и коэффициентом заполнения шнека при транспортировании частицы по прямой. Зависимость минимальной частоты вращения шнеков от механической скорости бурения представлена графически на рис. 6.16.

Опыт сооружения горизонтальных дренажных скважин под защитой обсадной колонны показал, что при вскрытии напорных водоносных горизонтов и внезапных остановках по разным причинам (отключение электроэнергии, аварийные ситуации и пр.) возможны случаи прорыва в рабочие трубы водопесчаной смеси и заклинивание в них шнеков. Ликвидация таких прихватов нередко заканчивалась либо разворотом труб, либо отсоединением коронки от шнеков, что неизбежно приводило к потере скважины. Для предупреждения подобных случаев необходимо, чтобы

колонны рабочих труб и шнеков вращались в разные относительно друг друга стороны. Принятие такого технического решения вызывает необходимость теоретической оценки влияния направления вращения рабочих труб на транспортирующую способность шнеков. Опираясь на ранее проведенные исследования для случая одностороннего вращения труб и шнеков, решение этой задачи может быть также осуществлено путём учёта сил, действующих на частицу при движении её по прямой, т.е. при максимальных скоростях транспортирования. Схема действия сил на транспортируемую частицу приведена на рис. 6.17.

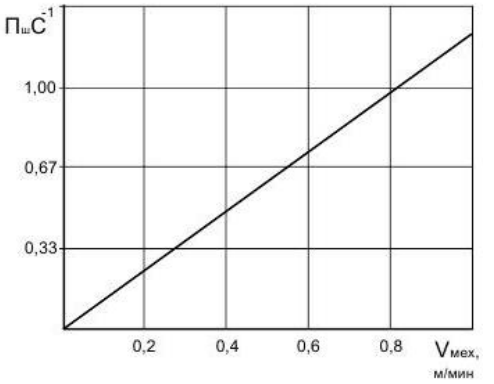


Рис. 6.16. Номограмма для определения минимальной частоты вращения шнеков в зависимости от механической скорости бурения

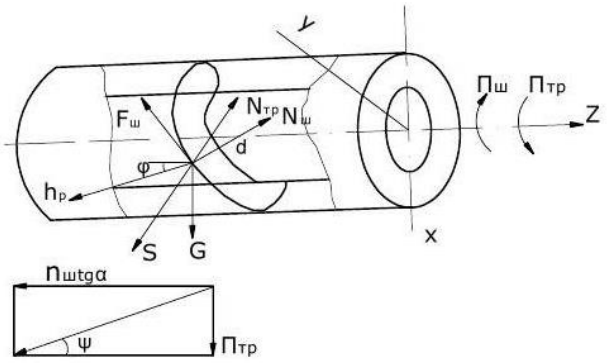


Рис. 6.17. Схема действия сил на транспортируемую частицу при равностороннем вращении труб и шнеков

Уравнения равновесия действующих на частицу сил в проекциях на оси *x, y, z* будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} mq + F_{mp}\sin\psi\sin\theta - F_{ш}\cos\alpha\sin\theta + 4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{mp}^2\right)mr\cos\theta - N_{mp}\cos\theta - \\ - N_{ш}\sin\alpha\sin\theta = 0; \\ 4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{mp}^2\right)mr\sin\theta - N_{mp}\sin\theta + F_{ш}\cos\alpha\cos\theta + N_{ш}\sin\alpha\cos\theta - F_{mp}\sin\psi\cos\theta = 0; \\ - F_{mp}\cos\psi + N_{ш}\cos\alpha - F_{ш}\sin\alpha = 0 \end{cases} \quad (6.48)$$

где m – масса частицы, кг;

$F_{ш}$ – сила трения частицы о поверхность витка шнека, Н;

F_{mp} – сила трения частицы о трубу, Н;

N_{mp} – реакция трубы, Н;

$N_{ш}$ – реакция винтовой поверхности шнека, Н;

n_{mp} – частота вращения труб, $с^{-1}$;

$n_{ш}$ – частота вращения шнеков, $с^{-1}$;

q –ускорение силы тяжести, $м/с^2$;

r –радиус шнека, м;

α – угол подъёма винтовой линии, рад.

h –шаг спирали шнека, м;

θ – угол, определяющий положение частицы (положение образующей, на которой она находится), по отношению к плоскости $x - z$ в направлении вращения шнека, рад;

Ψ –угол, образованный силой трения частицы о трубу с осью z, рад.

$$\psi = arctq = \frac{n_{mp}}{n_{ш} tq\alpha} \quad (6.49)$$

Силы трения

$F_{mp}=f_{mp}N_{mp}$ и $F_{ш}=f_{ш}N_{ш}$

где f_{mp} и $f_{ш}$ – коэффициенты трения частицы соответственно о трубу и шнек.

Решение полученной системы уравнений (6.48) даёт следующее уравнение для определения частоты вращения шнеков.

$$n_{ш}^2 + \frac{q}{4\pi^2 r(1+tq^2\psi)} \cdot \left(\cos\theta + \frac{\sin\theta}{f_{mp}\left(\frac{f_{ш}\cos\alpha + \sin\alpha}{f_{ш}\sin\alpha - \cos\alpha} + tq\varphi \right)\cos\psi} \right) = 0 \quad (6.50)$$

или, учитывая, что $tq\alpha=h/2\pi r$, где h – шаг спирали шнека, получим

$$n_ш^2 + \frac{qr}{4\pi r^2 + h^2 tq\psi}\left(\cos\theta + \frac{\sin\theta}{\left(\frac{2\pi f_ш + h}{f_ш h - 2\pi r} + tq\psi\right)\cos\psi}\right) = 0\,. \qquad (6.51)$$

Исследование на максимум выражения (6.51) показывает, что при

$$n_ш \le \sqrt{\frac{-qr}{(4\pi^2 r^2 + h^2 tq^2\psi)\cos\theta}}\,, \qquad (6.52)$$

где

$$\theta = arctq\frac{-1}{f_{mp}\cos\psi\left(\frac{2\pi f_ш + h}{2\pi r - f_ш h} - tq\psi\right)}\,, \qquad (6.53)$$

транспортирование частиц будет происходить без перебрасывания, т.е. по прямой линии. Графически зависимости критической частоты вращения шнеков, при которой начинается перебрасывание транспортируемой породы, от частоты вращения рабочих труб, при различных коэффициентах трения, представлены на рис. 6.18.

Анализ полученных зависимостей показывает, что применение разностороннего вращения рабочих труб и шнеков, а также снижение коэффициентов трения (например, с помощью антифрикционных покрытий) повышает критическую частоту вращения шнеков и тем самым оказывает положительную роль на их транспортирующую способность.

Зависимость (6.52) даёт возможность установить характер связи между шагом спирали шнека и частотой его вращения. Для решения этой задачи путём подстановки значений Ψ, α преобразуем уравнение (6.52) и (6.53) в следующий вид

$$\cos\theta = -\frac{q}{4\pi^2 r n_{mp}^2 (1 + n_ш / n_{mp})^2}\,, \qquad (6.54)$$

$$tq\theta = -\frac{4\pi^2 r^2 / (n_ш / n_{mp})^2 + n^2}{f_{mp} h\left(\frac{2\pi f_ш + h}{2\pi r - f_ш h} - \frac{2\pi}{h(n_ш / n_{mp})}\right)}\,. \qquad (6.55)$$

По этим формулам для случая одностороннего вращения труб и шнеков при n_{mp}=0,05 с$^{-1}$ (3 об/мин) r=70 мм и $f_ш$= f_{mp}=0,65 построен график зависимости критической частоты вращения шнеков от шага спирали (рис. 6.19).

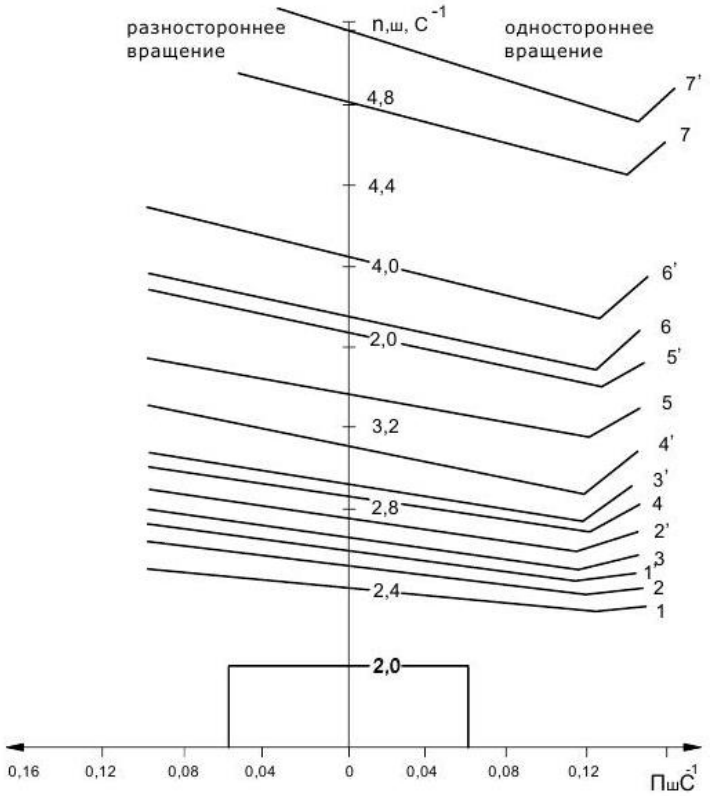


Рис. 6.18. Зависимость критической частоты вращения шнеков ($n_ш$) от частоты вращения рабочих труб ($n_т$):
1,2…, 7 - $f_{тр}$ и $f_ш$ и соответственно равны 0,65; 0,60; 0,50; 0,40; 0,35; 0,25.
$1^/$, $2^/$, …, $7^/$, $f_{тр}$= $f_{тр}$, $f_ш$ соответственно равен: 0,45; 0,45; 0,41; 0,38; 0,3; 0,26; 0,19. Шаг спирали h=140 мм

На участке АВ транспортирование породы возможно в диапазоне вращения шнеков $n_ш$=0; …; 1,9 $с^{-1}$, на участке ВС между критической частотой вращения шнеков и шагом спирали существует однозначная нелинейная зависимость, причём здесь на большей части участка большим изменениям шага спирали соответствуют значительные изменения критической частоты вращения. На участке СД частота вращения шнеков ограничена технической характеристикой буровой установки УЛБ-130.

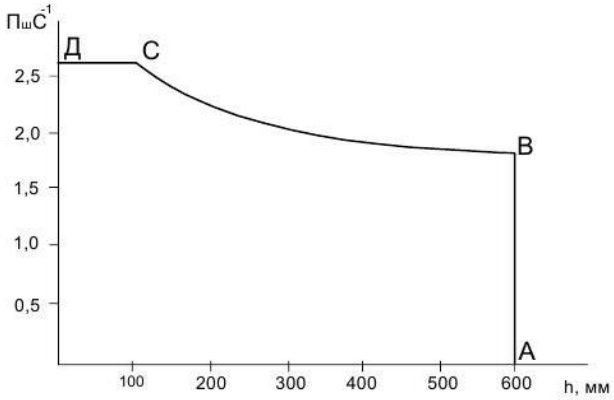


Рис. 6.19. График зависимости критической частоты вращения шнеков от шага спирали

С учётом проведенного анализа по установлению зависимости изменения критической частоты вращения шнеков от шага спирали можно определить скорости транспортирования разрушенной породы, т.е. транспортирующую способность шнека, по следующей формуле:

$$V_m = n_ш \cdot h, \qquad (6.56)$$

где $n_ш$, h – соответственно критическая частота вращения и шаг спирали шнека.

Зависимости изменения $V_m = f(n_ш)$ и $V_m = f(h)$ представлены графически на рис. 6.20. Анализ представленных на рисунке кривых показывает, что на участке ВС, вследствие нелинейности изменения шага спирали от частоты вращения, небольшие изменения $n_ш$ влекут за собой резкое изменение (снижение) скорости транспортирования. На участке АБ при h=676 мм и изменении $n_ш$ в пределах от 0 до 1,9 с$^{-1}$ зависимость $V_m = f(n_ш)$ носит линейный характер. На участке СД $V_m = f(n_ш)$ при h=90 мм выражена отрезком прямой, параллельной оси ординат. Совместный анализ кривых, представленных на рис. 6.19 и 6.20, позволяет сделать следующие выводы:

1. Между шагом спирали шнеков и критической частотой их вращения существует определенная зависимость. С увеличением шага спирали шнеков критическая частота вращения уменьшается.

2. Верхняя допустимая граница значений шага спирали горизонтального шнека, при котором ещё происходит транспортирование частицы по прямой линии, составляет 676 мм. При большом шаге происходит перебрасывание частицы, и транспортирование породы практически прекращается при любой частоте вращения шнека.

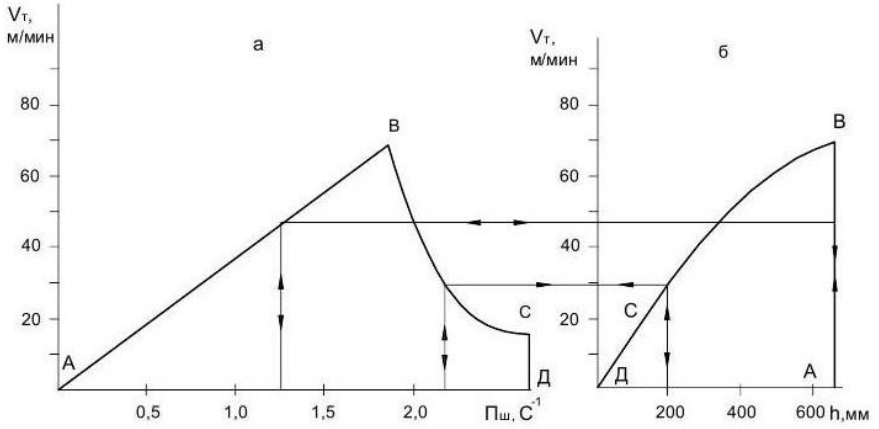


Рис. 6.20. Зависимость транспортирующей способности шнеков (V_m) от а) частоты вращения шнеков ($n_ш$); б) шага спирали (h)

Исходя из технической характеристики установки УЛБ-130, для достижения максимальных скоростей транспортирования не липких (песчаных) грунтов рекомендуется шаг спирали шнека брать в пределах 200-400 мм. При этом рациональная критическая частота вращения шнека должна быть в пределах 1,9-2,0 $с^{-1}$ (113-120 об/мин.)

Нижняя граница изменения частоты вращения шнеков может быть определена из условий полного удаления разрушенной породы по известной формуле [253]

$$n_{\min} = \frac{r_u^2 K_1 K_2 V_{мех}}{h(r_u^2 - r_в^2)\psi'} \qquad (6.57)$$

где r_u – радиус породоразрушающего инструмента, м;

$r_в$ – радиус вала шнека, м;

$V_{мех}$ – механическая скорость бурения, м/с;

ψ' – коэффициент заполнения шнека;

K_1 – коэффициент разрыхления породы;

K_2 – коэффициент, учитывающий расширение скважины за счёт выноса песка через забой скважины.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

а) для достижения максимально возможной скорости транспортирования породы рабочая зона частот вращения и шага спирали

шнеков установки УЛБ-130 должна определяться исходя из следующих выражений:

$$\frac{r_u^2 K_1 K_2 V_{мех}}{h(r_u^2 - r_в^2)\psi'} \langle n_ш \langle 2{,}0 \text{ с}^{-1} \text{ (120 об/мин)}, \quad (6.58)$$

$$90 \text{ мм} < h < 400 \text{ мм}; \quad (6.59)$$

б) значения $n_ш$ и h должны приниматься в пределах рабочей зоны максимально возможными.

Так как сооружение ГДС осуществляется с промывкой скважины водой, оценим влияние промывочной жидкости на транспортирующую способность шнека.

Подача жидкости к забою осуществляется по шнекам. Вынос разрушенной породы ведётся шнеками в потоке промывочной жидкости. При производительности насоса, равной производительности шнека, транспортирование будет происходить в условиях смачивания разрушенной породы. В этом случае промывочная жидкость будет оказывать взвешивающее действие, способствовать более равномерному распределению шлама в межвинтовом пространстве.

В случае если производительность бурового насоса будет выше производительности шнека, промывочная жидкость будет оказывать дополнительное давление на транспортируемую породу.

Схема действия сил на частицу, транспортируемую в потоке промывочной жидкости, приведена на рис. 6.21.

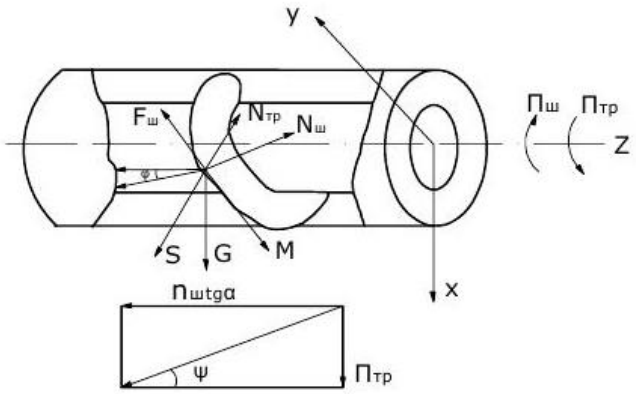


Рис. 6.21. Схема действия сил на частицу

Уравнения равновесия сил, действующего на частицу в проекциях оси *x, y, z*, будут иметь следующий вид:

$$
\begin{aligned}
&-F_{тр}\cos\psi + N_{ш}\cos\alpha - F_{ш}\sin\alpha + M\sin\alpha = 0\\
&mq + F_{тр}\sin\psi\sin\theta - F_{ш}\cos\alpha\sin\theta + M\cos\alpha\sin\theta +\\
&+ 4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{тр}^2\right)mr\cos\theta - N_{тр}\cos\theta - N_{ш}\sin\alpha\sin\theta = 0;\\
&4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{тр}^2\right)mr\sin\theta - N_{тр}\sin\theta + F_{ш}\cos\alpha\cos\theta -\\
&- M\cos\alpha\cos\theta + N_{ш}\sin\alpha\cos\theta - F_{тр}\sin\psi\cos\theta = 0,
\end{aligned}
\qquad (6.60)
$$

где m – масса частицы, кг;

M – сила давления промывочной жидкости на частицу, Н;

$F_{ш}$ – сила трения частицы о поверхность витка шнека, Н;

$F_{тр}$ – сила трения частицы о трубу, Н;

$N_{тр}$ – реакция трубы, Н;

$N_{ш}$ – реакция витковой поверхности шнека, Н;

$n_{тр}$ – частота вращения труб, $с^{-1}$;

q –ускорение силы тяжести, $м/с^{-2}$;

α – угол подъема винтовой линии, рад;

θ – угол, определяющий положение частицы (положение образующей, на которой она находится), по отношению к плоскости $x - z$ в направлении вращения шнека, рад;

Ψ – угол, образованный силой трения частицы о трубу с осью z, рад.

Сила трения

$$F_{тр} = f_{тр}\,N_{тр} \text{ и } F_{ш} = f_{ш}\,N_{ш}, \qquad (6.61)$$

Где, $M = \kappa F_{ш}$,

$f_{тр}$ и $f_{ш}$ – коэффициенты трения частицы соответственно о трубу и шнек;

κ – коэффициент пропорциональности.

Уравнение действия сил, приложенных к частице, транспортируемой в потоке промывочной жидкости с учётом выражений (6.49); (6.50); (6.51) и (6.48), можно записать следующим:

$$
\begin{aligned}
&-f_{тр}N_{тр}\cos\psi + N_{ш}\cos\alpha - (1-\kappa)\,f_{ш}N_{ш}\sin\alpha = 0\\
&mq + f_{тр}N_{тр}\sin\psi\sin\theta - (1-\kappa)\,f_{ш}N_{ш}\cos\alpha\sin\theta +\\
&+ 4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{тр}^2\right)mr\cos\theta - N_{тр}\cos\theta - N_{ш}\sin\alpha\sin\theta = 0;\\
&4\pi^2\left(n_{ш}^2 + n_{тр}^2\right)mr\sin\theta - N_{тр}\sin\theta + (1-\kappa)\,f_{ш}N_{ш}\cos\alpha\cos\theta +\\
&+ N_{ш}\sin\alpha\cos\theta - f_{тр}N_{тр}\sin\psi\cos\theta = 0.
\end{aligned}
\qquad (6.62)
$$

Решение полученной системы даёт следующие формулы для определения критической частоты вращения шнеков:

$$\cos\theta = -\frac{q}{4\pi^2 r n_{mp}^2\left(1+\left(n_ш / n_{mp}\right)^2\right)} \quad ; \tag{6.63}$$

$$tq\theta = -\frac{\sqrt{4\pi^2 r^2 / \left(n_ш / n_{mp}\right)^2 - h^2}}{hf_{mp}\left(\frac{2\pi r(1-k) f_ш + h}{2\pi r - (1-k) f_ш h} - \frac{2\pi r}{h(n_ш / n_{mp})}\right)} . \tag{6.64}$$

Графически зона зависимости критической частоты вращения шнеков от частоты вращения рабочих труб при изменении силы давления промывочной жидкости от нуля до $M=F_ш$ показана на рис. 6.22.

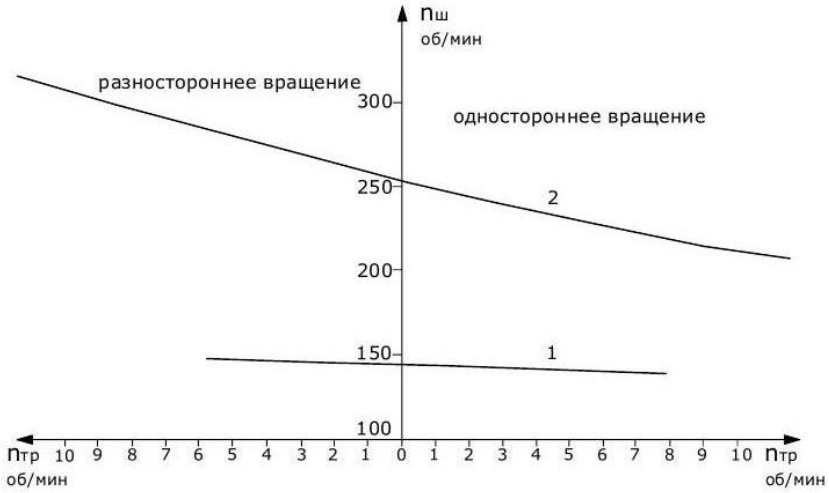


Рис. 6.22. Зависимость критической частоты вращения шнеков ($n_ш$) от частоты вращения рабочих труб *(n_m); 1-*$f_m = f_ш$=0,65; 2 - f_m=0,65; $f_ш$=0 ($M = F_ш$)

Из анализа графика следует, что применение промывочной жидкости ведёт к снижению коэффициента трения транспортируемой частицы о спираль шнека. При снижении до нуля (случай переноса частицы потоком жидкости) критическая частота вращения шнеков возрастает на 66 %. Из этого можно сделать важный практический вывод, что эффективное удаление разрушенной породы в потоке промывочной жидкости ведёт к уменьшению мощности на привод вращения защитной колонны.

6.4. Особенности вскрытия водоносных горизонтов, представленных лессами и лессовидными суглинками

Ранее было показано, что подтоплению подвержено значительное количество территорий России, Украины, Республик Средней Азии, и оно происходит на участках, верхняя часть которых сложена слабопроницаемыми грунтами, из которых затруднён отток поступающих сверху вод различного происхождения (утечек из трубопроводов, дождевых и паводковых вод и т.д.). Такими грунтами являются лёссы и лессовидные суглинки. По классификации [254] под лёссом понимают породу рыхлую, светло-жёлтую, неслоистую, макропористую, пылеватую, с преобладанием крупнопылеватых частиц, способную сохранять почти вертикальные откосы. Лессовидные породы встречаются в Евразии и Америке. Широко распространены в Средней и Южной части Восточной Европы, Средней Азии, Северном Китае, Южной части Сибири, на юге Украины, южных областях РФ.

По химическому составу в лессах преобладает: SiO_2 – 43,1 – 78,0 %, Al_2O_3 – 4,0 ÷ 17,54 %, Fe_2O_3 – 9,79 %, CaO – 2,68 – 15,9 %, MgO – 0,69 ÷ 3,89 %, Na_2O – 0,07 – 3,15 %, K_2O – 0,19 – 2,8 % и т.д.

Пористость лессовидных грунтов колеблется от 38 до 59 %, в среднем она равна 45 %. При увлажнении и приложении нагрузки поры уменьшаются. Лёссы – грунты существенно пылеватые. Высокая общая пористость их обязана в значительной мере однородности гранулометрического состава.

Лессовидные суглинки отличаются от лёссов более разнородным и глинистым составом.

В качестве примера в таблице 6.1 приведен фракционный состав лессовидных суглинков, участвующих в обводнении промплощадки Михайловского ГОКа.

Таблица 6.1 - Гранулометрический состав жёлто-бурых лессовидных суглинков

№ лучевой сква-жины	Содержание частиц, %						
	песчаных			пылеватых		глинистых	
	0,5…0,25	0,25…0,1	0,1…0,05	0,05… 0,01	0,01… 0,001	0,005… 0,001	<0,001
1	0,15	0,50	4,25	47,5	16,0	23,4	8,3
2	0,49	0,40	6,81	46,6	18,6	19,0	8,6

Водопроницаемость лессовых пород изменчива даже на небольших участках.

Средний коэффициент фильтрации лессов составляет $К_ф \approx 1$ м/сут [254]. Лессовидные суглинки имеют меньшую проницаемость. Конкретные

значения водопроницаемости лессовидных суглинков, слагающих промплощадку комбината, приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 - Значения коэффициента фильтрации лессовых грунтов по данным восстановления уровня воды в наблюдательных скважинах после желонирования

№№ скв.	Мощность водонос-ного горизонта, m, м	Глубина залегания статичес-кого уровня воды, h, м	Величина понижения уровня, S, м	Время восстанов-ления уровня, t, мин.	Дебит в конце желони-рования, Q, м^3/сут	Коэффи-циент фильтра-ции, К, м/сут
1	2	3	4	5	6	7
23а	9,9	4,9	8,55	180	15,26	0,062
17	8,4	7,3	6,1	240	9,79	0,11
19	6,35	10,65	6,95	642	13,68	0,54
12а	8,9	8,1	9,55	515	11,8	0,35
2	13,30	5,7	12,55	442	11,52	0,14
16н	9,7	3,8	8,9	176	13,68	0,12
5	8,1	3,9	8,6	184	11,52	0,14
6	6,7	9,9	8,0	187	18,48	0,48
25	12,7	5,8	12,5	98	3,02	0,015
27	12,4	1,10	12,8	180	6,52	0,03
24	6,35	8,75	6,25	119	6,38	0,12
26а	10,25	3,75	10,25	223	10,7	0,11
7	5,6	9,9	5,9	125	13,24	0,34
11	10,7	5,8	10,4	490	16,65	0,14
20	9,5	13,5	8,9	233	9,67	0,14
21	8,83	4,27	8,83	160	20,73	0,19
22	14,4	14,60	4,80	309	19,96	0,26
14	9,3	7,2	9,80	316	23,65	0,36
28	11,25	2,25	11,65	183	27,76	0,19

Сведения о физико-механических свойствах лессовидных суглинков, отобранных в другом регионе их распространения, приведены в таблице 6.3.

Из анализа физико-механических свойств лессовидных суглинков следует, что они имеют внутреннее сцепление (с), низкие коэффициенты фильтрации, что исключает оплывание забоя при бурении, а, следовательно, не требует применения специальных породоразрушающих инструментов, как это необходимо при вскрытии рыхлых водоносных горизонтов, у которых,

Таблица 6.3 - Физико-механические свойства грунтов по образцам инженерно-геологической скважины в лессовидных суглинках.

Глубина отбора проб	Пластичность, доли ед.			Природная влажность, %	Консистенция		Степень влажности, доли ед.	Плотность минеральной части, г/см^3	Плотность, г/см^3	Пористость, %	Коэффиц. пористости, доли ед.	Плотность скелета, г/см^3	Неконсолидир. срез с предв. увлажнен.		По подготовл. поверхности	
	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности		Показатель текучести, доли ед.	Состояние грунта							Угол внутр. трения, град.	Удельное сцепление, 10^5 Па	Угол внутр. трения, град.	Удельное сцепление, 10^5 Па
Суглинок лессовидный																
6,20÷ 6,60	30	19	11	13	0		0,33	2,69	1,47	51,67	1,069	1,30	22	0,20	22	0,10
8,40÷ 8,80	31	19	12	17	0		0,44	2,69	1,54	50,93	1,038	1,32	19	0,15	17	0,10
10,20÷ 10,60	28	19	9	19	0		0,58	2,68	1,70	46,64	0,874	1,43	18	0,38	17	0,25
12,00÷ 12,40	26	18	8	23	0,63		0,91	2,68	1,97	40,30	0,675	1,60	26	0,25	26	0,20
13,40÷ 18,80	27	18	9	19	0,11		0,91	2,68	2,05	35,82	0,558	1,72	19	0,45		
16,20÷ 16,60	25	18	7	24	0,86		1,00	2,68	2,04	38,43	0,625	1,65	26	0,10		

как известно, с=0.

Исследования, проведенные Анпиловым В.Е., Пономаренко Ю.В. доказали, что осушение грунтов, имеющих коэффициенты фильтрации $К_ф \leq$ 0,1 м/сутки целесообразно проводить горизонтальными дренажными скважинами [255].

При разработке технологии вскрытия таких водоносных горизонтов необходимо иметь в виду, что

- при бурении горизонтальных скважин промывочная жидкость не участвует в процессе поддержания стенок скважины от обрушения;

- низкая прочность грунтов воздействие фильтрационного потока на стенки скважины, несмотря на наличие внутренних связей (сцепления), ведут к обрушению стенок скважин и делают невозможным установку в ней фильтров без применения защитной колонны;

- механическое воздействие бурильной колонны на лежачую стенку скважины в сочетании с потоком промывочной жидкости ведёт к интенсивной её подработке и искривлению скважины;

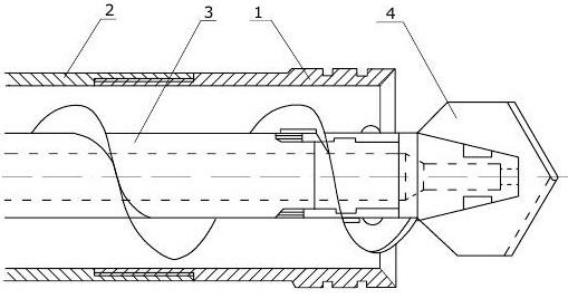
- минералогический состав лессов и лессовидных суглинков, их способность к размоканию в водной среде требует применения специальных породоразрушающих инструментов, исключающих контактирование промывочной жидкости со стенками скважины.

С учётом этих специфических особенностей, имеющих место при бурении лессов и лессовидных суглинков, разработаны схемы вскрытия водоносных горизонтов и породоразрушающие инструменты, которые были предложены и прошли успешные испытания в промышленных условиях. Схема компоновки бурового снаряда и конструкции породоразрушающих инструментов для защитной и бурильной колонны приведены на рис 6.23.

Как видно из рис.6.23, защитная колонна оснащена специальной коронкой режущего типа (башмаком). Конструктивно она выполнена таким образом, чтобы обеспечить максимальное сохранение естественной проницаемости водоносного горизонта за счёт срезания кольцевого сечения забоя, площадь которого больше площади сечения, образованной породоразрушающим инструментом, установленным на внутренней шнековой колонне. За счёт придания режущей кромке определённого угла резания, разрушенная порода может поступать только вовнутрь защитной колонны.

Таким образом, исключается возможность попадания промывочной жидкости в затрубное пространство и взаимодействие её с водоносным горизонтом. Для эффективного разрушения мягких грунтов и отделения его от массива башмаку придана форма одностороннего клина с углом в 30^0, который по данным [256] является оптимальным при разрушении пород резанием.

а)



б)

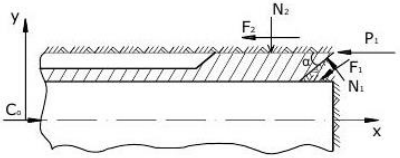


Рис. 6.23. Схема вскрытия водоносных горизонтов, представленных лессами и лессовидными суглинками:
а) Схема действия сил на коронку защитной колонны при бурении по водоносному горизонту:
1, 2-соответственно коронка и защитная колонна; 3, 4-соответственно внутренняя (шнековая) колонна и её породоразрушающий инструмент;
б) схема расчёта осевого усилия (C_0)

Определим осевое усилие, необходимое для обеспечения эффективного резания породы при действии сил на башмак, указанных на рис. 6.23.

Внедрение башмака в породу будет происходить в том случае, если осевая нагрузка превысит силы, оказывающие ему сопротивление.

Для определения величины C_0 спроектируем силы на оси *x* и *y*.

$$C_0 - F_2 - P - F_1\cos\alpha - N_1\sin\alpha = 0; \quad (6.65)$$

$$-N_2 - F_1\sin\alpha + N_1\cos\alpha = 0, \quad (6.66)$$

где P – реакция породы у кромки коронки;

N_1, N_2 – реакция соответственно на передней и задней гранях поверхности;

F_1, F_2 – силы трения соответственно на передней и задней гранях поверхности;

α – угол резания коронки.

При бурении коронка, кроме поступательного, совершает вращательное движение, величины сил, препятствующие осевому перемещению коронки, будут соответственно равны

$$F_{2r}=F_2\cos\beta; \tag{6.67}$$

$$P_r=P\cos\beta; \tag{6.68}$$

$$F_{1r}=F_1\cos\gamma, \tag{6.69}$$

где $$\beta = arctg\,\frac{2\pi nR}{V_{мех}} \tag{6.70}$$

$V_{мех}$ – техническая скорость бурения;

n –частота вращения;

D –внешний диаметр коронки.

$$\gamma = arctg\,\frac{2\pi nR\cos\alpha}{V_{мех}}. \tag{6.71}$$

Система уравнений (6.65) и (6.66) в этом случае примет следующий вид:

$$C_0 - F_2\cos\beta - P\cos\beta - F_1\cos\alpha\cos\gamma - N_1\sin\alpha = 0; \tag{6.72}$$

$$- N_2 - F_1\sin\alpha\cos\gamma + N_1\cos\alpha = 0, \tag{6.73}$$

Учитывая, что $F_{2r} = f_2N_2$ и $F_{1r} = f_1N_1$, осевое усилие на разрушение породы

$$C_0=P\cos\beta + ((\cos\alpha - f_1\sin\alpha\cos\gamma)\cdot f_2\cos\beta + f_1\cos\gamma\cos\alpha)\,N_1. \tag{6.74}$$

Обозначим предельное напряжение скалыванию (сдвигу) породы через τ, а нормальное напряжение сжатия через σ, тогда

$$N_1 = \tau S_1; \tag{6.75}$$

$$P = \sigma S_2, \tag{6.76}$$

где S_1 и S_2 – соответственно площади скола и сжатия.

Ввиду того, что наибольшая концентрация напряжений наблюдается у режущей кромки, будем считать, что сдвиг стружки произойдет от режущей кромки по всей высоте стружки в плоскости действия активной силы

$$S_1 = \frac{\pi}{2}(D-d)\frac{h}{\cos\alpha}, \tag{6.77}$$

где d – внутренний диаметр коронки;

h –высота стружки

$$S_2 \frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_1^2\right), \qquad (6.78)$$

где D_1 – диаметр коронки по притупленной части, тогда с учётом этих площадей

$$N_1 = \tau \frac{\pi}{2}(D-d)\frac{h}{\cos\alpha}, \qquad (6.79)$$

$$P = \sigma \frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_1^2\right), \qquad (6.80)$$

Подставив в формулу (6.74) значения P и N_1, получим

$$C_0 = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_1^2\right)\sigma\cos\beta + 2(D-d)x$$
$$x\left(\left(\cos\alpha - f_1 \sin\alpha\cos\gamma\right)\cdot f_2\cos\beta + f_1\cos\gamma\cos\alpha + \sin\alpha\right)\frac{h}{\cos\alpha}\tau\Big), \qquad (6.81)$$

В таблице 6.4 представлены расчётные значения C_0 и полученные опытным путём при бурении скважин в разных гидрогеологических условиях.

Таблица 6.4 – Расчётные значения осевого усилия C_0

Место проведения испытаний	Осевое усилие, Н		Примечания
	опытное	расчётное по формуле (17)	
БКХЗ (Баглейский коксохимический завод)	3700-3800	3690	D_1=0,19 м; d=0,15 м; α=30^0; D_1=1,185 м; f_1=f_2=0,4; n=0,5 1/с
Территория ЭПМ института ВИОГЕМ	3800-3900	3690	$V_{мех}$=0,00806 м/с; σ=5,87 · 10^6 Н/м^2; τ=1,47 · 10^6 Н/м^2

Из таблицы видно, что максимальное отклонение равняется 5-6 %, что вполне приемлемо для расчётов.

Величину осевого усилия, необходимого для разрушения лопастным долотом, установленным на внутренней шнековой колонне, можно определить по известной методике

$$C_1=(4\div5)\sigma_{сж} \cdot S_к, \qquad (6.82)$$

где $S_к$ – площадь контакта лопастей долота с породой, см.

$\sigma_{сж}$ – предельное напряжение сжатия разрушаемого грунта, кгс/см^2.

При вскрытии водоносных горизонтов, сложенных лессами и лессовидными суглинками, установлено, что они обладают негативным свойством, отрицательно влияющим на процессы бурения. Это свойство связано с налипанием грунта на внешнюю поверхность защитной колонны и спираль шнеков.

С явлением липкости столкнулись при сооружении дренажных скважин в лессовидных грунтах при осушении промплощадок Баглейского коксохимического завода, Днепропетровского шинного завода, суглинистых грунтов на промплощадке Михайловского ГОКа, бортов карьера Лебединского, Михайловского ГОКов. В ходе проведения экспериментальных работ было установлено, что при прекращении подачи промывочной жидкости или её утечек через стыки секций шнеков транспортирование разрушенной породы горизонтальным шнеком прекращается, коэффициент заполнения шнеков равен единице. В связи с этим встала необходимость определения фактического значения величины липкости разбуриваемых пород. Результаты исследований, выполненных по методике [257], приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 - Значения липкости лессовых грунтов промплощадки Михайловского ГОКа

№№ пробы	Наименование грунтов	Глубина отбора пробы, м	Влажность грунтов при исследованиях, %	Липкость, Н/см^2
1	Суглинки	9,5	25,0	0,85
2	–"–	9,5	28,4	1,22
3	–"–	9,5	30,6	0,87
4	–"–	9,5	32,0	0,63

Накопленный опыт сооружения дренажных скважин в лессовидных суглинках и анализ литературных источников [258-261], посвящённых вопросам технологии шнекового бурения в различных гидрогеологических условиях, показывает, что наиболее сложной технологической операцией является транспортирование влажных глинистых пород по скважине. Основной причиной, осложняющей этот процесс, является свойство влажных глин к налипанию (липкость). Липкость ведёт к снижению транспортирующей способности шнеков, уменьшению скорости бурения и возрастанию нагрузок на шнеках. Наиболее остро эта проблема стоит при бурении горизонтальных скважин, сооружаемых для целей осушения глинистых пород. Существующие методы позволяют оценить силы липкости только качественно, по отрицательному воздействию на процесс бурения.

Однако этого недостаточно, необходима количественная оценка сил липкости на транспортирующую способность шнеков. Считая процесс транспортирования установившимся и движение породы по прямой, составим уравнение равновесия частицы в проекциях на оси координат *x, y, z* (рис. 6.24).

$$\begin{aligned} &G+\left(C+z_1-N_1+N_3-z_3\right)\cos\theta-\left(F_3-F_2\right)\cos\alpha\sin\theta+\left(-N_2+z_3\right)\sin\alpha\sin\theta=0;\\ &\left(C+z_1-N_1+N_3-z_3\right)\sin\theta+\left(F_3+F_2\right)\cos\alpha\cos\theta+\left(N_2-z_2\right)\sin\alpha=0;\\ &-F_1-\left(F_3+F_2\right)\sin\alpha+\left(N_2-z_2\right)\cos\alpha=0, \end{aligned} \qquad (6.83)$$

Где, N_1, N_2, N_3 – соответственно реакции рабочей трубы, поверхности спирали и вала шнека, Н;

F_1, F_2, F_3 – соответственно силы трения о поверхности рабочих труб, спирали и вала шнека, Н;

z_1, z_2, z_3 – силы налипания соответственно на рабочую трубу, спираль и вал шнека, Н;

G –вес элементарного объёма породы, Н;

C – центробежная сила, Н;

α – угол подъёма винтовой линии шнека;

θ – угол, определяющий положение элементарного объёма породы (положение образующей, на которой находится центр тяжести элементарного объёма) по отношению к плоскости *xoz* в направлении вращения шнека.

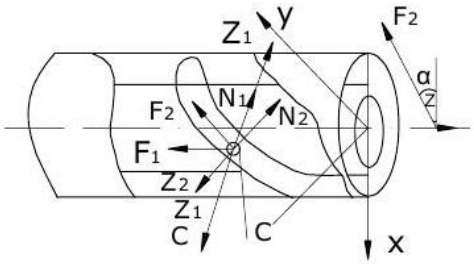


Рис. 6.24. Схема действия сил на транспортируемую породу

Вследствие того, что в рассматриваемых условиях из-за налипания породы к спирали шнеков и поверхности труб собственный вес транспортируемой породы давления на вал шнека не оказывает, то N_3=0 и F_3=0.

Учитывая, что

$$G=\rho V g, \qquad (6.84)$$

где ρ и V – соответственно плотность кг/м^3 и объём (м^3) транспортируемой частицы;

g –ускорение силы тяжести, м/с^2, а

$$F_{1r} = f_1 N_1 \text{ и } F_{2r} = f_2 N_2, \tag{6.85}$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты трения породы соответственно о поверхности рабочей трубы и спирали шнека, и что

$$z_1 = PS_1,\ z_2 = PS_2 \text{ и } z_3 = PS_3, \tag{6.86}$$

где P – липкость (удельная сила налипания), Н/м^2;

S_1, S_2 и S_3 – площади контакта транспортируемой частицы соответственно с поверхностями рабочей трубы, спиралью и валом шнека, м^2, и что центробежная сила

$$C = 4\pi^2 n^2 x, \tag{6.87}$$

где n – частота вращения шнеков, с$^{-1}$;

x – расстояние от оси шнека до центра тяжести транспортируемой частицы, м,

$$x = \sqrt{\frac{r^2 + r_{вш}}{2}} \tag{6.88}$$

где r, $r_{вш}$ – радиусы соответственно спирали и вала шнека, м.

Система уравнений (6.83) запишется в виде

$$\begin{aligned}
&\rho V g + \left(4\pi^2 n^2 x \rho V + PS_1 - N_1 - PS_3\right)\cos\theta - f_2 N_2 \cos\alpha \sin\theta + \\
&+ \left(-N_2 + PS_2\right)\sin\alpha \sin\theta = 0; \\
&\left(4\pi^2 n^2 x \rho V + PS_1 - N_1 - PS_3\right)\sin\theta + f_2 N_2 \cos\alpha \cos\theta + \\
&+ \left(N_2 - PS_2\right)\sin\alpha \cos\alpha = 0; \\
&- f_1 N_1 - f_2 N_2 \sin\alpha + \left(N_2 - PS_2\right)\cos\alpha = 0
\end{aligned} \tag{6.89}$$

Решение полученной системы даёт следующее уравнение для определения частоты вращения шнеков в зависимости от положения транспортируемой частицы на спирали шнека, липкости, его геометрических размеров, коэффициентов трения и др.

$$\rho V g\left(\frac{\cos\alpha - f_2 \sin\alpha}{f_1}\sin\theta - \left(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha\right)\cos\theta\right) - 4\pi^2 n^2 x \rho V\left(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha\right) -$$

$$- P\left(S_1 - S_3\right)\left(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha\right) + S_2 \frac{f_2}{f_1}\Bigg) = 0 \tag{6.90}$$

Определим частоту вращения шнеков, при которой транспортирование породы по прямой становится невозможным

(критическая частота). Для этого исследуем выражение (6.90) на максимум. Проведенные исследования дают следующее выражение для её определения:

$$n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{-\frac{g}{x\cos\theta} - \frac{P}{\rho V x}\left(S_1 - S_3 + S_2\frac{f_2}{f_1\left(f_2\cos\alpha + \sin\alpha\right)}\right)} \qquad (6.91)$$

где

$$\theta = arctg\left(-\frac{\cos\alpha - f_2\sin\alpha}{f_1\left(f_2\cos\alpha + \sin\alpha\right)}\right) \qquad (6.92)$$

При рассматриваемых коэффициентах трения (f=0,3…0,65) и применяемых углах наклона винтовой линии (α=17…30^0) значение $tg\theta$ всегда меньше нуля, поэтому слагаемое $-\frac{g}{x\cos\theta}$ в выражении (6.91) является величиной положительной.

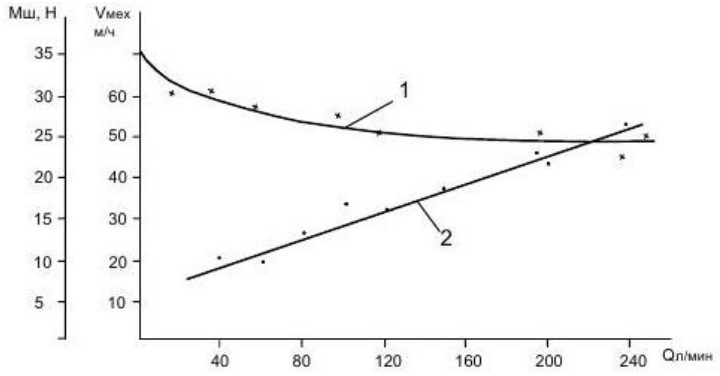


Рис.6.25. Зависимость изменения нагрузки на шнеках в интервале бурения от 15 до 25 м и механической скорости бурения от расхода промывочной жидкости:
1 – изменение крутящих моментов на шнеках ($M_ш$); 2 – изменение механической скорости бурения ($V_{мех}$) при $P_{ос}$=15 кН, $n_ш$=2,0 с$^{-1}$

Полученные зависимости свидетельствуют, что с увеличением липкости резко снижается транспортирующая способность шнеков. Анализ физико-механических свойств глинистых грунтов показывает, что одним из эффективных способов снижения липкости является смачивание поверхности разрушенной породы водой. Имеющаяся информация [257], накопленный опыт сооружения скважин в глинистых грунтах подтверждают справедливость этого положения. Однако для качественной и

количественной оценки этого вывода требуется проведение экспериментальных исследований.

Оценка влияния промывочной жидкости, в качестве которой использовали техническую воду, на липкость разбуриваемых пород производилась по двум критериям: по нагрузкам на шнеках и механической скорости бурения. Результаты исследований приведены на рис. 6.25.

Проведенные испытания показали, что прекращение подачи промывочной жидкости ведёт к резкому возрастанию крутящих моментов на шнеках, вплоть до заклинивания их в трубах, к падению механической скорости бурения. С увеличением расхода промывочной жидкости растёт механическая скорость бурения, улучшается работа шнеков, явление налипания практически прекращается при её расходе свыше 100…120 л/мин. Дальнейший рост механической скорости бурения может быть объяснён её участием в разрушении породы за счёт гидромониторного эффекта струй, вытекающих из каналов породоразрушающего инструмента.

Таким образом, с учётом достижения высоких механических скоростей бурения, исключения налипания породы на шнеки, рациональное количество подаваемой в скважину жидкости находится в пределах 250…300 л/мин.

Как указывалось, при бурении лессовидных грунтов имеет место их налипание не только на спираль шнеков, но и на внешнюю поверхность защитной колонны, препятствуя её перемещению как в осевом направлении, так и при вращении. На преодоление этих сил требуется приложение дополнительных осевых усилий и крутящих моментов. Величина этого усилия определится из выражения:

$$P_{стр}=3{,}14\cdot K_к \rho_л DL\ , \qquad (6.93)$$

где $P_{стр}$ – дополнительная сила, идущая на преодоление сил, вызванных налипанием грунта, Н;

$\rho_л$ – липкость грунта, Н/см^2;

D –внешний диаметр защитной колонны, см;

L –длина скважины, см;

$K_к$ – коэффициент, учитывающий длину окружности скважины, по которой осуществляется контакт защитной колонны, покрытой налипшим грунтом, доля единиц.

Графические построения сечения скважины разных диаметров при неизменном диаметре внешней колонны показывают, что увеличение диаметра бурения приводит к уменьшению длины линии контакта внешней поверхности защитной колонны со стенками скважины, а, следовательно, к уменьшению $P_{стр}$. Экспериментальными исследованиями доказано, что при применении защитной колонны Ø 168 мм диаметр коронки должен быть 210-

215 мм. При таких соотношениях в диаметрах породоразрушающего инструмента и защитной колонны в образующийся зазор начинает поступать вода из пласта и производить смачивание как стенки скважины, так и налипшей на внешнюю поверхность труб породу, что ведёт к снижению липкости ($P_л$) и коэффициенту трения между смоченными поверхностями, следствием чего является снижение нагрузок на защитной колонне. При бурении скважин с применением коронки Ø 195 мм площадь контакта колонны со стенками скважины увеличивается, условия поступления дренируемых вод в зазор между скважиной и защитной трубой с налипшей на ней породой ухудшаются, и нагрузки на колонне возрастают.

Для улучшения условий жидкостного трения защитной колонны о стенки скважины при бурении в суглинистых грунтах необходимо предотвратить вытекание дренажных вод через кольцевой зазор, образованный стенкой скважины и внешней поверхностью защитной колонны. Для этого вскрытие водоносного горизонта горизонтальной скважиной должно осуществляться через герметизатор защитной колонны, исключающий утечки дренажных вод по затрубному пространству и позволяющий при необходимости производить принудительную подачу части воды в затрубное пространство. Конструкция такого кондуктора приведена в работе [262].

6.5. Пути снижения сил трения на буровом снаряде при вскрытии водоносных горизонтов под защитой обсадной колонны

Приведенными теоретическими исследованиями, по определению сил трения на обсадной колонне при вскрытии водоносных горизонтов по разработанной в институте ВИОГЕМ технологии, оценке транспортирующей способности шнека, выявлено, что основные потери происходят за счёт трения труб о породу, транспортируемой частицы о спираль шнека, а также о внутреннюю поверхность обсадных труб. Влияние коэффициентов трения во всех зависимостях носит линейный характер. Увеличение коэффициентов трения влечет за собой увеличение сил трения на трубах, шнеках и, следовательно, требует повышенных затрат энергии на их преодоление.

Для снижения коэффициентов трения институтами ВИОГЕМ и БТИСМ (Белгород) были проведены исследования по разработке антифрикционных покрытий, изучению их свойств, технологии нанесения на рабочие поверхности. Было установлено, что антифрикционные покрытия могут быть разработаны на основе эпоксидных диановых смол ЭД-20, ЭД-24, отвердителей ПЭПА, УП-5-159 с добавлением различных видов наполнителей молибдена, графита, фторопласта, талька и др. [263-266].

Для дальнейших исследований были выбраны наименее дефицитные и наиболее дешёвые наполнители: графит, асбестит, фторопласт. В качестве смолы использовали ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. При проведении лабораторных исследований определяли следующие показатели: коэффициенты трения, рациональное количество наполнителя, технологию нанесения покрытия и его толщину.

В качестве трущихся поверхностей использовали металлические пластинки размерами 130х160 мм с нанесённым на них антифрикционным покрытием и песок с влажностью 12-13 %, взятый из борта Стойленского карьера. Давление на испытуемый образец создавали пригрузкой, изменяя её величину в пределах от 0,05 до 0,15 МПа.

Для регистрации силы трения применяли приспособление, в основу работы которого положен метод тензометрирования. Этот метод позволяет с помощью непрерывной записи от датчиков омического сопротивления определить местные деформации в упругом элементе и по ним определить действующие силы.

Измерительное тензометрическое устройство представляло собой круглый упругий элемент, изготовленный из шарикоподшипниковой стали, в котором наклеены тензодатчики сопротивления ПКБ-20-200. Измерительное устройство крепили в разрыв тросика механизма горизонтального нагружения. Для усиления и регистрации сигналов, поступающих от тензодатчиков, использовали электронную контрольно-регистрирующую аппаратуру. Обработку результатов лабораторных исследований по определению коэффициентов трения проводили согласно СНиП II-1-74.

Расчёты коэффициентов трения производили по формуле

$$tg\varphi = 3\left(\sum_{i=2/3n+1}^{n}\tau_i - \sum_{i=1}^{n/3}\tau_i\right)n\,, \qquad (6.94)$$

где τ_i – предельное напряжение сдвигу, МПа;

n –число опытов.

Коэффициенты трения покоя рассчитывались по закону Кулона:

$$\tau = f\sigma + c\,,$$

где f – коэффициент трения,

σ – нормальное напряжение сжатия, МПа,

c - сцепление, кГс/см^2.

Сведения о коэффициентах трения между песком и антифрикционными покрытиями, содержащими различные наполнители, приведены в табл. 6.6.

На основании экспериментальных данных построены графики (рис.6.26) изменения коэффициентов трения о грунт для различных

антифрикционных покрытий. Из приведенных зависимостей следует, что наиболее перспективными, с точки зрения решения поставленной задачи, являются составы, в качестве наполнителей содержащие фторпласт и графит. Рациональное содержание фторопласта 5-10 %, графита – 5-15 %.

Таблица 6.6 - Состав покрытий и их коэффициенты трения по грунтам при пороговой влажности (w)*

№№ п/п	Состав покрытий, в % от массы смолы	Коэффициенты трения			
		по песку мелкому (w=0,12)	по песку крупному (w=0,12)	по суглинку (w=0,15)	по глине (w=0,18)
1.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10	0,2974	0,3166	0,3210	0,3102
2.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10 Фторопласт-1	0,2901	0,3112	0,2842	0,2777
3.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10 Фторопласт-5	0,2212	0,2714	0,2014	0,1688
4.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10 Графитовый порошок-10	0,2314	002612	0,2412	0,1874
5.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10 Молибден-5 (порошок)	0,2218	0,2432	0,2217	0,1785
6.	Смола ЭД-20 Отвердитель ПЭПА-10 Мел-10	0,4312	0,4455	0,3816	0,3614
7.	Смола «альтин» Отвердитель ПЭПА-8	0,2966	0,3264	0,3002	0,2974
8.	Смола «альтин» Отвердитель ПЭПА-8 Фторопласт-5	0,2777	0,2501	0,2476	0,1634
9.	Смола «альтин» Отвердитель ПЭПА-8 Графитовый порошок-10	0,2377	0,2471	0,2312	0,1994

Исследованиями установлено, что покрытие набирает прочность после 10-11 суток твердения при температуре 18-20^0 или 15-18 часов при

температуре 50-60 ^{0}С. Рекомендуемая толщина покрытия 0,5-1,0 мм.

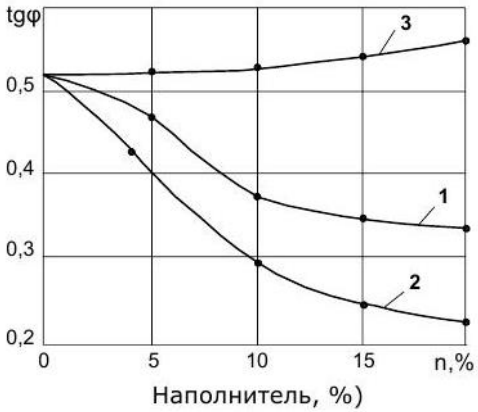


Рис. 6.26. График изменения коэффициента трения между песком и антифрикционными покрытиями, содержащими в качестве наполнителей: 1 – фторопласт, 2 – графит, 3 – асбестит

С целью оценки эффективности практического применения антифрикционных покрытий, разработанных в процессе лабораторных исследований институтами ВИОГЕМ и БТИСМ, в 1981 г. и 1983 г. были проведены натурные испытания на Стойленском и Лебединском карьерах. Были пробурены 2 опытные скважины в обводнённых песках, скважина 7с глубиной 70,2 м и 9с глубиной 50,4 м. Скважину 7с бурили с использованием рабочих труб без покрытия, а скважину 9с с антифрикционным покрытием наружной поверхности. В качестве антифрикционного покрытия применяли смесь эпоксидной смолы ЭД-20, отвердителя (полиэтиленполиамина) в количестве 10 % и графитового порошка в количестве 15 % от веса смолы. Технология приготовления смеси с нанесением её на поверхность труб была следующей. Поверхность труб тщательно очищалась от грязи и окислов с помощью металлической щётки и наждачной бумаги. Взвешивали необходимое количество смолы, отвердителя и наполнителя (графитового порошка). Затем эти компоненты последовательно смешивали между собой до образования однородной массы. Шпателем массу наносили на предварительно очищенную и обезжиренную ацетоном поверхность рабочей трубы ровным слоем толщиной 1,0-1,5 мм. Работы проводились в полевых условиях, на борту карьера. Время твердения антифрикционного покрытия – 48 час.

Бурение скважин 7с и 9с в основном производили при одинаковых режимах, частота вращения рабочих труб n=2-3 об/мин, частота вращения

шнеков n=90 об/мин, количество подаваемой в скважину воды $Q_н$ – 100 л/мин; осевое усилие на забой $P_{ос}$ – 40 кН. При экспериментальных исследованиях применяли метод хронометражных наблюдений. В процессе бурения скважин замеряли следующие параметры: осевое усилие ($P_{ос}$); крутящие моменты на рабочих трубах ($M_т$) и на шнеках ($M_ш$), ($Q_н$) и механические скорости бурения ($V_{мех}$). Данные хронометражных наблюдений по каждой секции длиной 0,9 м заносили в журнал, а в дальнейшем обрабатывали методами математической статистики.

Для определения эффективности применения антифрикционного покрытия обработаны и проанализированы два основных параметра $P_о$ и $M_т$. Результаты обработки представлены графиками на рис. 6.27 и 6.28.

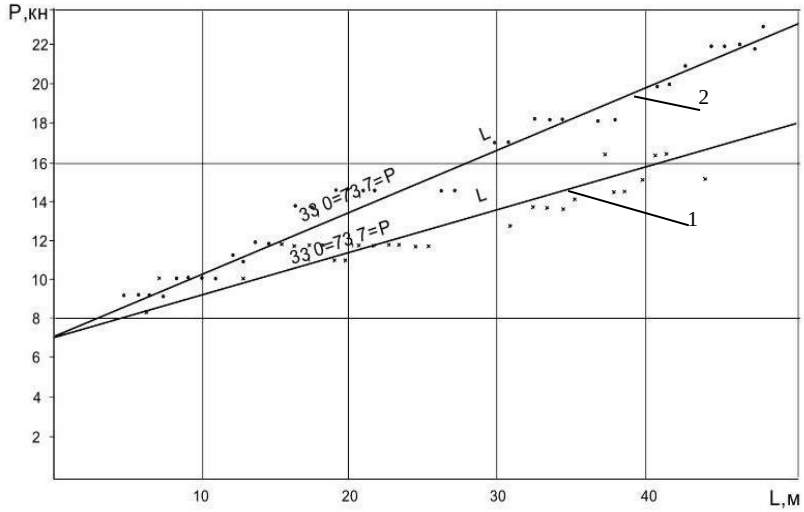


Рис. 6.27. Графики зависимостей осевых усилий от глубины скважины:
1 – с антифрикционным покрытием труб, 2 – без покрытия

Сравнительный анализ полученных зависимостей показывает, что применение антифрикционного покрытия на основе эпоксидной смолы с добавлением графитового порошка позволяет снизить крутящие моменты на трубах на 3,0 %, а осевые усилия – на 33,6 %. Силы трения при этом снизились на 26,4 %. Проведенные натурные испытания показали перспективность использования разработанных антифрикционных покрытий для рабочих труб при бурении горизонтальных скважин в обводнённых песках. Очевидно, что положительные результаты по снижению коэффициентов трения могут быть получены и после покрытия шнеков разработанными антифрикционными покрытиями.

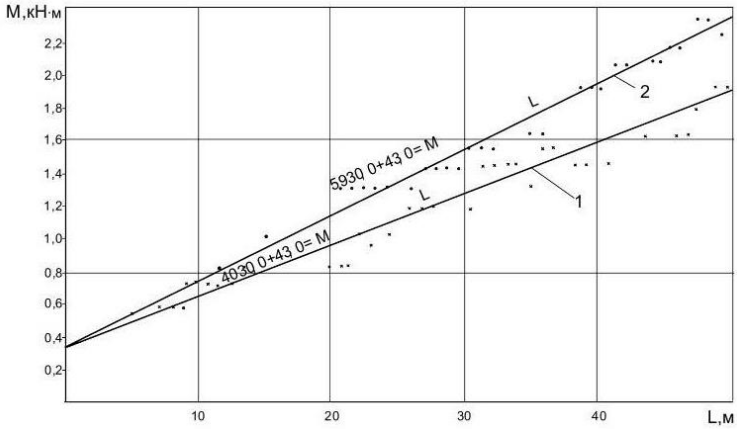


Рис. 6.28. Графики зависимостей крутящих моментов на трубах от глубины скважины: 1 – с антифрикционным покрытием труб, 2 – без покрытия

6.6. Особенности вскрытия обводнённых кавернозных, трещиноватых пород горизонтальными скважинами

Проведенными обследованиями на одном из объектов установлено, что фильтраты из хвостохранилищ по составу хлоридно-сульфатно-магниево-натриевого состава поступали в подстилающие кавернозные и трещиноватые понтические известняки, имеющие высокие коэффициенты фильтрации (до 200 м/сут) и вызывали засоление почв и повышение минерализации вод поверхностных водотоков выше предельно допустимых. В известняки фильтровалось примерно 200 м^3/ч.

Для перехвата загрязнённых вод из хвостохранилища был предложен метод лучевого дренажа, согласно которому движущийся в сторону поверхностного водотока фильтрационный поток перехватывался системами горизонтальных дренажных скважин, сооружаемых из шахтных стволов по подошве водоносного горизонта. Оценка эффективности работ по перехвату загрязнённых вод из хвостохранилища проводилась на опытном участке, включающем 3 шахтных ствола глубиной по 42-45 м и диаметром 4,5 м в свету, в каждом стволе предусматривалось бурение 6 скважин длиной по 125-130 м. Схема расположения стволов и сооружённых из них дренажных скважин относительно хвостохранилища приведена на рис. 6.29.

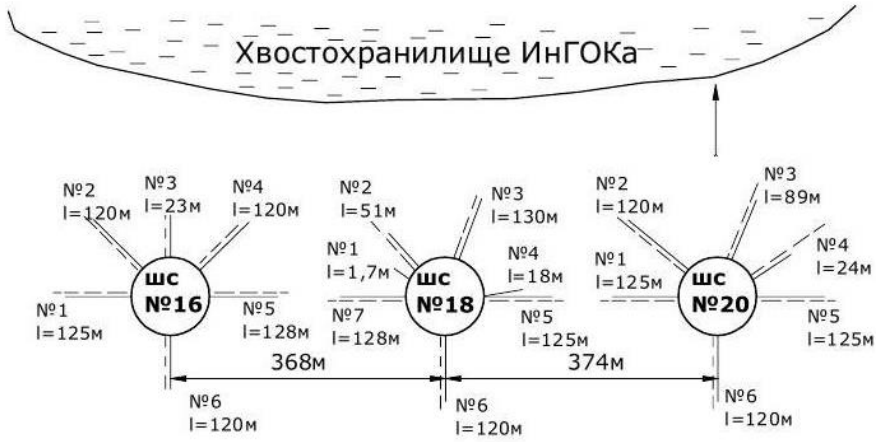


Рис. 6.29. Схема расположения шахтных стволов и сооруженных из них горизонтальных скважин:
----- проектируемые, — сооружённые скважины

Схема оборудования шахтного ствола для сооружения дренажных скважин и откачки дренажных вод, поступающих из скважин, приведена на рис. 6.30.

Как видно из рис.6.30, водоносный горизонт имеет небольшие уровни грунтовых вод: 1,3 м от его подошвы. Проектом предусматривалось бурение дренажных скважин в непосредственной близости от подошвы водоносного горизонта. Длина каждой скважины 125-130 м. Местоположение забоя скважины контролировалось величиной уровня грунтовых вод.

Из всего арсенала буровой техники для решения поставленных задач могли быть использованы лишь установки Японских фирм Тонэ Боринг, Кокэн Боринг [267, 268] и отечественные института ВИОГЕМ (УЛБ-130). Некоторые установки Японских фирм так же, как установка УЛБ-130, основаны на принципе вращательного бурения двумя колонками, вращающимися с одной скоростью. Японские установки предназначены для работы, в том числе и из подземных горных выработок. Конструктивное исполнение бурового агрегата, рабочие длины защитной и бурильной колонн при производстве работ по их наращиванию и извлечению, замене породоразрушающих элементов требуют значительных технологических размеров по оси бурения, что исключает их применение в шахтных стволах диаметром 3,5-4,0 м. Например, лёгкие буровые станки FS40-S фирмы

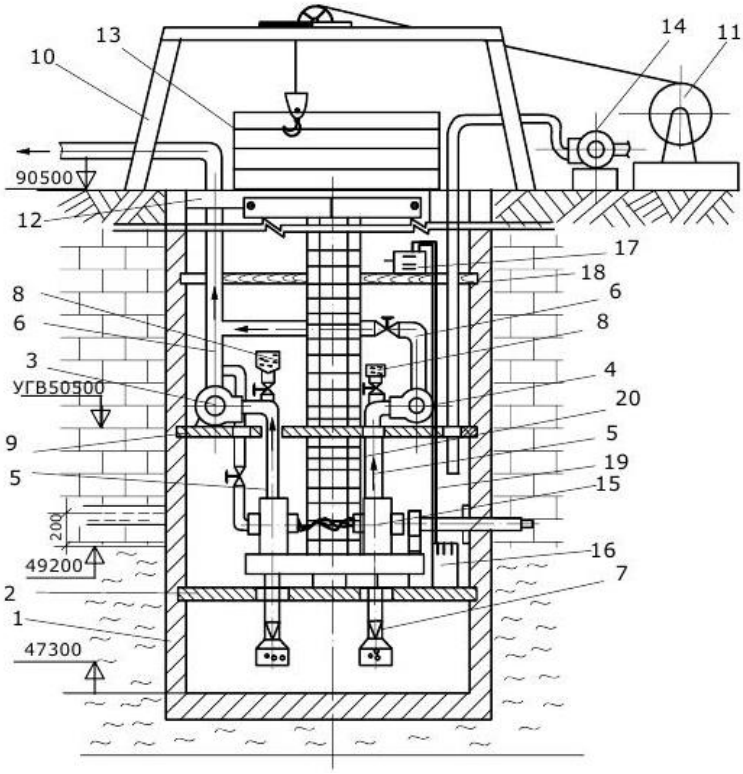


Рис. 6.30. Схема оборудования шахтных стволов:
1 – шахтный ствол; 2 – рабочий полок; 3, 4 – соответственно рабочий и резервный водоотливные насосы (ГрТ 160/31,5); 5 – всасывающий, 6 – нагнетательный трубопроводы; 7 – обратный клапан; 8 – заливочная ёмкость; 9 – насосный полок; 10 – копёр; 11 – лебедка Т-145Г (грузоподъёмность 50 кН); 12 – ляды с механизированным раскрытием; 13 – ограждение; 14 – вентилятор; 15 – буровой агрегат; 16 – пульт управления; 17 – маслостанция; 18 – грузовой полок; 19 – маслопроводы, 20 – маршевые лестницы

«Кокэн Боринг» и TOP-S фирмы «Тонэ Боринг» могут размещаться в шахтных стволах диаметром не менее 5,5 м. В то же время специально сконструированные для работы в шахтных стволах отечественные установки УЛБ-130 размещаются и позволяют вести работы в стволах диаметром 3,5÷4,0 м.

Кроме своих преимуществ, связанных с возможностью ведения работ в стволах диаметром до 4,0 м, гидравлический привод установки позволяет:

- размещение отдельных блоков: маслостанции, пульта управления, бурового агрегата на разных высотных отметках в стволе, что способствует улучшению условий и безопасности ведения работ;
- снизить шум и вибрацию;
- обеспечить механизацию основных трудоёмких процессов по свинчиванию - развинчиванию защитной и бурильной колонн;
- плавное регулирование параметров режима бурения в пределах технических характеристик установки;
- сохранить работоспособность бурового агрегата в аварийных ситуациях, связанных с затоплением ствола.

Конструктивное исполнение защитной и бурильной колонн (высокая жёсткость и диаметры), раздельные приводы вращения в сочетании с технологическими параметрами (осевым усилием, частотами вращения колонн) являются факторами, которые могут влиять на искривление скважины и с помощью которых можно добиваться желаемых результатов.

Решение задач по сооружению горизонтальных скважин в трещиноватых твёрдых породах с поддержанием заданного направления бурения было рассмотрено в области теоретических исследований по определению влияния параметров режима бурения, геометрических размеров буровых колонн, породоразрушающих инструментов и проведения экспериментальных работ в промышленных условиях.

Анализ публикаций [269-274 и др.], посвящённых вопросам искривления скважин, показывает, что основной объём исследований связан с разработкой мероприятий по предупреждению или уменьшению искривления вертикальных скважин, а также восстановлению заданного направления.

В технологии бурения вертикальных скважин хорошо разработаны способы управления направлением проходки, использующие гравитационный принцип «отвеса» за счёт специальных компоновок бурового снаряда, увеличения жёсткости низа бурильных труб и др.

Вопросы управления пространственным положением горизонтальных скважин изучены слабо. Основные работы выполнены Кодзаевым Ю.В., который исследовал бурение скважин малого диаметра при одноколонной конструкции труб [240].

О сложности управления процессом бурения горизонтальных скважин говорят и данные японских исследований [267, 268].

Оценка влияния технологических параметров режима бурения и особенностей компоновки буровой колонны УЛБ-130, с помощью которой ведётся бурение скважин, была выполнена в институте ВИОГЕМ.

Разработка теории направленного бурения основана на расчёте сил, вызывающих изгиб колонны двойных труб в горизонтальной скважине.

Вначале рассматривается положение колонны под действием силы веса. Влияние вращательного движения труб здесь не учитывается, что допускается в работах ряда исследователей [271].

Схема действия сил (рис. 6.31) на колонну труб представлена в виде балки, расположенной на двух концевых опорах.

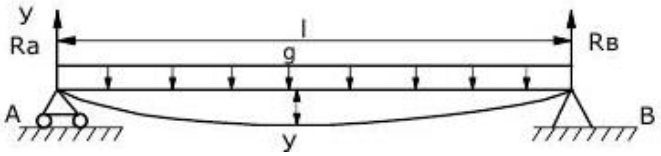


Рис.6.31. Схема действия силы веса на колонну труб

Определим прогиб (У) колонны длиной (ℓ), угол поворота оси (θ) рабочей (защитной) колонны при действии только собственного веса, считая его как равномерно распределённую нагрузку (g) по всей длине.

Уравнение кривизны упругой линии колонны согласно [272, 273, 274] записывается в виде:

$$-EJ\frac{d^2y}{dx^2}=M_x, \qquad (6.96)$$

где E – модель упругости (E=21·10^6, Н/см^2);

M – изгибающий момент, Н·см;

J –момент инерции сечения рассматриваемой колонны, см^4.

Изгибающий момент выражается уравнением

$$M_x=\frac{g\ell x}{2}-\frac{gx^2}{2}, \qquad (6.97)$$

где g – интенсивность равномерно распределенной нагрузки, н/м.

Поставив значение M_x в уравнение (1), получим

$$-EJ\frac{d^2y}{dx^2}=-\frac{g\ell x}{2}+\frac{gx^2}{2}. \qquad (6.98)$$

Решая уравнение (6.98), получаем зависимость для оценки величины прогиба:

$$y=\frac{g\ell}{48Ey}\cdot\frac{5}{8}\ell^3=\frac{5g\cdot\ell^4}{384EJ}. \qquad (6.99)$$

Определим величину ℓ при максимальном прогибе, равном

$$y=\frac{Д_{скв}-Д_{тр}}{2}, \qquad (6.100)$$

где $Д_{скв}$, $Д_{тр}$ – соответственно диаметры скважины и рабочей колонны по наружному диаметру, м;

ℓ - длина колонны, м.

Подставив значение (6.100) в (6.99), получим уравнение

$$\ell^4 = \frac{384EJ\left(Д_{скв} - Д_{тр}\right)}{10g}, \qquad (6.101)$$

которое позволяет рассчитывать длину полуволны после подставки значений E, g, J.

Полученные величины ℓ приведены в таблице 6.7.

Длина полуволны для внутренней колонны при существующей конструкции труб по расчёту составляет $\ell_{вн}$≈8,85 м.

Далее необходимо рассматривать условия работы колонны под влияние осевой нагрузки (P) на прогиб ($У$) и угол поворота (θ) колонны с учётом собственного веса (рис. 6.32).

Таблица 6.7 – Изменения длины полуволны

Длина полуволны, м	Показатели			Примечание
	g, Н/см	$Д_{скв}$, м	$Д_{тр}$, м	
9,67	3,00	0,200	0,175	$E=21\cdot10^6$ Н/см^2
8,59	4,80	0,200	0,175	$J=1300$ см^4
8,27	5,60	0,200	0,175	
8,12	3,00	0,1875	0,175	
7,22	4,80	0,1875	0,175	
6,96	5,60	0,1875	0,175	

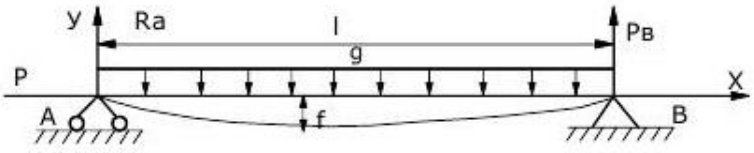


Рис.6.32. Схема влияния осевой нагрузки на колонну труб

Уравнение кривизны упругой линии колонны определяется равенством (6.102)

$$-EJ\frac{d^2y}{dx^2} = M_x, \qquad (6.102)$$

где

$$M_x = -P_A x - \frac{g x^2}{2} - P_B y\,, \qquad (6.103)$$

P_A и P_B – реакции опор, Н;

$У$ – прогиб, см;

g –интенсивность распределения нагрузки, Н/см.

Максимальное значение $У$ получит при $x=\ell/2$.

$$y_{\max} = \frac{1}{EJ}\left(Pf\frac{\ell^2}{\pi^2} + \frac{g\ell^4}{384} - \frac{g\ell^4}{96} + \frac{g\ell^4}{48} \right) = \frac{1}{EJ}\left(\frac{Pf\ell^2}{\pi^2} + \frac{5g\ell^4}{384} \right)$$

$$y_{\max} = \frac{1}{RJ}\left(\frac{Pf\ell^2}{\pi^2} + \frac{5g\ell^4}{384} \right) \qquad (6.104)$$

Критическая сила ($P_{кр}$) будет при максимальном прогибе, равном

$y = \dfrac{Д_{скв} - Д_{тр}}{2}$, или через радиус – $У=(R_{скв} - R_н)$.

Подставив значение $У$ в уравнение (6.104) и сделав преобразование относительно P, получим:

$$P = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{\ell^2} - \frac{5\pi^2 g \cdot \ell^2}{384\left(R_{скв} - R_н\right)}\,, \qquad (6.105)$$

Уравнение (6.105) относительно ℓ будет иметь вид:

$$g\ell^4 + \frac{384P \cdot \ell^2}{5\pi^2}\left(R_{скв} - R_н\right) - 384EJ\,\frac{\left(R_{скв} - R_н\right)}{5} = 0\,, \qquad (6.106)$$

или, подставив π, получим

$$g\ell^4 + 7{,}79P\ell^2\left(R_{скв} - R_н\right) - 76{,}8\left(R_{скв} - R_н\right) = 0\,. \qquad (6.107)$$

После приведения выражения (6.107) к квадратному уравнению решение его даст возможность определить величину длины полуволны ℓ в зависимости от собственного веса, осевого усилия, геометрических размеров скважины $Д_{скв}$ и наружного диаметра труб $Д_н$.

В таблице 6.8 приведены данные по расчёту вариантов компоновки рабочей и бурильной колонн при различных осевых давлениях на забой $P_{ос}$.

Анализ полученных данных показывает, что при использовании колонны двойных бурильных труб и небольших зазорах между ними длина полуволны колонн мало зависит от величины осевого давления на забой.

Таблица 6.8 - Данные по расчёту вариантов компоновки рабочей и бурильной колонн при различных осевых давлениях на забой $P_{ос}$

Расчетное значение ℓ, м			Изменение параметров	Примечание
Рабочей колонны	Бурильной колонны	g, Н/см	$P_{ос}$, кН	
12,06		3,0	1,0	$У_1J$ = Const
10,20	8,45	4,8	1,0	$Д_{скв}$ = 200 мм
9,41		5,6	1,0	$Д_{вн}$ = 175 мм
12,77		3,0	2,5	диаметр бурильной
10,13		4,8	2,5	колонны
9,20		5,6	2,5	$d_{вн}$ = 89 мм
12,65	4,47	3,0	4,5	вес 1 м бур. труб
10,04		4,8	4,5	$g_{вн}$ = 176 Н/м
9,10		5,6	4,5	внутр.диаметр раб.колонны $d_{вн}$ = 150 мм

При длине полуволны внутренней колонны от 7,47 до 8,45 м и внутреннего диаметра рабочих (защитных) труб 150 мм угол искривления бурильной колонны в призабойной части скважины составляет 12°-15°

Центраторы, установленные на бурильных трубах с интервалом 7,5-8,5 м при зазоре до 10 мм между колоннами, позволяют уменьшить угол прогиба до 2,5°-3,0°.

Данные теоретических исследований были положены в основу работ по сооружению дренажных скважин на хвостохранилище.

На основании проведенных аналитических исследований и анализа накопленного опыта работ для обеспечения проходки скважин без искривления была реализована программа, включающая разработку и изготовление сцентрированных защитной и бурильной колонн, у которых резьбовые соединения на ниппелях и муфтах нарезаются после выполнения сварочных работ, буровых коронок разных типоразмеров с высокой энерговооруженностью рабочих поверхностей, исключающих их интенсивный износ, бурильной колонны с центраторами, схемы бурения, направленной на предотвращение искривления и др.

Схема компоновки буровых инструментов для вскрытия водоносных горизонтов двумя колоннами представлена на рис.6.33. Конструкция коронки для защитной колонны приведена на рис.6.34.

При выбранной схеме бурения в работе находятся оба породоразрушающих инструмента, при этом есть возможность замены

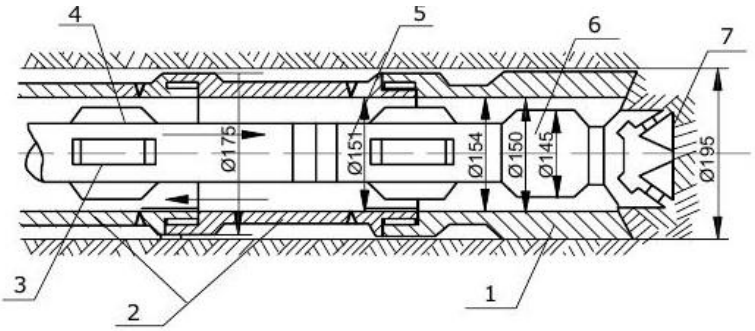
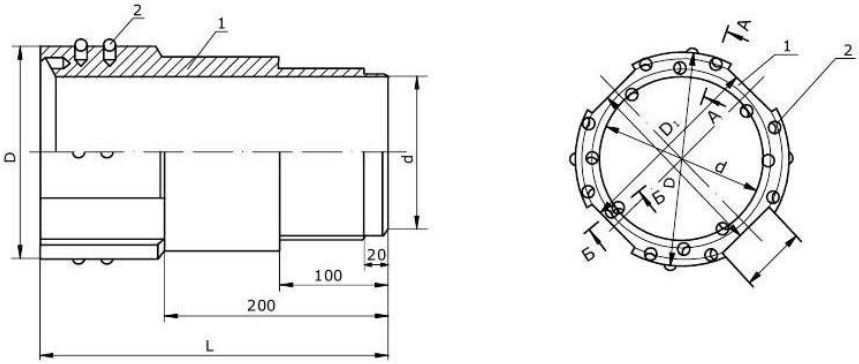


Рис. 6.33. Компоновка бурового снаряда для вскрытия водоносных горизонтов, сложенных трещиноватыми кавернозными известняками под защитой обсадной колонны:
1 – коронка защитной колонны; 2 – защитная колонна; 3, 4 – центраторы бурильной колонны; 5 –бурильная колонна; 6 – переводник-центратор; 7 – 3-х шарошечное долото



Размеры, мм

Обозначения	Рис.	L	D	D_1	d	d_1	Масса
276.4.30000А	1	320	195	190	150	172	16,5
276.4.30000А-1	2	350	215	210	150	192	19,6

Рис. 6.34. Коронка для защитной колонны:
1 – корпус; 2 – победитовые резцы

породоразрушающего инструмента внутренней колонны без извлечения защитной колонны.

Для определения рационального диаметра коронки и её энерговооружённости для испытаний были разработаны 3 типоразмера коронок Ø 215; Ø 205; Ø 195 мм. (см. рис. 6.34). Влияние диаметра коронок на интенсивность искривления скважин, их износостойкость изучалось при бурении 2-х экспериментальных скважин в устойчивых песчаниках (V категория по буримости) с прослоями глин на одном из откосов карьера. В ходе их проведения было установлено, что технические характеристики установки: крутящие моменты на вращение защитной и бурильной колонн, осевые усилия обеспечивают решение задач по сооружению скважин проектной длины (130 м) даже при минимальных зазорах между диаметром скважины и диаметром защитной колонны (13 мм на сторону). Проведенные замеры искривления скважин показали, что при минимальном диаметре коронки (Ø 195 мм) скважина искривляется меньше. Конструкция коронки позволяет в породах V категории по буримости пройти скважину длиной 130 м без её замены.

Дальнейшие работы по отработке технологии и технических средств, направленных на проходку дренажных скважин по водоносному горизонту мощностью 1,2 м, проводились в шахтных стволах.

При бурении более прочных известняков, слагающих водоносный горизонт и имеющих прочность VII-VIII по буримости, происходил интенсивный износ периферийной зоны режущей поверхности коронки, что привело к резкому падению механической скорости бурения. С учётом выявленного износа коронка была переработана (см.рис.6.34). В дальнейшем все остальные скважины были сооружены с её применением. Для выявления факторов, влияющих на характер изменения зенитного угла горизонтальных скважин, при проведении опытных работ в той или иной мере определялось влияние угла заложения скважины, величины зазора между диаметром коронки и корпусом защитной колонны, конструкций защитной и бурильной колонн, продолжительности сооружения скважины, механической скорости бурения и др.

На рис. 6.35 изображены профили осей ряда скважин на вертикальную плоскость.

На рис.6.35а показан профиль оси первой скважины, пробуренной в режиме поверхностного истирания при средней механической скорости бурения $V_{мех}$=0,4-0,5 м/ч.

На рис.6.35 показаны профили осей скважин, пробуренных в том же режиме, но с учётом заложения 1º25/ и 1º15/. Из рисунка видно, что профили осей скважин практически идентичны: наблюдается тенденция падения оси скважины вниз. Отклонение начинается с 50-60 м, переход осуществляется

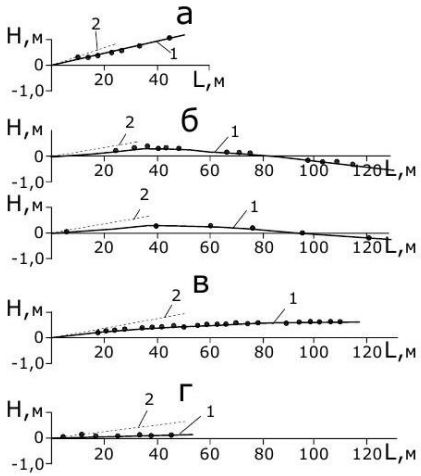


Рис. 6.35. Профили осей горизонтальных скважин, пробуренных из шахтных стволов

плавно, переходная зона составляет 20-30 м.

После подробного анализа полученных результатов, дополнительного рассмотрения влияния некоторых факторов (бурение сцентрированными колоннами, установка центров на бурильной колонне) и теоретических проработок были разработаны мероприятия по уменьшению интенсивности отклонения скважины вниз. В качестве основных из них являлись:

- бурение сцентрированными защитной и бурильной колоннами;
- бурение при установленных на бурильной колонне центраторов по схеме, изображённой на рис. 6.33;
- бурение в переходной зоне с повышенными механическими скоростями бурения ($V_{мех}$=1,2÷0,5 м/ч), исключающую подработку лежачей стенки скважин.

На рис.6.35(В, Г) приведены фактические профили скважин, пробуренных с учётом вышеназванных мероприятий. Из рисунков видно, что благодаря корректировке режимов бурения и совершенствованию конструкций защитной и бурильной колонн ситуацию с обеспечением поддержания заданного направления бурения горизонтальных скважин на данном объекте в конкретных гидрогеологических условиях удалось взять под контроль.

Все сооружённые скважины оборудовались щелевыми пластмассовыми фильтрами. Первоначальный дебит скважин колебался от 24

м^3/час до 160 м^3/час. Дебит воды в каждом из сооружаемых лучевых дренажей составлял 250-300 м^3/ч.

Результаты проведенных исследований были в дальнейшем использованы при сооружении лучевых дренажей в г.Каменск-Шахтинске, Зарафшане и других районах.

Проведенные исследования показали, что при бурении горизонтальных скважин в породах до VIII категории по буримости вращающаяся защитная колонна подрабатывает лежачую стенку скважины и этим способствует искривлению скважины. В связи с этим в арсенале технических средств при решении задач по бурению скважин со строго заданными требованиями по искривлению должны быть способы и устройства, позволяющие вести бурение без вращения защитной колонны на отдельных интервалах скважины, например, в переходных зонах. Решение этой задачи может быть достигнуто путём перехода на разрушение породы долотом бурильной колонны, диаметр которого равен диаметру коронки защитной колонны. Существует два варианта её решения.

Первый заключается в бурении скважины неизвлекаемым буровым долотом, установленным на бурильной колонне и диаметр которого равен диаметру коронки защитной колонны.

Его применение связано с производством лишних спуско-подъёмных операций, проведение которых в стеснённых условиях крайне нежелательно и ведёт к снижению производительности труда.

Второй вариант предусматривает разработку и создание способа и устройства, позволяющих при необходимости, например, в переходных зонах, вести бурение заданным диаметром, но без вращения защитной колонны и без производства спуско-подъёмных операций. Такое устройство и способ были созданы [275, 276]. В основу работы устройства был положен принцип отделения в заданной точке скважины коронки от защитной колонны, её захват породоразрушающим долотом бурильной колонны. Принципиальная схема устройства в момент связи породоразрушающих элементов приведен на рис. 6.36.

Устройство для осуществления способа содержит внешнюю (обсадную) 1 и внутреннюю (бурильную) 2 колонны труб, соосно расположенные и установленные с возможностью осевого смещения. Внешняя колонна 1 оснащена породоразрушающим элементом 3, а внутренняя – породоразрушающим элементом 4. Породоразрушающие элементы 3 и 4 разъёмно связаны с колоннами 1 и 2 соответственно и кинематически - с автономными вращателями. На внутренней поверхности внешнего породоразрушающего элемента 3 выполнены открытые с внутреннего торца 5 пазы 6. На внешней поверхности породоразрушающего элемента 4 выполнены выступы 7. Внешний породоразрушающий элемент 3

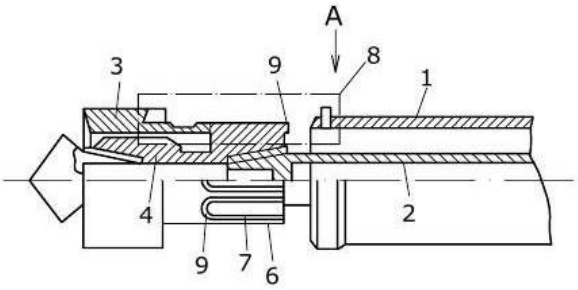


Рис. 6.36. Породоразрушающий инструмент

связан с внешней колонной 1 с помощью байонетного соединения 8.

При бурении по крепким породам внутреннюю колонну 2 подают вперёд до осуществления контакта передней кромки 9 выступов 7 и внутренней торцевой части 5 внешнего породоразрушающего элемента 3. Создавая в месте контакта небольшое давление и проворачивая внутреннюю колонну 2 труб, вводят в зацепление выступы 7 и пазы 6. Включают вращение и вводят выступы 7 внутреннего породоразрушающего элемента 4 в пазы 6 внешнего породоразрушающего элемента 3. После этого внутреннюю колонну 2 труб вращают в обратную сторону, включают подачу вперёд и осуществляют разъём байонетного соединения 8. Затем приводят во вращение колонны труб 2, на породоразрушащие элементы 3 и 4 прикладывают осевое усилие и осуществляют бурение.

Экспериментальные и аналитические исследования показали, что способ бурения двумя колоннами с независимыми приводами вращения, высокая жёсткость защитной и бурильной колонн, технологические возможности по изменению параметров режимов бурения, особенно частоты вращения защитной колонны, комбинации породоразрушающих инструментов, обеспечивающих бурение с вращением и без вращения защитной колонны, позволяют осуществлять проводку горизонтальных скважин без существенных отклонений её оси.

Способ бурения двумя колоннами позволяет вести бурение в разрушенных, трещиноватых породах, с потерей промывочной жидкости. Кроме того, способ бурения двумя колоннами с независимыми приводами имеет большой потенциал технических и технологических возможностей не только для поддержания оси горизонтальной скважины в заданном направлении, но и обеспечивать управление ею в процессе бурения. Примером решения такой задачи являются положения, обоснованные в работе [277]. В данной работе описаны конструкции породоразрушающих инструментов защитной и бурильной колонн, позволяющих вести бурение не

только прямолинейных участков скважины, но и решать задачи по отклонению оси в любую сторону и последующий выход на заданную траекторию, дана зависимость по определению угла искривления криволинейного участка скважины, описана технология бурения, обеспечивающая переход оси скважины с прямолинейного на участок с заданным углом искривления.

6.7. Пути совершенствования техники и технологии вскрытия песчаных водоносных горизонтов

Хронометражными замерами длительности основных технологических процессов, взятых как среднее по 4-м сооруженным скважинам [278], установлено, что время чистого бурения составляет 4,12 ч, время установки фильтров – 5,05 ч, время извлечения защитной колонны 7,33 ч. Из приведенных данных видно, что две последние операции в сумме примерно в 3 раза длительнее, чем время, связанное с проходкой скважины.

Учитывая, что при выполнении всех этих операций задействован и привод установки, то, естественно, что и энергозатраты в 3 раза больше, чем при осуществлении чистого бурения скважины.

С целью сокращения трудо- и энергозатрат, а также повышения надёжности технологического процесса сооружаемых скважин, разработана технология [279], согласно которой вскрытие водоносного горизонта осуществляется двумя колоннами, одна из них (внешняя защитная) выполнена в виде специальной фильтровой. Забойная часть фильтровой колонны совместно с породоразрушающим инструментом внутренней колонны оснащены гидравлической камерой, с помощью которой ведётся управление выносом песка с забоя скважины. Вынос разрушенной породы ведётся потоком промывочной жидкости, поступающей по внутренней полости внутренней колонны и далее по кольцевому пространству между внутренней и фильтровой колоннами.

Способ и устройство поясняются рисунками (6.37, 6.38, 6.39, 6.40).

Установка для сооружения горизонтальной или наклонной скважины в обводнённых песчаных горизонтах (рис. 6.37. и 6.38) представляет собой маслостанцию 1 (обычно установленную на поверхности 2), а также пульт управления 3 и буровой агрегат, который содержит вращатель 4 внешней колонны 5, вращатель 6 внутренней колонны 7, коаксиальные внешнюю колонну 5 и внутреннюю колонну 7, соответствующие поверхности которых формируют межколонное пространство. Передача осевого усилия и вращающего момента от вращателя 4 на внешнюю колонну 5 осуществляют специальным патроном 8, удержание внешней колонны 5 при свинчивании - развинчивании секций – гидроключём 9. Вращатели размещены на

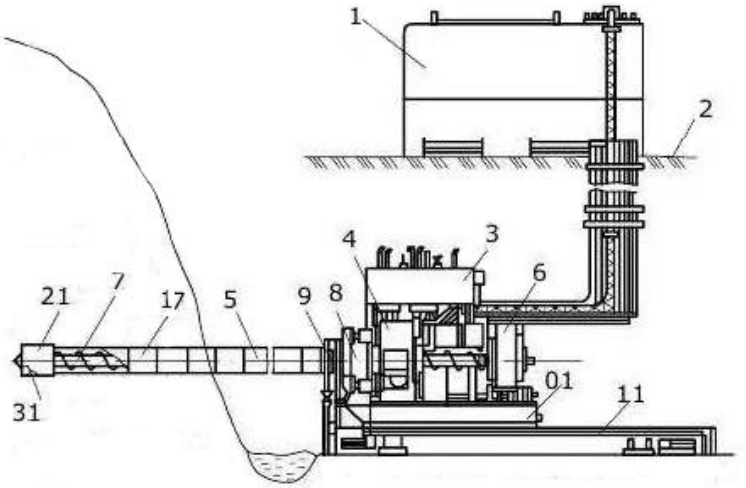


Рис.6.37. Общий вид установки для сооружения горизонтальной или наклонной дренажной скважины в обводнённых песчаных горизонтах

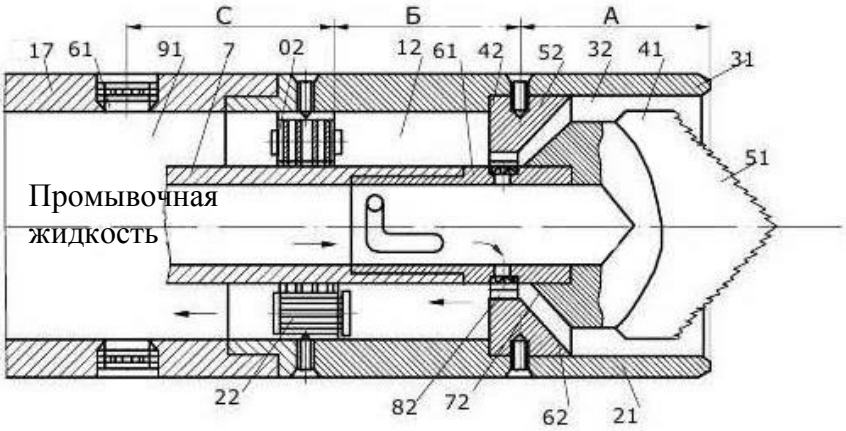


Рис.6.38. Внешняя и внутренняя колонны и элемент внешней колонны в момент бурения

подвижной раме 10, перемещающейся при движении вперед-назад по неподвижной раме 11. Внешняя колонна 5 оснащена буровой головкой 21, которая является продолжением внешней колонны 5 и имеет режущую кромку 31. Внутренняя колонна 7 (рис.6.38) снабжена элементом для разрушения породы и перекрытия торца внешней колонны 5 в виде долота 41 с коронкой 51 и хвостовиком 61. Внешняя колонна 5 включает фильтровые трубы 17 с круглыми сквозными отверстиями 18. Буровая головка 12 имеет сплошную цилиндрическую поверхность, и её внешний диаметр составляет 1,10-1,15 внешнего диаметра фильтровых труб 17.

Часть буровой головки 12 изолирована от фильтровой части внешней колонны в межколонном пространстве 91 герметизатором 02 с образованием в забойной части межколонного пространства гидравлической камеры 21, закреплённым на внутренней поверхности буровой головки 12. Длина гидравлической камеры 21 определяется по формуле

$$l = d \cdot tg\varphi \,, \qquad (6.108)$$

где l – длина гидравлической камеры;

d –диаметр буровой головки;

φ –угол внутреннего трения песка под водой.

При этом герметизатор 02 снабжён обратными клапанами 22, настроенными на открывание под давлением жидкости в гидравлической камере 21, близким или равным пластовому. Во внутренней поверхности буровой головки 12 со стороны забоя выполнена цилиндрическая выемка. Глубина и длина этой цилиндрической выемки достаточны для установления в ней одной из частей дополнительного составного механического затвора с упором в её торец 24, а также долота 41.

При выдвижении, например, внутренней колонны 7 ширина зазора меняется и образуется угол конусности, равный углу эффективного резания мягких пород 60-45°. Забойная часть внешней колонны 5 и внутренней колонны 7 для наглядности на рис.6.38. разделена условно на три функциональные зоны:

А – зона механического регулирования;

В – зона гидравлического затвора;

С – зона связи атмосферы воздуха с межколонным пространством.

При сооружении скважин величину параметров бурения определяют заранее. В качестве таких параметров используют частоту вращения фильтровой колонны, расход промывочной жидкости, осевое усилие на забой и зазор, через который удаляется разрушаемая порода с забоя.

Величину осевого усилия выбирают с таким расчётом, чтобы механическая скорость бурения была не выше расчётной, при которой объём

разрушенной породы не превышал 1,15 объёма скважины.

Вращение внешней колонны и внутренней колонны осуществляют или в одну сторону, или в противофазе, при этом последнее уменьшает вероятность искривления скважины и предотвращает разворот внешней колонны при вращении внутренней колонны и удалении шлама.

Важное место занимает контроль за давлением и расходом промывочной жидкости. Её расход должен быть достаточным для полного удаления шлама, а давление таково, чтобы исключить поглощение пластом жидкости.

При бурении в неустойчивых обводнённых песках ключевым параметром является частота вращения колонны.

Практическими данными доказано, что в начале бурения при небольших силах трения на внешнюю колонну частота вращения фильтровых труб должна быть минимальной $\acute{\eta}$ = 0,5-1,0 об/мин. При увеличении сил трения поддерживать частоту вращения в этих пределах очень трудно, т.к. при больших сопротивлениях вращательному движению гидромотор вращателя при таких оборотах останавливается и необходимо увеличивать обороты до 3 об/мин.

Увеличение частоты вращения внешней колонны свыше 3 об/мин ведёт к искривлению скважин. Поэтому оптимальным для внешней колонны является частота 0,5-3,0 об/мин.

Частота вращения внутренней колонны оказывает существенную роль в интенсивности разрушения породы. Для песков оптимальный её диапазон составляет 80-100 или 80-120 об/мин, при которых способ ещё является работоспособным. Вынос разрушенной породы осуществляют промывочной жидкостью через обратные клапаны герметизатора, которые настраивают на открывание при давлении, близком или равном пластовому, отвод дренируемой воды производят через фильтровую часть внешней колонны межколонного пространства. В процессе бурения дополнительно регулируют вынос породы. Улучшение процесса выноса песка обеспечивается снабжением устройства дополнительными сквозными горизонтальными полуканалами в форме полусфер.

В 90-е годы в институте ВИОГЕМ начали проводиться исследования по разработке технических средств и технологии горизонтального бурения по вскрытию водоносных горизонтов с противодавлением на пласт.

К этому времени в США для прокладки технологических трубопроводов в различных гидрогеологических условиях, в том числе и в обводнённых грунтах, был разработан метод горизонтального направленного бурения (ГНБ), в котором удержание стенок скважины от обрушения также осуществлялось избыточным давлением столба промывочной жидкости. Первая скважина по данному методу была пройдена в Калифорнии. В 1986г.

85 % всех переходов под дорогами было сооружено методом ГНБ.

Способ ГНБ предполагает, что сначала скважина бурится под наклоном 10-20^{o} вниз, потом выполаживается до горизонтального положения, а на завершающем этапе с помощью отклоняющего породоразрушающего инструмента скважина полого, под углом 5-10^{o} переводится в наклонное положение с выходом забоя на дневную поверхность. Бурение скважин необходимого диаметра (до 200 мм) осуществляется прямым ходом с использованием колонны бурильных труб, изготовленных из высокопрочных сталей, с прямой промывкой скважины высококачественным буровым раствором из монтмориллонитовых глин, обработанных полимерами, например, полиакриламидом. Для бурения скважин под трубопроводы большего диаметра скважину расширяют до нужного диаметра расширителями обратного хода. Благодаря наличию технологических наклонных участков скважины, применению глинистых растворов, удельный вес которых $\gamma \geq 1{,}05\text{-}1{,}08$ гс/см^3, в скважине всегда поддерживается избыточное давление, которое выше пластового давления грунтовых вод. За счёт избыточного давления и структурных свойств раствора обеспечивается устойчивость стенок скважины.

В России начало внедрения бестраншейной технологии прокладки трубопроводов относится к концу 80-хх годов XX века. Длина сооружаемых скважин в России достигает 1000 м.

Для сооружения горизонтальных дренажных скважин, которые работают в самотёчном режиме, данный способ требуется усовершенствовать.

Для создания в обводнённых песках противодавления на пласт разработано комплексное устройство, включающее механические и гидравлические элементы, обеспечивающие проведение этого процесса в режиме превышения давления промывочной жидкости над давлением пластовых вод.

Устройство для сооружения горизонтальных дренажных скважин показано на рис.6.39.

Устройство для сооружения горизонтальной дренажной скважины включает буровую установку 1 с пультом управления, вращатель 2, бурильную колонну, составленную из штанг 3, и буровой инструмент 4.

В отверстии, выполненном в крепи 5 вертикальной выработки 6 по оси 7 сооружаемой горизонтальной дренажной скважины, установлен кондуктор 8, который закреплён в крепи 5 фланцем 9. На кондукторе 8 установлена задвижка 10, на которой закреплён корпус герметизатора 11, а на штанге 3 бурильной колонны установлены герметизирующие элементы 12 с нажимной втулкой 13, обеспечивающей герметизацию кольцевого пространства между штангами 3 и внутренней поверхностью корпуса гермитизатора 11, благодаря

чему исключается свободный отток структурированной промывочной жидкости из скважины. На конце последней штанги 3 бурильной колонны в месте соединения с буровым инструментом 4 в виде долота размещён обратный клапан 14, установленный с возможностью перекрытия внутренней полости бурильной колонны, составленной из штанг 3.

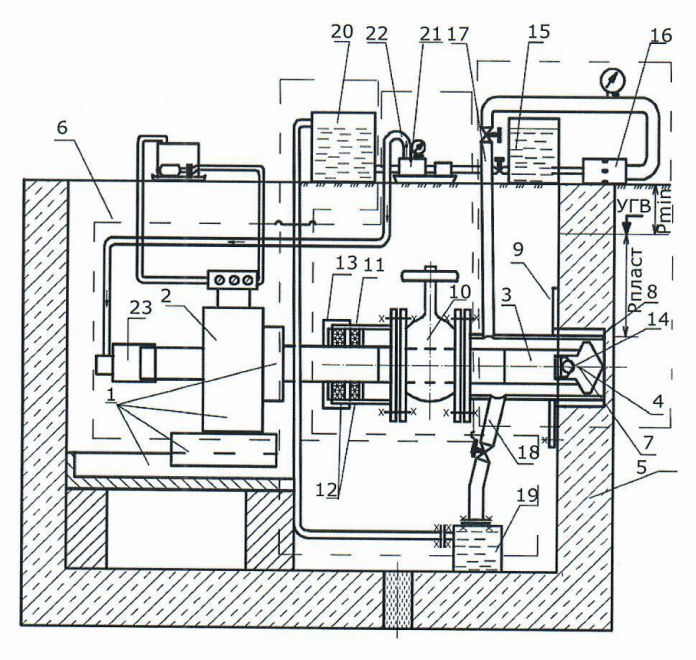


Рис.6.39. Устройство для сооружения горизонтальных дренажных скважин из шахтных стволов с противодавлением на пласт:
1-буровая установка с пультом управления; 2- вращатель; 3- бурильные штанги; 4- буровой инструмент; 5- крепь; 6- шахтный ствол; 7- ось скважины; 8- кондуктор; 9- фланец; 10- задвижка; 11-герметизатор; 12- герметизирующие элементы; 13- нажимная втулка; 14- обратный клапан; 15-резервная ёмкость; 16-подкачивающий насос; 17-подводящий трубопровод; 18-отводящий трубопровод; 19- накопительная ёмкость для бурового шлама; 20- сливная ёмкость; 21- буровой насос; 22- нагнетательный трубопровод; 23- сальник-вертлюг

Замкнутая гидравлическая система обеспечения и поддержания давления промывочной жидкости в сооружаемой скважине выше давления пластовых грунтовых вод на периоды сооружения горизонтальной

дренажной скважины и установки в ней фильтров представлена сочетанием трёх самостоятельных гидравлических линий.

В состав гидравлической линии обеспечения поддержания избыточного давления структурированной промывочной жидкости в сооружаемой скважине при наличии её потерь входит резервная ёмкость 15, подкачивающий насос 16, используемый в частном примере для заполнения резервной ёмкости 15, подводящий трубопровод 17 с запорными элементами, которые связаны с кондуктором 8, причём высота расположения резервной ёмкости 15 над уровнем пластовых грунтовых вод составляет не менее 3-5 м, что обеспечивает поддержание требуемого избыточного давления структурированной промывочной жидкости в сооружаемой скважине при наличии её потерь.

В состав отводящей гидравлической линии входит кондуктор 8, отводящий трубопровод 18 с запорными элементами, накопительная ёмкость 19 для сбора бурового шлама и сливная ёмкость 20, которую располагают на высоте не менее чем 3-5 м над уровнем пластовых вод.

В состав нагнетательной гидравлической линии, обеспечивающей подачу промывочной жидкости к буровому инструменту 4 и вынос бурового шлама, включён буровой насос 21, нагнетательный трубопровод 22, сальник-вертлюг 23 бурового агрегата 1, штанги 3 бурильной колонны и обратный клапан 14, который обеспечивает сохранение заданного давления в скважине при рассоединении штанг 3 во время наращивания и извлечения бурильной колонны.

Для установления фильтровой колонны (рис 6.40) из фильтров 24 устройство снабжено герметизатором фильтровой колонны, который в частном примере выполнения составлен из внешнего герметизирующего элемента 25 и внутреннего герметизирующего элемента 26 в виде скользящего пакера для перекрытия внутреннего сечения фильтра 24. Внутренний герметизирующий элемент 26 удерживается в зоне внешнего герметизирующего элемента 25 с помощью удерживающего элемента 27 в виде талрепа, связанного с крепью 5 вертикальной выработки 6.

По данному способу сооружение горизонтальной дренажной скважины в обводнённых песках осуществляют следующим образом (см.рис.6.39 и 6.40).

В крепи 5 вертикальной выработки 6 по оси 7 сооружаемой скважины выбуривают отверстие (не показано) с оставлением перемычки (не показано), прочность которой обеспечивает её монолитность под воздействием давления пластовых вод за крепью 5. После создания отверстия в крепи 5 устанавливают в нём кондуктор 8, закрепляя фланцем 9. Через отверстия (не показано) во фланце 9 в кольцевое пространство между кондуктором 8 и крепью 5 вертикальной выработки 2 нагнетают цементный раствор и

оставляют его твердеть.

На фланец 9 кондуктора 8 крепят задвижку 1. На задвижке 1 устанавливают корпус герметизатора 11, который на этапе бурения выполняет функцию герметизатора бурильной колонны, а на штангу 3 бурильной колонны – герметизирующие элементы 12 с нажимной втулкой 13.

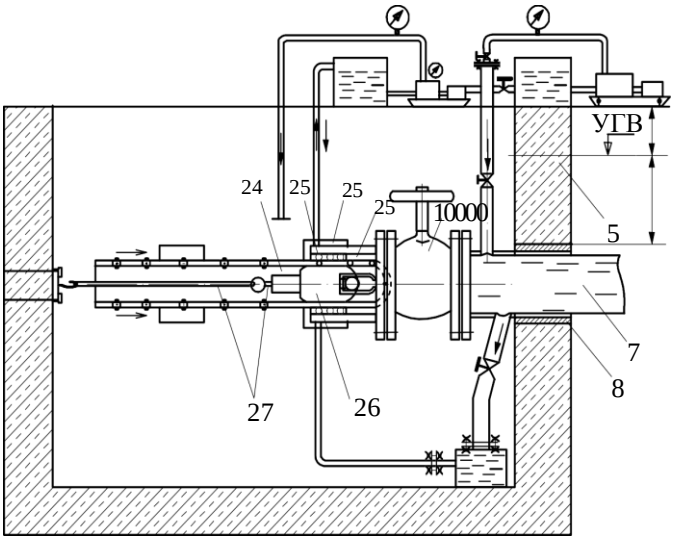


Рис.6.40. Схема оборудования скважин в режиме противодавления на пласт

На смонтированный кондуктор 8 устанавливают подводящий трубопровод 17 и отводящий трубопровод 18. Подводящий трубопровод 17 через запорную арматуру (не показано) связывают с резервной ёмкостью 15 и подкачивающим насосом 16, который используют для заполнения резервной ёмкости 15.

Отводящий трубопровод 17 также через запорные элементы связывают с накопительной ёмкостью 19 для сбора бурового шлама и соединяют со сливной ёмкостью 20, что позволяет сформировать гидравлический затвор (не показан), в котором поддерживают превышение давления жидкости в скважине над пластовым. Накопительную ёмкость 19 и сливную ёмкость 20 устанавливают с таким расчётом, чтобы их нижний уровень возвышался над уровнем пластовых грунтовых вод не менее чем на 3 м.

Сливную ёмкость 20, являющуюся питающим резервуаром для бурового насоса 21, через его нагнетательный трубопровод 22, сальник – вертлюг 23 бурового агрегата 1 соединяют со штангами 3 бурильной колонны.

Таким образом, гидравлическая линия, отводящая в совокупности с гидравлической линией нагнетательной, создают замкнутую гидравлическую систему, в которой постоянно поддерживают давление структурированной промывочной жидкости выше давления пластовых грунтовых вод на 0,3-0,5 атм. Во время наращивания штанг 3 происходит разрыв гидравлической линии нагнетательной по бурильной колонне.

Для исключения этого между первой штангой 9 бурильной колонны и буровым инструментом 4 устанавливают обратный клапан 14, исключающий утечки структурированной промывочной жидкости через внутреннюю полость бурильной колонны во время её наращивания или извлечения для замены бурового инструмента 4.

После монтажа замкнутой гидравлической системы обеспечения и поддержания давления структурированной промывочной жидкости выше давления пластовых грунтовых вод на периоды горизонтальной дренажной скважины и установки в ней фильтров снимают с корпуса герметизатора 11 нажимную втулку 13. Вводят в корпус герметизатора 11 в сборе штангу 3 буровой инструмент 4 и обратный клапан. На задний конец штанги 11 устанавливают герметизирующий элемент 11 и нажимную втулку 13. Последнюю соединяют с корпусом герметизатора 11 и подтягивают её, добиваясь надёжной герметизации кольцевого пространства между бурильной колонной и внутренней поверхностью корпуса герметизатора 11.

Установив бурильную колонну в герметизаторе 11, настраивают все гидравлические линии, устраняют возможные протекания и разбуривают перемычку (не показано). После разрушения перемычки осуществляют бурение буровым агрегатом 1 по водоносному горизонту в режиме противодавления, подавая структурированную промывочную жидкость по нагнетательному трубопроводу 22 к буровому инструменту 4, и осуществляют контроль поддержания давления структурированной промывочной жидкости выше на 0,3-0,5 давления пластовых грунтовых вод. Снижение давления устраняют восполнением потерь путём подачи структурированной промывочной жидкости из резервной ёмкости 15 по подводящему трубопроводу 17, связанному через запорные элементы с кондуктором 8.

После бурения скважины до проектной глубины из неё удаляют весь буровой шлам и извлекают буровую колонну. После выхода бурового инструмента из задвижки 10 её закрывают, перекрывая сечения скважины. Бурильную колонну демонтируют, а герметизатор 11, выполняющий функцию герметизатора бурильной колонны, меняют на герметизатор фильтровой колонны, состоящий в частном примере выполнения из внешнего герметизирующего элемента 25 и внутреннего герметизирующего элемента 26 в виде скользящего паркера, который устанавливают в первую

секцию фильтра 24. Внутренний герметизирующий элемент 26 крепят удерживающим элементом 27 типа талрепа к крепи 5. Открывают задвижку 10 и подают фильтр 24 в сооружаемую скважину. После подачи одного фильтра наращивают второй и так до посадки всей фильтровой колонны, закрывают задвижку 10 и начинают освоение готовой скважины постепенной заменой структурированной промывочной жидкости на чистую воду путём снижения давления сначала до давления пластовых грунтовых вод, а затем до рабочего.

На принципе сооружения горизонтальных скважин с противодавлением на пласт для прокладки технологических трубопроводов из шахтных стволов диаметров 4,0 м с диаметром прокладываемого трубопровода больше 168 мм разработана буровая установка с комплектом гидравлической обвязки из запорной арматуры, позволяющей вести бурение с противодавлением на пласт [262].

6.8. Особенности технологии оборудования водоприёмных частей ГДС фильтрами

Чтобы оценить сложность технологического процесса по оборудованию водоприёмной части горизонтальных скважин фильтрами, рассмотрим этот процесс для способа бурения под защитой обсадной колонны (см. рис. 6.1). Как видно из рисунка, установка фильтров в горизонтальную скважину осуществляется путём подачи секций фильтровой колонны по защитной колонне при перекрытии её торца долотом.

При достижении фильтровой колонны хвостовика долота приступают к операциям по извлечению защитной колонны. Опыт выполнения работ по извлечению защитных колонн в различных гидрогеологических условиях показал, что извлечение защитной колонны является очень сложным и трудоёмким процессом, при выполнении которого возможны разрушения фильтровых колонн, фильтрующих элементов и даже обрывы защитных колонн. Анализ причин произошедших аварий показал, что это связано с несовершенством технических устройств, отвечающих за сохранность фильтровой колонны. Анализом установлено:

- извлечение защитной колонны возможно только с вращением;
- при снятии защитной колонны водопесчаная смесь проникает в кольцевое пространство между фильтрами и защитной колонной и после оттока свободной воды через фильтр в кольцевом пространстве образуется песчаная пробка, которая вызывает заклинивание фильтров;
- разработанные устройства герметизации кольцевого пространства под воздействием нагрузок (силы трения при вращательном и

поступательном движении колонны назад, силы трения фильтров, вызванные собственным весом фильтров) быстро выходят из строя и потому ненадёжны.

Для предупреждения возможности разрыва фильтровой колонны при извлечении защитной колонны необходимо обеспечить удержание фильтров от смещения в осевом направлении.

С учётом накопленного опыта, проведенного анализа вскрытия водоносных горизонтов и оборудования водоприёмных частей горизонтальных скважин фильтрами были разработаны компоновки буровых снарядов для бурения в обводнённых песках, не содержащих крупных твёрдых включений и содержащих таковые, а также способ посадки фильтровой колонны в этих условиях [280]. Для удержания фильтров в неподвижном состоянии применяется упор для фильтров, приведенный на рис.6.41. Проведенные доработки технологической оснастки и бурового инструмента существенно повысили надёжность всех этапов технологического процесса при сооружении скважин, в т.ч. управляемость выносом песка из пласта при бурении. Однако 100 % надёжности достичь не удалось.

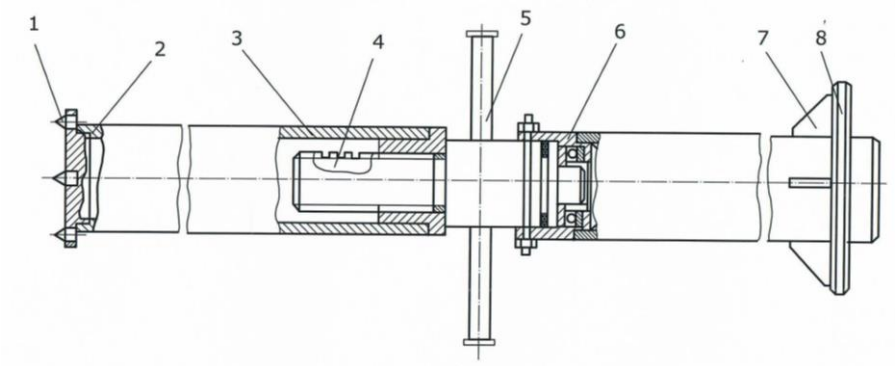


Рис. 6.41. Упор для фильтра:
1-шипы; 2-вставка; 3-стойка; 4-винт; 5-вороток; 6-упор; 7-рёбра; 8-кольцо

Дальнейшие исследования шли в направлении повышения надёжности технологии извлечения защитной колонны и совершенствования технических средств, технологических процессов при сооружении горизонтальных дренажных скважин в обводнённых грунтах.

Для решения проблемы поступления песка в кольцевое пространство между фильтром и защитной колонной была предложена технология для извлечения защитной колонны с противодавлением жидкости, подаваемой в скважину. Разработанное устройство (рис.6.42) включает вращатель 1

внешней защитной колонны 2 с коронкой 3, вращатель 4 внутренней бурильной колонны с долотом 5, буровой насос, маслостанцию 6, пульт управления 7, находящийся во внешней защитной колонне 2, фильтровую колонну 8 и упор 9, установленный между крепью ствола 10 и фильтровой колонной 8 и дополнительный пакер, установленный на устье внешней защитной колонны 2.

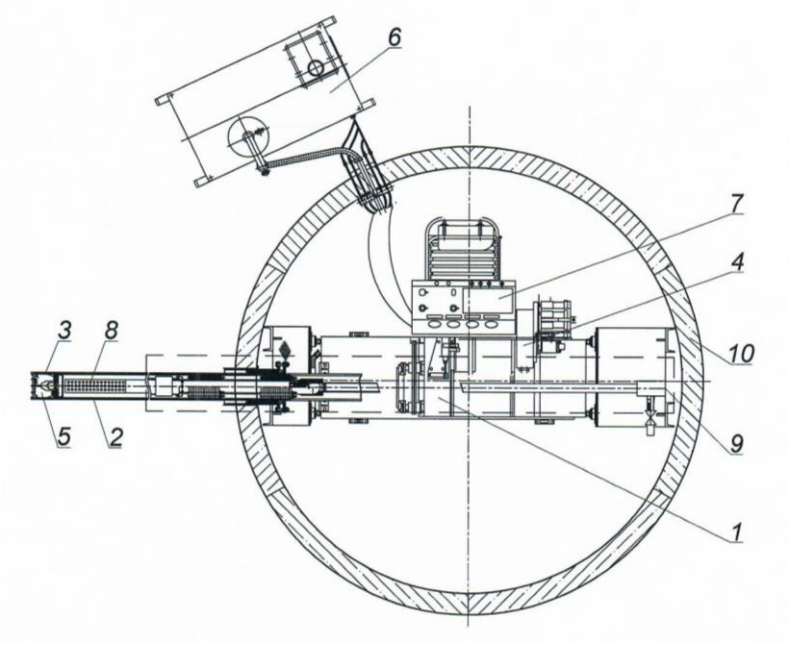


Рис. 6.42. Схема оборудования горизонтальной скважины фильтровой колонной с применением установки УЛБ-130 и пакерного устройства

Сооружают дренажную скважину буровой установкой с применением внешней защитной колонны 5, перекрывают торец коронки 3 отрывным долотом 12 (рис.6.43), извлекают внутреннюю бурильную колонну и устанавливают фильтровую колонну с оставлением на устье внешней защитной колонны 5 свободного места.

Размещают в этом месте пакер в сборе, включающий корпус с одним или двумя собранными герметизаторами, состоящими из опорных фланцев резиновых манжет нажимных фланцев и стяжных болтов, а также направляющую юбку с подшипниковым узлом, корпус обратного клапана с оголовком подводящего трубопровода, выполняющего функцию упора. При

этом направляющей юбкой накрывают фильтровую колонну, подшипниковый узел упирают в её торец. Надёжность перекрытия внутренней полости внешней защитной колонны 5 осуществляют путём поджатия стягивающими болтами резиновых манжет. После этого нагнетают жидкость в кольцевое пространство, обеспечивая режим противодавления на пластовую жидкость водоносного горизонта. Устранение люфта между корпусом пакера подводящего трубопровода и крепью шахтного ствола осуществляют с помощью резьбового соединения подводящего трубопровода. Буровым насосом с помощью запорно-регулирующей аппаратуры создают в скважине расчётное избыточное давление и посекционно извлекают внешнюю защитную колонну 5. После отсоединения каждой секции снимают подводящий трубопровод и вновь создают противодавление для извлечения каждой секции внешней защитной колонны 5. При прекращении нагнетания жидкости во время снятия внешней защитной колонны 5 и подводящего трубопровода обратный клапан предотвращает отток жидкости из скважины и не позволяет давлению в скважине снизиться ниже пластового давления в водоносном горизонте.

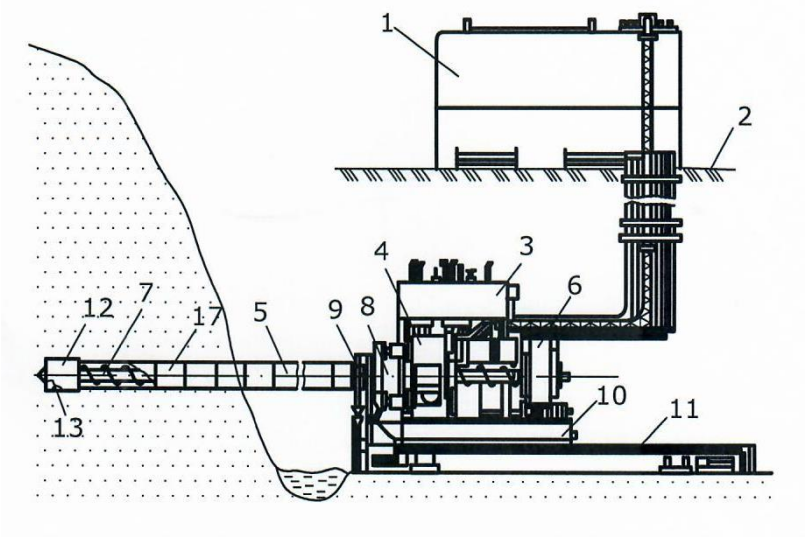


Рис. 6.43. Сооружение дренажной скважины в откосе

С использованием разных технологических приёмов и разных буровых установок в настоящее время специалистами ВИОГЕМ сооружаются горизонтальные скважины как для защиты от обводнения горных объектов, так и от подтопления городских территорий. Перспективна данная

технология и для отбора подземных вод с целью хозпитьевого водоснабжения (рис. 6.44-6.47).

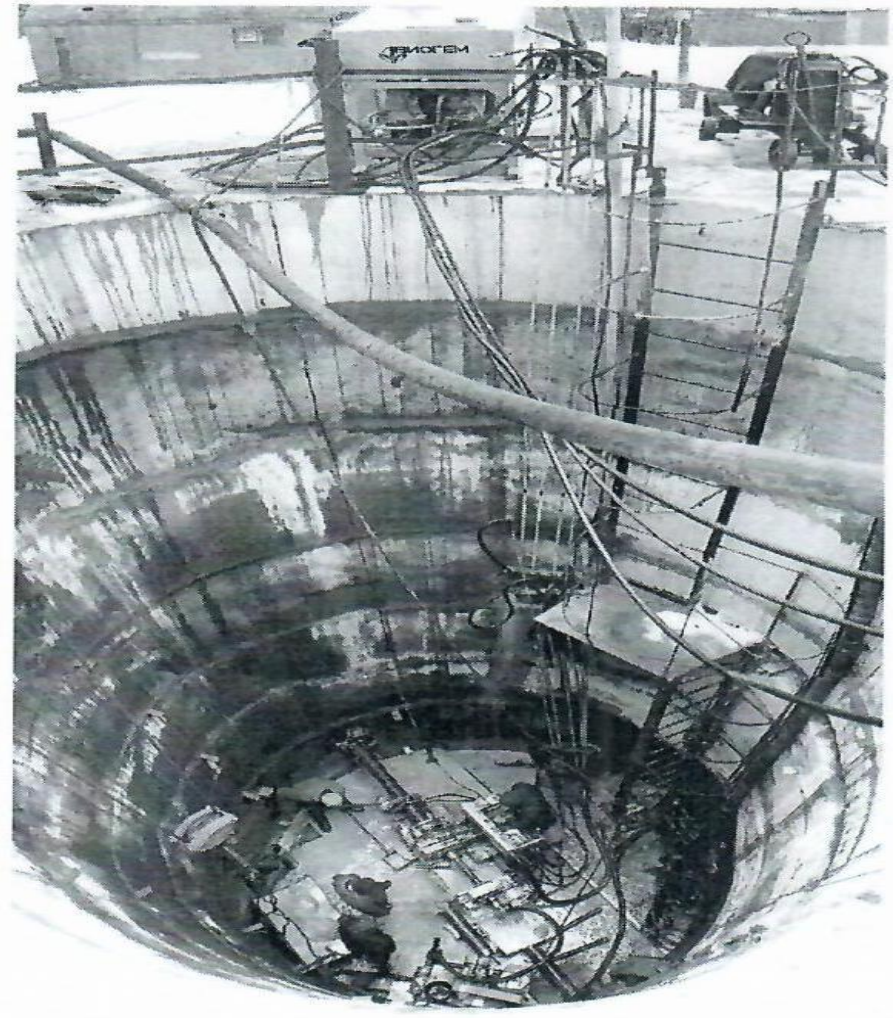


Рис. 6.44. Сооружение горизонтальной скважины из шахтного колодца для защиты от подтопления городской территории

Рис. 6.45. Сооружение дренажной скважины в борту железорудного карьера

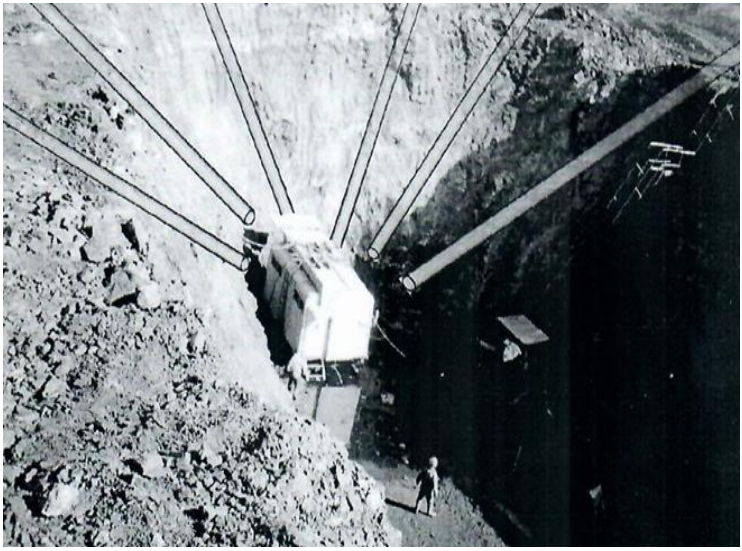


Рис. 6.46. Сооружение лучевых дренажных скважин на забое угольного разреза

Рис. 6.47. Лучевые водозаборные скважины

6.9. Фильтры горизонтальных скважин

Водоприёмная часть горизонтальных скважин оборудуется фильтровой колонной. Несмотря на видимую схожесть в назначении и работе фильтровых колонн разных скважин, эксплуатация фильтров горизонтальных скважин имеет существенные особенности.

Во-первых, горизонтальные дренажные скважины очень часто сооружаются с для осушения промплощадок, подтопление которых вызвано утечками загрязнённых жидкостей, перехвата фильтрата из шламо- и хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов, снижения уровня грунтовых вод на подтопленных городских территориях, т.е. там, где поступающие через фильтр воды, как правило, содержат повышенное содержание химически активных компонентов. С учётом этих обстоятельств фильтры горизонтальных скважин должны обладать высокой коррозионной стойкостью по многим видам солей и кислот.

Во-вторых, горизонтальные скважины сооружаются под фундаментами защищаемых от подтопления зданий и сооружений, при осушении бортов карьеров и строительных котлованов, когда вынос песка из пласта недопустим, так как может повлечь за собой просадки грунта под

фундаментами зданий и сооружений и вызвать угрозу возникновения деформаций строительных конструкций и даже их разрушение. Вынос недопустимого количества песка из бортов карьеров, откосов котлованов и дамб может привести к потере их устойчивости и вызвать оползни.

Поэтому второе основное требование к фильтрам горизонтальных скважин – высокая надёжность против пескования.

Фильтры горизонтальных скважин эксплуатируются при свободном доступе воздуха к фильтровой колонне.

Требования по химической стойкости к агрессивному воздействию грунтовых вод и надёжности против пескования к фильтрам горизонтальных скважин значительно выше, чем, например, к фильтрам вертикальных скважин на воду.

Из приведенного описания условий, в которых работают фильтры горизонтальных скважин, технологии оборудования ими водоприёмных частей, конструктивных особенностей буровой установки, компоновок бурового инструмента, хода подачи, внутреннего диаметра защитной колонны, динамики нагрузок при извлечении защитной колонны, к фильтрам горизонтальных скважин также предъявляются высокие требования по механической прочности и фильтрационным характеристикам.

С учётом хода подачи установки и внутренних диаметров защитной колонны и её породоразрушающего инструмента максимальные диаметры фильтра для горизонтальных скважин должны быть: при бурении в песках, когда в коронке установлен упорный конус для отрывного долота – 105 мм, при бурении в суглинистых грунтах, когда бурение ведётся без отрывного долота – 120 мм.

Максимальная длина секции фильтра – 2,0 м.

Минимальная длина – 1,40 м.

Внутренний диаметр фильтра определяется его конструкцией и должен обеспечивать беспрепятственный пропуск воды через внутреннее сечение в самотёчном режиме при минимальном уклоне скважины $\approx 0{,}5^0(30')$.

Скорости движения вод в фильтрах должны быть ниже скоростей, соответствующих границе квадратичной области сопротивлений в трубах. По данным [Андриевская и др. – Задачник по гидравлике] критические скорости и соответствующие им расходы жидкости приведены в таблице 6.9.

Исходя из практического опыта бурения горизонтальных дренажных скважин в разных гидрогеологических условиях, начиная от суглинков с коэффициентами фильтрации от 0,1 до 0,5 м/сут и дебитами скважин, не превышающими 1,5-2,0 $м^3$/ч, крупнозернистыми песками с коэффициентами фильтрации до 30 м/сут и дебитом скважин до 25-30 $м^3$/ч, и в полускальных породах с расходами скважин до 300 $м^3$/ч внутренние диаметры фильтров дренажных скважин должны выбираться в зависимости от

гидрогеологических условий и расчётных дебитов и включать несколько типоразмеров, начиная от 50 до 150 мм.

Таблица 6.9 – Критические скорости в фильтрах и соответствующие им расходы жидкости

Диаметр трубопровода, мм	Критическая скорость $V_{кр}$, соответствующая границе квадратичного. сопротивления., м/с	Расход м^3/ч при $V_{кр}$
50	0,8	$\leq 5,6$
75		$\leq 13,5$
100	0,9	≤ 25
150		$\leq 57,6$
200	1,0	≤ 115

В качестве материала фильтра может быть выбран в том числе полиэтилен, не выделяющей при комнатной температуре токсических веществ и не оказывающий вредного воздействия на организм при непосредственном контакте, а также как стойкий в кислотных средах.

Серная кислота: концентрация до 60 %, водный раствор, температура до 60^0, концентрация до 80 %, водный раствор, температура 40 ^{0}С.

Соляная кислота: до 36 %, водный раствор, температура до 20 ^{0}С.

Азотная кислота: 1 % водный раствор, температура до 60 ^{0}С.

В основу идеи изготовления фильтра был положен принцип напыления на перфорированный каркас из полиэтиленовых труб расплавленных волокон полиэтилена с тонкостью 100-200 мкм с созданием фильтрующего слоя толщиной 7,0 мм и эффективной пористостью от 30 до 80 %.

Важное место уделялось вопросам соединения секций фильтра между собой. За базу было принято корпусное резьбовое соединение для фильтров диаметром 125 мм и ленточная резьба для фильтров Ø 105 мм и менее. Для снижения гидравлических сопротивлений фильтра и повышения водозахватной способности его каркаса перед напылением на перфорированную трубу наносилась сетка с толщиной нити, превышающей толщину напыляемой нити в 3,5-7,0 раз.

Исходя из заданных параметров фильтра (диаметра не более 105 мм), его сопротивления растяжению-сжатию не менее 30 кН, перфорация каркаса фильтра выполняется круглыми отверстиями диаметром 20 мм с шагом 36 мм. Для каркаса создаваемого фильтра подходят полиэтиленовые трубы диаметром 90/70 мм. Для обеспечения заданного сопротивления каркаса растяжению-сжатию количество рядов перфорации по периметру указанной

трубы может быть не более 4-х. Тогда скважность каркаса будет составлять:

$$\eta_1 = \frac{d^2 n}{4t \cdot Д_{ср}} \cdot 100 , \qquad (6.109)$$

где d – диаметр отверстий перфорации в каркасе фильтра, см;
$Д_{ср}$ – средний диаметр перфорированного каркаса, см;
t –шаг расположения отверстий в ряду перфорации, см;
n –количество рядов перфорации в каркасе фильтра.

Подсчеты по формуле (6.109) показывают, что η_1=13 %.

Скважность фильтра определяется по формуле

$$\eta = \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{100} , \qquad (6.110)$$

где η_1 и η_2 – скважность соответственно каркаса и фильтрующей оболочки в %.

Эффективная пористость определяется по формуле:

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{m}{\rho \cdot V}\right) \cdot 100 , \qquad (6.111)$$

где m – масса образца фильтрующей оболочки, г;
ρ – плотность фильтрующей оболочки, г/см^3;
V –объём образца фильтрующей оболочки, см^3.

С целью получения фильтрующей оболочки, удовлетворяющей отмеченным выше требованиям по пористости, прочности и водопроницаемости, производилось напыление волокон различной толщины с последующими замерами и исследованиями полученных фильтрующих оболочек. Этими работами установлено, что заданным требованиям отвечают оболочки, образованные из волокон толщиной 100-200 микрон.

Определение предела прочности фильтрующей оболочки на растяжение и относительного удлинения выполнялось на разрывной машине Р-0,5; для этой цели из трубчатой фильтрующей оболочки вырезались образцы размером 58х10 мм, помещались в зажимы разрывной машины и плавным нагружением доводились до разрушения. Максимальное значение нагрузки по шкале разрывной машины в момент разрыва образца принималось за разрушающую нагрузку. Предел прочности на растяжение определялось по известной формуле:

$$\sigma = \frac{P}{в \cdot h} , \qquad (6.112)$$

где P – нагрузка в момент разрыва образца, Н;
$в$ – ширина образца до испытаний, м;
h –толщина образца до испытаний, м.

Относительное удлинение рассчитывалось по уравнению:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta \ell_p}{\ell_0} \cdot 100 , \qquad (6.113)$$

где $\Delta \ell_p$ – приращение длины образца, мм;

ℓ_0 – начальная длина образца, мм.

Для определения пескоудерживающей способности фильтра из фильтрующей оболочки вырезались образцы круглой формы диаметром 16 мм, на которых проводились исследования. Метод исследований основан на визуальном определении проникновения частиц, прошедших через испытываемый образец при фильтрации через него предварительно загрязнённой жидкости. В опытах использовались гранулы порошка ПВХ по ГОСТ 14332-78, классифицированные по диаметрам 100, 200, 300 мкм.

Результаты описанных выше исследований и расчётов приведены в табл. 6.10.

Из таблицы видно, что разработанные фильтрующие оболочки в основном отвечают требованиям, предъявляемым к фильтрам для лучевых дренажей.

Кроме разработки и исследований фильтрующей оболочки, выполнялись лабораторные испытания на прочность перфорированных каркасов создаваемых фильтров и их соединений. Их испытания проводились на растяжение и сжатие; на растяжение они выполнялись на размывной машине Р-50, а на сжатие – с помощью пресса. В качестве соединений секций фильтров между собой разработаны: упорная трубная резьба, металлическая резьба и соединение типа «ёрш».

Таблица 6.10 - Результаты исследований фильтрующей оболочки создаваемых фильтров

Наименование показателей	Единицы измерения	Значения показателей
Пористость	%	46-66
Плотность	г/см^3	0,3-0,5
Диаметры волокон	мм	0,09-0,2
Относительное удлинение при разрыве	%	18-64
Прочность при растяжении	МПа	0,86-2,48
Размер отверстий	мкм	100-200
Коэффициент фильтрации	м/сут	≥32,0

При испытаниях на растяжение образцы каркаса фильтра и их соединений устанавливались в захваты разрывной машины и плавным нагружением со скоростью 20±2 мм/мин доводились до разрушения,

максимальное значение нагрузки по шкале разрывной машины принималось за разрушающее. Аналогичным образом работы выполнялись на прессе.

Результаты испытаний на прочность приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11 - Результаты испытаний каркасов фильтров на растяжение и сжатие

№ обр.	Обозначение каркаса	Тип резьбы каркаса	Разруша-ющая нагрузка, кН	Характер разрушения
1	2	3	4	5
Растяжение				
1	90х10	упорная	40,0 45,0	изменение формы каркаса обрыв по резьбе в её основании
2	90х10	упорная	35,0 42,8	изменение формы каркаса обрыв по резьбе в её основании
3	90х10	упорная	35,0 43,0	начало изменения формы обрыв по резьбе в её основании
4	90х10	метрическая	34,0	обрыв по резьбе в её основании
5	90х10	метрическая	41,8	обрыв по резьбе в её основании
6	90х10	метрическая	42,0	обрыв по резьбе в её основании
Сжатие				
1	90х10 с дисками	упорная	60,0 120,0	сплющивание дисков, полное закрытие щелей растрескивание дисков
2	90х10 с дисками	упорная	150,0	растрескивание дисков
3	90х10 без дисков	упорная	57,5	разрушение каркаса
4	90х10 без дисков	метрическая	61,5	разрушение каркаса
5	90х10 без дисков	метрическая	55,0	разрушение каркаса
6	90х10 без дисков	метрическая	59,0	разрушение каркаса

Кроме этого для испытаний соединений фильтров использовались образцы с резьбовым соединением со шпильками и без них, а также образцы с гладким муфтовым соединением со шпильками.

Результаты этих испытаний приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12 - Результаты испытаний резьбовых соединений фильтров со шпильками и без них; с гладким муфтовым соединением со шпильками

Вид соединения	Усилие разрыва, кН	Примечание
1	2	3
Резьбовое соединение М90 с 2-мя шпильками Ø 4 мм с 4-мя шпильками Ø 4 мм	 34,50 39,00	 выскальзывание по резьбе выскальзывание по резьбе
без шпилек	32,50	выскальзывание по резьбе
Муфтовое гладкое соединение Ø 88 с 2-мя шпильками Ø 4 мм с 3-мя шпильками Ø 4 мм с 4-мя шпильками Ø 4 мм	 4,60 4,90 6,00	 выскальзывание по гладкому муфтовому соединению –″– –″–

Испытания соединений типа «ёрш» выполнялись на образцах из труб 90х10 с приваренными патрубками из полиэтиленовых труб 110х18, предназначенных под захваты разрывной машины. Результаты испытаний приведены в табл. 6.13.

Таблица 6.13 - Результаты испытаний соединения фильтров типа «ёрш»

№ обр.	Ниппель				Муфта		Усилие запрессовки, кН	Усилие разрыва, кН	Примечание
	диаметр первого витка, мм		диаметр последнего витка, мм		диаметр первого витка, мм				
1	81,6	81,8	90,2	90,6	84,8	84,6	14,0	20,0	Выскальзывание ерша
2	81,2	81,1	90,2	90,2	85,2	85,1	9,0	34,0	обрыв по муфте
3	82,0	81,5	90,3	91,2	84,5	84,6	14,0	37,5	–″–
4	81,0	81,2	90,0	90,3	85,7	84,8	7,8	17,0	обрыв по сварке
5	81,3	81,2	89,6	89,8	84,5	84,8	14,8	35,2	обрыв по муфте

Анализ данных таблиц показывает, что каркасы фильтров из полиэтиленовых труб диаметром 90 мм с толщиною стенки 10 мм

удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним условиями сооружения горизонтальных скважин. Наиболее рациональным соединением отдельных секций фильтров в единую колонну является резьбовое. Применение шпилек ощутимого повышения прочности соединений не даёт, они могут быть использованы лишь как стопоры против отворота секций по резьбовым соединениям.

На основании проведенных исследований для горизонтальных дренажных скважин в ВИОГЕМе использовались 4 типоразмера фильтров с каркасами из полиэтилена низкого давления и фильтрующих элементов из полиэтилена высокого давления, наносимых на каркас методом пневмоэкструзии.

Технические данные на разработанные фильтры приведены в таблице 6.14.

Конструкция скважинного фильтра защищена патентом [281].

Таблица 6.14 - Таблица технических характеристик фильтров для горизонтальных скважин

Наружный диаметр фильтра *D*, мм	Внутренний диаметр фильтра *d*, мм	Длина *L*, мм	Каркас	Скважность каркаса %	Соединение фильтров	Условное обозначение фильтра
1	2	3	4	5	6	7
42	24,8	2000	ПЭ80 SDR9-32х3,6 ГОСТ 18599-83	7,0	Сварка	ФПЛД-42
75	51,4	1025	ПЭ80 SDR11-63х5,8 ГОСТ 18599-83	4,0	Резьбовое с муфтой. Резьба М62х3. Муфта: труба ПЭ 80 SDR 9-75х8,4	ФПЛД-75
105	69,8	2000	ПЭ80 SDR9-90х10,1 ГОСТ 18599-83	13,0	Резьбовое. Резьба М 80х4	ФПЛД-105

Продолжение табл.6.14

1	2	3	4	5	6	7
136	110,8	1400	ПЭ80 SDR17,6-125х7,1 ГОСТ 18599-83	13,0	Резьбовое. Резьба МК 119х4	ФПЛД-136

Такими фильтрами оборудован ряд лучевых дренажей в России, Украине, используемых для водопонижения на промплощадке и защиты подземных сооружений от подтопления грунтовыми водами.

Фильтры были установлены в скважинах, пробуренных в песках мелко- и тонкозернистого состава, в суглинках и лессовых отложениях. Скважины работают устойчиво, явлений выноса песка не отмечено. Хорошие результаты были получены также при использовании стеклопластиковых фильтров [51].

Выбор других конструкций фильтров детально рассмотрен в разделе 5.4

ГЛАВА 11

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ОБВОДНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

11.1. Цифровые технологии

Месторождения твёрдых полезных ископаемых характеризуются самыми разными природными условиями и в их обводнении участвуют как подземные, так и поверхностные воды. Практика оценки степени обводнённости и разработки мероприятий по защите горных работ от отрицательного влияния водных потоков развивалась от использования аналитических методов теории движения флюидов в горных породах, физического моделирования в фильтрационных лотках, аналогового моделирования на гидроинтеграторах и электроинтеграторах до цифровых технологий на основе специального программного обеспечения для ЭВМ и компьютерной техники.

Фильтрационными расчётами решаются две основные задачи:

-оценка обводнённости горных выработок и прогноз её изменения при ведении горных работ, влияние разработки месторождения на качественные и количественные показатели водных ресурсов;

- разработка структуры систем осушения и технологии защиты от обводнения горных выработок, объектов инфраструктуры.

Решение этих задач начиналось с использования аппарата высшей математики для описания фильтрации подземных вод в трещиноватой и пористой среде. Аналитические методы основаны на приведении реальной физической картины природной обстановки к условной схеме, позволяющей найти решение дифференциальных уравнений, описывающих фильтрацию подземных вод и массоперенос, и получить более или менее простые формулы для выполнения требуемых расчётов. Аналитические методы детально рассмотрены в многочисленных трудах [297-303]. Применительно к системам осушения наиболее полно аналитические зависимости представлены в Справочнике по осушению горных пород под редакцией И.К. Станченко [50]. В качестве примера приведём формулу Тейса, по которой, используя принцип суперпозиции фильтрационных течений, можно рассчитать понижение уровня подземных вод для группы любым образом расположенных взаимодействующих дренажных скважин:

$$S_i = -\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{4\pi\kappa m} Ei\left(-\frac{r_i^2}{4at}\right), \qquad (11.1)$$

где S_i - суммарное результирующее понижение напора (уровня) в i-той точке пласта, м;

Q_i – расход i-той скважины, м^3/сут;

r_i - расстояние от рассматриваемой точки до i-той скважины (i=1,2,3… n), м;

n – общее число скважин;

$Ei(-\frac{r^2}{4at})$ - интегральная показательная функция.

Более сложные варианты расчётов по аналитическим зависимостям приведены в вышеуказанных работах.

Для задач по оценке изменения качественного состава подземных вод использовались аналитические решения, полученные в трудах Н.Н. Веригина Ф.М. Бочевера, А.Е. Орадовской, В.А. Мироненко [304-308].

Физическое моделирование основывалось на использовании фильтрационных лотков, в которых в реальных пористых или трещиноватых породах создавался поток подземных вод и оценивалось его перераспределение при введении возмущающих конструктивных элементов дренажных устройств. Наиболее сложно решаемой проблемой при физическом моделировании был учёт принципов физического правдоподобия (критериев подобия) (рис. 11. 1).

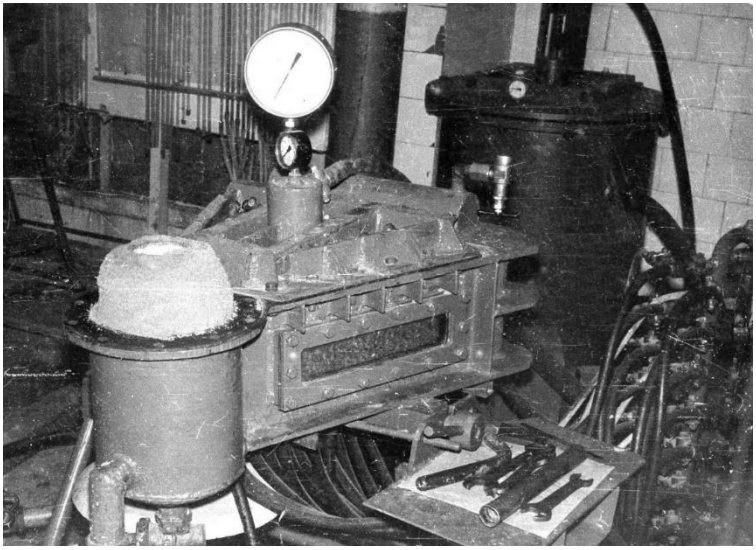


Рис. 11.1. Фильтрационный лоток для моделирования осесимметричного потока к скважине

При аналоговом моделировании использовались гидро- и электроинтеграторы [309, 310]. Гидравлический интегратор Лукьянова В.С. состоял из блоков с системой стеклянных трубочек с изменяющимся сопротивлением. Поток воды, протекающий через эту систему, позволял получить модель фильтрации подземных вод при заданных природных и

техногенных условиях разработки месторождения твёрдых полезных ископаемых. В институте ВИОГЕМ гидроинтегратор Лукьянова применялся при расчётах до конца 70-х годов прошлого столетия (рис. 11. 2).

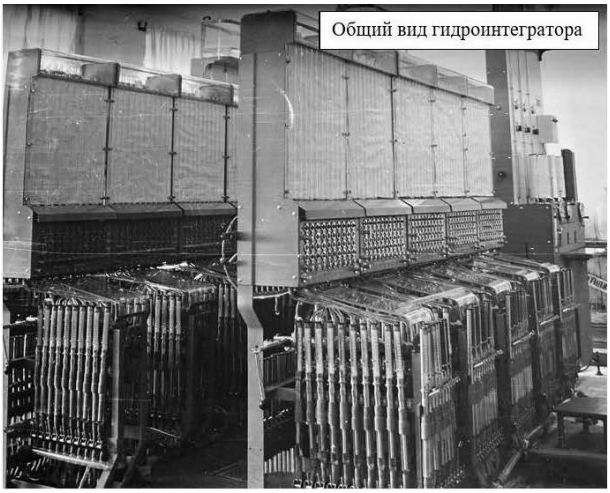


Рис. 11.2. Гидроинтегратор Лукьянова

Расчёты на электроинтеграторах основаны на аналогии математического описания движения электрического тока в проводниках и

фильтрации подземных вод в пористо-трещиноватой среде. Метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) разработан академиком Павловским Н.Н. и был реализован на практике одноимённым устройством – ЭГДА. На интеграторе ЭГДА решались плоские задачи с использованием электропроводной бумаги различного омического сопротивления. В институте ВИОГЕМ впервые в мировой практике была создана на электропроводной бумаге постоянно действующая модель (ПДМ) фильтрации подземных вод в Старооскольско-Губкинском железорудном регионе. На модели был реализован альб-сеноманский водоносный горизонт, железорудные карьеры, хвостохранилища, поверхностные водотоки и водоёмы (рис. 11.3).

Рис. 11.3. ПДМ на электропроводной бумаге

Более сложные модели, на которых реализовывалась планово-пространственная фильтрация подземных вод, создавались на электроинтеграторе БУСЭ-70. Моделирование на БУСЭ-70 было основано на наборе сеток омических сопротивлений, располагаемых, например, в два этажа, соединённых между собой по вертикали. Такая модель была создана в ВИОГЕМе для прогноза деформаций водоносного комплекса и дневной поверхности при работе системы осушения на Яковлевском подземном руднике [311].

Дальнейшее развитие аналогового моделирования на основе электрогидродинамических аналогий для целей защиты от отрицательного воздействия подземных вод на добычу твёрдых полезных ископаемых связано с использованием аналоговой вычислительной машины УСМ - 1. Методика моделирования на УСМ-1 позволяла эффективно задавать однородные по фильтрационным свойствам водоносные пласты, дополнять их неоднородностями, изменять при необходимости краевые условия, что влияло на надёжность результатов решаемых задач. На УСМ-1 были выполнены модели многих объектов, в том числе предприятий по добыче урана (рис. 11.4, 11.5).

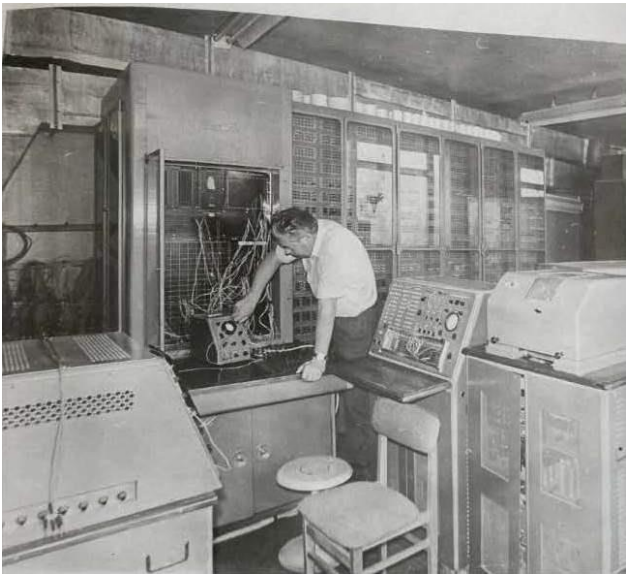


Рис. 11.4. Аналоговая машина УСМ-1

Важным шагом в развитии моделирования фильтрационных потоков подземных вод явилось внедрение в практику научно-исследовательских и проектных работ численных методов [312, 313]. Основоположником этого направления в ВИОГЕМе был к.ф.-м.н. Васильев В.А. [314]. Численные методы основаны на применении цифровых технологий, когда отсутствуют аналогии между различными физическими процессами, позволяющими переносить природную среду в лабораторные условия. Численные методы предполагают дискретизацию на интервалы пространства, в данном случае в пределах природной и техногенной среды на месторождении полезных ископаемых и времени на период освоения, разработки месторождения,

ликвидации горного производства и оценки процессов восстановления геологической среды.

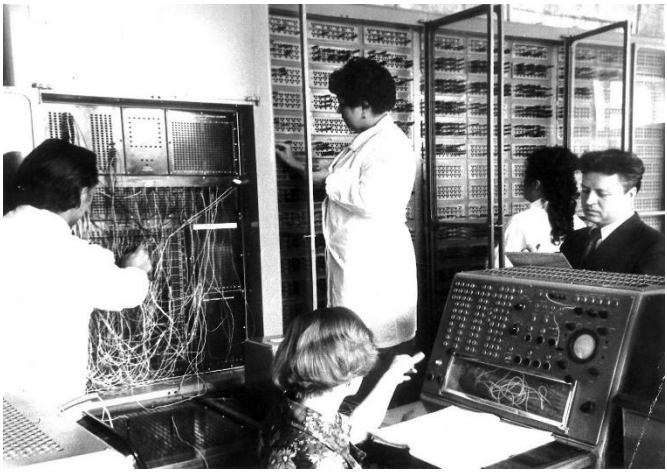


Рис. 11.5. Создание модели фильтрации подземных вод на УСМ-1

Уравнение фильтрации подземных вод, в том или ином виде (установившееся или нестационарное движение, плановая, планово-пространственная или пространственная фильтрация) записанное в частных производных (11.2), представляется при использовании численных методов системой конечно-разностных уравнений в дискретном пространстве и времени [315].

$$\frac{\partial}{\partial x}(Kx\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(Ky\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(Kz\frac{\partial h}{\partial z})\pm W=\eta\frac{\partial h}{\partial t}, \qquad (11.2)$$

где *Kx, Ky, Kz* - коэффициенты фильтрации пород по координатным осям *x, y, z*, м/сут;

h - уровень (или напор) подземных вод, м;

W - расход, приведенный к единице объёма и представляющий внешние источники поступления или отбора воды, 1/сут;

η - коэффициент упругоёмкости породы, 1/м;

t - время, сут.

Для планового потока при дискретизации пространства на интервалы Δx, Δy и времени на промежутки продолжительностью Δt система конечно-разностных уравнений, построенная по схеме метода переменных направлений, может быть записана в виде:

$$GX_{i,j-1}H^{k+½}_{i,j-1} - GX0_{i,j}H^{k+½}_{i,j} + GX_{i,j}H^{k+½}_{i,j+1} = -FX^{k}_{i,j},$$

$$GY_{i-1,j}H^{k+1}_{i-1,j} - GY0_{i,j}H^{k+1}_{i,j} + GY_{i,j}H^{k+1}_{i+1,j} = -FY^{k}_{i,j},$$

где $GX_{i,j} = \dfrac{0.5(y_{i+1} - y_{i-1})}{x_{j+1} - x_j} T_{x\,i,j+½}$, $\qquad GY_{i,j} = \dfrac{0.5(x_{j+1} - x_{j-1})}{y_{i+1} - y_i} T_{y\,i+½,j}$,

$$FX^{k}_{ij} = GY_{i,j}(H^{k}_{i+1,j} - H^{k}_{i,j}) + GY_{i-1,j}(H^{k}_{i-1,j} - H^{k}_{i,j}) + V_{i,j}H^{k}_{i,j} + W_{i,j},$$

$$FY^{k+½}_{ij} = GX_{i,j}(H^{k+½}_{i,j+1} - H^{k+½}_{i,j}) + GX_{i,j-1}(H^{k+½}_{i,j-1} - H^{k+½}_{i,j}) + V_{i,j}H^{k+½}_{i,j} + W_{i,j},$$

$$GX0_{i,j} = GX_{i,j-1} + GX_{i,j} + V_{i,j}, \qquad GY0_{i,j} = GY_{i-1,j} + GY_{i,j} + V_{i,j},$$

$$V_{i,j} = {2\mu^{*}_{i,j}S_{i,j}} \Big/ {\Delta t_k}, \quad W_{i,j} = w_{i,j} * S_{i,j}, \quad T = km, \qquad (11.3)$$

где $T_{xi,j+1/2}$ и $T_{yi+1/2,i}$ - средние значения водопроводимости T между соседними блоками в направлении осей X и Y, м^2/сут;

$S_{i,j}$ - площадь блока с координатами (i, j), м^2;

k - номер шага по времени.

Уравнение фильтрации подземных вод (11.2) является параболическим. Для его решения должны быть заданы как начальные условия по всей области моделирования, так и граничные условия на внутренних и внешних границах. Это же относится и к системе уравнений в дискретном пространстве и времени.

Начальные условия включают распределение известных напоров или уровней подземных вод по всей модели при времени t_o, с которого предполагается начать моделирование.

Граничные условия отображают физические явления по внешнему контуру модели и внутри её, обусловленные природными и техногенными процессами. Исследователь при создании модели для моделирования фильтрации, как правило, обрабатывает и использует несколько возможных типов граничных условий, которые применимы к любой части моделируемой области [315-317]. Укажем на 4 типа, 3 из которых применяются наиболее часто:

- граничные условия первого рода (тип Дирихле) задают величину напора. В моделируемой области должна быть, по крайней мере, одна точка, которая составляет границу первого рода. Это необходимо для гарантии однозначности решения. В отдельных случаях его можно задавать как постоянную величину, на дренажных устройствах граничные условия первого рода могут реализовываться, используя данные об уровнях подземных вод;

- граничные условия второго рода (Нейманского типа) определяют граничный расход, означающий градиент напора, перпендикулярный границе. Специальным случаем граничных условий такого типа является водонепроницаемая граница, где расход потока равен нулю. Если границу образуют линии тока в моделируемой области, то граница считается водонепроницаемой. Скважины, дрены могут рассматриваться как внутренние границы второго рода, с заданием расхода;

- граничные условия третьего рода (полупроницаемая граница, смешанные граничные условия) определяют линейное соотношение напора и расхода на границе. Граничные условия третьего рода используют на полупроницаемых границах, при задании дрен, горных выработок, поверхностных водоёмов и водотоков;

- граничные условия четвёртого рода определяют равенство расходов потока до и после границы раздела обводнённых пород с разными фильтрационными свойствами.

Дискретизация пространства, времени и преобразование уравнения фильтрации численными методами развивались по трём направлениям:

- использование математической теории на основе конечных разностей;
- использование математической теории на основе конечных элементов;
- использование математической теории на основе конечных объёмов.

По методу конечных разностей (МКР) системой алгебраических уравнений представляются частные производные дифференциального уравнения 11.2, регион моделирования, включающий природную и техногенную обстановку на месторождении твёрдых полезных ископаемых и область развития водоносных горизонтов, разбивается ортогональной сеткой в плане на ячейки с одинаковой или изменяющейся величиной Δx и Δy. Параметры и характеристики природных условий и техногенных объектов учитываются на модели тем точнее, чем меньше будут Δx и Δy. В плане центр каждой ячейки считается узлом. По вертикали каждая ячейка является верхним основанием параллелепипеда, который уходит вглубь на всю моделируемую мощность. При постоянных величинах Δx и Δy разбивка будет равномерной, в противном случае получим ячейки с изменяющимся размером, или неравномерную сетку.

Дискретизация времени осуществляется на временные отрезки t_0, t_1, t_2..., с интервалом Δt.

Решение дискретных алгебраических уравнений фильтрации численным методом означает, что, начиная с начального распределения напора в дискретных узлах моделируемой области при времени t_0, рассчитываются напоры в этих узлах для более поздних значений времени t_1, t_2... при шагах Δt. Основной подход в решении заключается в использовании законов неразрывности и Дарси для узловых точек и получении системы

уравнений для расчёта напоров в этих точках в заданные интервалы времени при условии, что напоры известны в начале этого временного интервала [315].

Полученные системы уравнений типа приведенных выше (11.3) можно решать по двум схемам: явной и неявной. При явной схеме напоры рассчитываются для всех узлов сетки, начиная с начального времени t_0, на которое известно распределение напоров в моделируемой области. В этой схеме особые требования предъявляются к заданию величины Δt. При большом значении интервала времени Δt модель становится неустойчивой и получаемые решения далеки от реальных. Для гарантии устойчивости следует брать такую схему, чтобы она удовлетворяла критерию устойчивости в каждом узле

$$\frac{T}{\mu^*}\left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2}+\frac{\Delta t}{\Delta y^2}\right)\le\frac{1}{2}\quad , \qquad (11.4)$$

где T- водопроводимость м^2/сут;

μ^*-коэффициент упругой ёмкости пласта.

К сожалению, это условие очень часто приводит к нереально малым значениям Δt для приемлемых величин Δx и Δy, особенно в региональных моделях с неравномерной дискретизацией пространства. Моделирование с прогнозом на несколько лет с небольшим временным шагом является довольно длительной процедурой, не говоря уже об ошибках округления.

При неявной схеме решение системы уравнений начинается с выбора времени, равного $t=t+\Delta t$, в таком случае система уравнений отражает напоры в неявном виде. Методы решения таких систем подробно изложены в работе [315]. Они основаны на алгоритме Гаусса-Джордана, итерационных методах (например, Джейкоба, Гаусса-Зейделя, метод переменных направлений IADI). Для обеспечения сходимости решения при использовании некоторых итерационных методов вводится коэффициент релаксации. Рекомендуемое значение его изменяется в пределах 1-2. Неявные схемы являются устойчивыми при решении тех или иных задач на модели. Для стационарных потоков подземных вод неявные схемы являются основными. С помощью метода конечных разностей пьезометрические напоры описываются только в узлах, представляющих усреднённые условия для всей ячейки.

Метод конечных разностей активно модернизируется и широко применяется для решения различных задач на горнодобывающих предприятиях. Он не сложен для программирования и позволяет учесть на моделях с приемлемой степенью точности как природную, так и техногенную обстановку на горном предприятии. Некоторые сложности, присущие этому методу, заключаются в поиске вариантов адекватного задания граничных условий, построения неравномерной сетки, учитывающей структуры

моделируемых сооружений, неадекватность в представлении концепций с тензорами, т.е. тензорной водопроводимости в случае, когда главные направления не совпадают с осями координат.

Метод конечных элементов (МКЭ) основан на приближении функции и без затруднений обеспечивает решение вышеназванных недостатков МКР. Пространственная дискретизация по методу конечных элементов осуществляется в основном на элементы в виде треугольных призм. Граничные узлы всегда совпадают с фактической физической внешней границей модели на всём её протяжении, внутренние границы легко привязываются к моделируемым объектам, например, к системам осушения.

В методе конечных элементов пьезометрический напор определяется в каждой точке элемента (x, y) посредством функции интерполяции. В простейшем случае распределение фактического пьезометрического напора h(x, y) в каждом треугольнике аппроксимируется линейной функцией. Неизвестные величины напора вычисляются в узлах и в общем представляют собой сглаженную поверхность согласно уравнению фильтрации и одновременно являются приближенными значениями, насколько это возможно при конкретной интерполирующей функции. Данный метод позволяет рассчитать напор в любой точке моделируемой области.

Дискретизация по времени осуществляется одинаково с методом конечных разностей, но не имеет ограничений, присущих МКР.

Решение в методе конечных элементов находят с помощью системы уравнений для каждого узла на каждом шаге времени (t, t+Δt) [315]. Имеется два способа получения системы уравнений. Первый способ основан на теории неразрывности потока и закона Дарси, применимого к одному элементу. В этом случае для расчёта напоров в каждой точке модели используется линейная аппроксимирующая функция.

Второй, более мощный способ, основывается на методе Галёркина. Преимуществом метода Галёркина является его общность. Можно использовать его для элементов произвольной формы и с произвольными функциями интерполяции. Интегралы по элементам рассчитываются численным путём по методике Гаусса.

Метод конечных элементов применим для моделирования пространственной (трёхмерной) фильтрации подземных вод.

Метод конечных объёмов (МКО) является самым гибким и получающим развитие для решения задач подземной гидродинамики в последнее время. МКО позволяет дискретизировать пространство на ортогональные и криволинейные элементы, а также на многоугольники более высокого порядка с равномерной и неравномерной сеткой. Этот метод основан на использовании интегральной формулировки законов фильтрации с дискретизацией по граням выделенного объёма характеристик

фильтрационного потока, вычисленных в том числе по квадратурным формулам. Судя по всему, метод конечных объёмов в связи с развитием моделирования фильтрации подземных вод в перспективе займёт ведущие позиции для решения задач на горных предприятиях. Метод конечных объёмов окажется весьма эффективным при разработке моделей фильтрации подземных вод в трещиноватых горных массивах, при наличии зон незалеченных тектонических нарушений, участков повышенной естественной и технологической трещиноватости, развития карста, при отработке полезного ископаемого системами с обрушением руды и вмещающих пород, учёте на моделях поверхностных дрен. Очевидно, этот метод найдёт применение для моделирования потоков подземных и речных вод в условиях многолетнемёрзлых пород.

Согласно МКО пространственная дискретизация моделируемой области осуществляется путём разбиения её на небольшие соприкасающиеся объёмы, для каждого из которых записывается балансовое уравнение. Внутри каждого объёма находится одна (и только одна) точка «привязки» искомого сеточного решения. В большинстве разработок, ориентированных на решение трёхмерных задач для областей сложной геометрии, в качестве объёма используются ячейки расчётной сетки: узлы сетки располагаются в вершинах многогранника (для структурированных сеток–гексаэдра), сеточные линии идут вдоль его рёбер, а значения искомых величин приписываются геометрическому центру ячейки (рис. 11.6). Данный метод обеспечивает консервативность численной модели с точным вычислением балансовых составляющих для всей области моделирования [318].

В институте ВИОГЕМ на основе численных методов были разработаны алгоритмы и программы серии PF и FINFIL для ЭВМ ЕС 1022 и 1033. Программы PF позволяли моделировать плановую фильтрацию подземных вод на основе конечных разностей. FINFIL была создана для разработки моделей планово-пространственной фильтрации с использованием метода конечных элементов. На базе этой программы была создана постоянно действующая модель Старооскольско-Губкинского железорудного региона, на которой оценивались варианты эксплуатации систем осушения Лебединского и Стойленского карьеров, а также шахты им. Губкина и месторождений, перспективных к отработке. Модель позволяла решать технологические задачи и выдавать прогнозы по проблеме охраны водных ресурсов региона. Она учитывала в том числе перетоки через слабопроницаемые породы в основной, обводняющий горные выработки, водоносный горизонт [319-321].

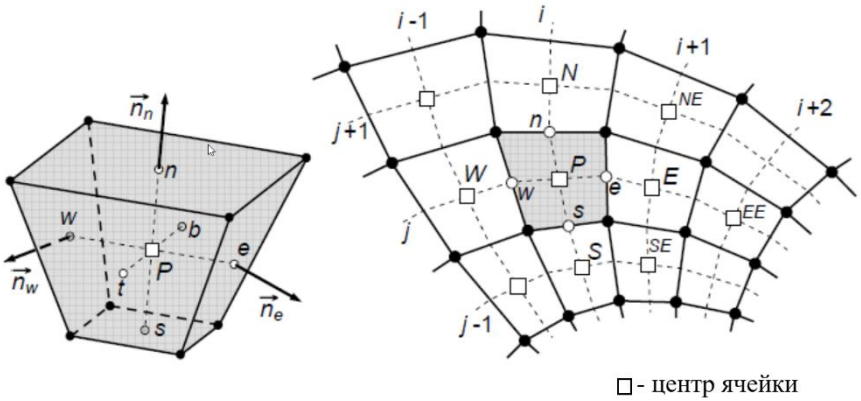


Рис. 11.6. Структурированная сетка контрольных объёмов с переменными в центрах ячеек

В дальнейшем при переходе института с ЭВМ ЕС на компьютерную технику возможности модернизировать собственное программное обеспечение не было.

Участие специалистов лаборатории фильтрационных расчётов в международных грантах позволило приобрести первую версию программного комплекса GMS, созданного учёными Брикхемского университета, штат Юта, США. Накопленный опыт в разработке моделей на фильтрационных лотках, аналоговых устройствах и использовании численных методов способствовал быстрому освоению GMS сотрудниками лаборатории. В настоящее время в постоянной работе находятся три программных комплекса GMS версии 10.3. Рассмотрим более детально возможности этого программного комплекса [322-324].

GMS постоянно развивалась и совершенствовалась. Разработчики поставили и успешно решали постепенно, на наш взгляд, 2 основные задачи. Во-первых - программный комплекс должен охватывать весь набор профессиональных проблем, требуемых практикой использования, сохранения, воспроизводства и охраны водных ресурсов на земном шаре и разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых. Во-вторых – применить в программном комплексе все наработки и достижения математических теорий для наиболее правдоподобного отражения в моделях сущности фильтрации и массопереноса подземных вод с учётом взаимодействия различных физических, химических и биологических процессов в земной коре. В результате протекания этих процессов исследователь всегда имеет дело с весьма неоднородным по своим

показателям и параметрам природным объектом с дополнительно наложенными особенностями, технологией и техническими средствами вскрытия и разработки твёрдого полезного ископаемого. Исходная информация по этому объекту, используемая для создания модели фильтрации и массопереноса подземных вод, уже сама по себе является дискретной, и любая созданная модель в таких условиях характеризует неполнозаданное пространство. В GMS постепенно наращивался математический аппарат для учёта неопределённостей при задании исходной геологической, гидрогеологической, гидрохимической, и технологической информации, а также для оценки чувствительности модели к тому или иному сочетанию параметров, характеризующих фильтрацию и массоперенос подземных вод. Создавались алгоритмы и программы для реализации этого математического аппарата.

В используемых специалистами ВИОГЕМ версиях GMS поддерживается около четырнадцати модулей, разработан мощный интерфейс для работы с ними. Каждый модуль нацелен на необходимый объём для создания модели исходной информации, что отражается в привязанном к нему интерфейсу. Интерфейс содержит инструменты и меню утилит, требуемых при разработке моделей и визуализации полученных результатов.

Версия GMS, имеющаяся в институте, поддерживает следующие модули для моделирования: **MODFLOW**, **MODFLOW-USG**, **MODFLOW-LGR**, **MODPATH**, **MT3DMS**, **PHT3D**, **SEAWAT**, **RT3D**, **SEAM3D**, **MODAEM**, **UTEXAS**, **SEEP2D**, **FEMWATER** и **FEFLOW**.

Специалисты ОАО «ВИОГЕМ» могут использовать в настоящее время все модули, кроме 4-х: **SEAM3D**, **MODAEM**, **UTEXAS** и **FEFLOW**. Накопленный более чем 20-тилетний опыт разработки моделей с использованием разных версий GMS позволил сформировать несколько алгоритмов, предпочтительных для создания моделей при решении задач по защите от обводнения горных выработок при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых и массопереносу в подземных водах. Последовательность операций может быть следующей.

В блоке информации, используемой при разработке той или иной модели, на первом этапе исследователь обязан перейти от изучения описательного представления геологической среды к её объёмному, на основе цифровых технологий, изображению на компьютере. Используя различные вариации инструментов модуля GMS, Stratigraphy Modeling, по имеющимся фактическим геолого-техническим разрезам буровых скважин, строится как решётчатая в виде разрезов, послойная, показывающая расположение конкретного слоя, так и объёмная геологическая модели. Операции по разработке геологической модели могут выполняться как вручную, так и автоматически, используя технологию концептуальной модели. Программа

GMS предоставляет возможность применять векторные и растровые изображения для создания геологических моделей. Геологические модели предназначены для разработки плановых, планово-пространственных и пространственных фильтрационных моделей на основе методов конечных разностей, конечных элементов и конечных объёмов путём импорта в соответствующие модули. Наличие твёрдотельной геологической модели обязывает исследователя глубже вникать в физическое правдоподобие результатов, получаемых в дальнейшем на фильтрационной модели.

В практике защиты от отрицательного влияния подземных вод как объектов горных предприятий, так и селитебных территорий, особенно застроенных, возникает необходимость построения моделей на небольшую глубину (20-50 м). На таких глубинах обычно залегают четвертичные и неоген-палеогеновые отложения, которые характеризуются резкой изменчивостью фациального состава. Фациальная изменчивость сопровождается весьма сильными флуктуациями мощности пластов и протяжённостью их по простиранию, распространением прослоев и линз. В таких условиях использование детерминированных методик построения геологических моделей требует наличия детальной исходной информации о структуре и литологическом составе горных пород. При отсутствии требуемого объёма этой информации предпочтительнее применять вероятностные методы. GMS предоставляет такую возможность. В программе имеется интерфейс T-PROGS, который в совокупности с другими модулями обеспечивает создание вероятностной геологической модели объекта исследований. T-PROGS основан на математической теории применения цепей Маркова, позволяющих на основе информации, полученной после бурения скважин с учётом закона Вальтера о смене фаций, оценивать вероятностную литологическую и фациальную изменчивость в пространстве слоёв, прослоев и линз геологического строения объекта моделирования. В ячейках модели, в которые попадают буровые скважины, сохраняется фактическая стратиграфия, в других ячейках реализуется вероятностная стратиграфия, рассчитанная с помощью цепей Маркова. Методика T-PROGS разработана для трёхмерной (многослойной) и однослойной модели с пространственной разбивкой ортогональной равномерной и неравномерной сеткой. По созданной вероятностной геологической модели формируется в T-PROGS один или несколько пакетов исходной информации, которые импортируются в соответствующие стохастические модули для разработки моделей фильтрации подземных вод.

На следующем шаге необходимо уделить внимание и выполнить анализ и обработку исходной информации, требуемой для постановки разрабатываемой модели фильтрации подземных вод. Модули GIS и Geostatistics позволяют выполнить операции по изучению и предварительной

оценке достоверности и соответствию имеющихся данных о гидродинамических показателях водоносных горизонтов геолого-тектоническому строению изучаемого региона. Исследователь обязан сопоставить свои знания, интуицию и опыт с предлагаемой формальной математической обработкой результатов полевых работ. Модуль GIS может использоваться также для обработки исходных данных по расположению устьев скважин для создания точек их заложения, выделения контуров отдельных объектов и затем импортирования в модуль разработки модели (например, создания набора данных начального напора подземных вод). Для изучения общей ситуации на исследуемой территории GIS модуль обеспечивает работу с космоснимками из интернета. Особенно эффективно использование растра для создания цифровых 2D моделей поверхности исследуемого участка местности. В дальнейшем растровые изображения могут быть преобразованы в точки в 2-х мерном пространстве или сетку, возможна также обратная манипуляция. Растровая информация может автоматически передаваться в виде массивов данных в другие модули GMS.

Модуль Geostatistics реализован в 2-х вариантах, позволяющих соответственно работать в 2-х и 3-х мерном пространстве. Оба варианта используют наборы точек или создаваемых, или импортируемых из существующих файлов. Каждой точке в наборе присваиваются конкретные значения исследуемой информации (отметок границ пласта, значений уровня воды, концентрации растворённого вещества и т. д.). Наборы точек, создаваемые непосредственно в модуле Geostatistics, с присвоенными значениями используются для характеристики стационарного состояния. Для неустановившегося движения наборы точек с информацией, изменяющейся во времени, следует импортировать из созданных соответствующих файлов. Информация, присущая точкам, обрабатывается на созданной сетке с применением методов интерполяции. GMS поддерживает несколько методов: линейная интерполяция, интерполяция IDW (обратных взвешенных расстояний), естественная соседняя интерполяция и кригинг. Имеются опции учёта анизотропии и отсечения, позволяющие учесть физические предпосылки изменения исследуемого показателя в горизонтальном или вертикальном направлениях и, тем самым, повысить точность интерполяции.

Овладев всеми вышерассмотренными модулями, исследователь вынужден перешагнуть грань, отделяющую утилитарную кропотливую работу по изучению и обработке исходной информации от искусства создания моделей на основе искусственного интеллекта, зажатого в рамки программного обеспечения.

Для более детального представления методики разработки

геофильтрационных и геомиграционных моделей подземных вод в разных модулях GMS, кроме вышеуказанных источников информации, изучались также статьи зарубежных авторов, имеющиеся в открытом доступе [325-333].

Одной из наиболее часто используемых программ для создания фильтрационных моделей является ПО серии MODFLOW (**MODFLOW**, **MODFLOW-NWT**, **MODFLOW-LGR**). Основа этого ПО - метод конечных разностей с дискретизацией пространства ортогональной сеткой и времени на промежутки Δt и соответствующим представлением дифференциальных уравнений, описывающих плановую и планово-пространственную фильтрацию подземных вод. Для построения модели могут использоваться 2 методики. Первая методика – Способ сетки, вторая – Способ концептуальной модели.

По первой методике в модуле MODFLOW выполняется дискретизация пространства для создания трёхмерной конечно-разностной сетки, выделения активных и неактивных ячеек. Для ячеек формируются пакеты исходной информации: краевых условий (начальных и граничных), отметок кровли и подошвы пластов, вертикальной и горизонтальной водопроводимости, водоотдачи, анизотропии, инфильтрации, расположения и необходимых показателей для горных выработок, системы осушения, поверхностных водоёмов и водотоков, подземных и наземных коммуникаций и других объектов горного предприятия. После ввода исходной информации проверяют модель, воспользовавшись имеющейся командой в GMS. Выясняют допущенные неточности и несовместимые комбинации показателей и параметров, на этой стадии устраняют выявленные ошибки.

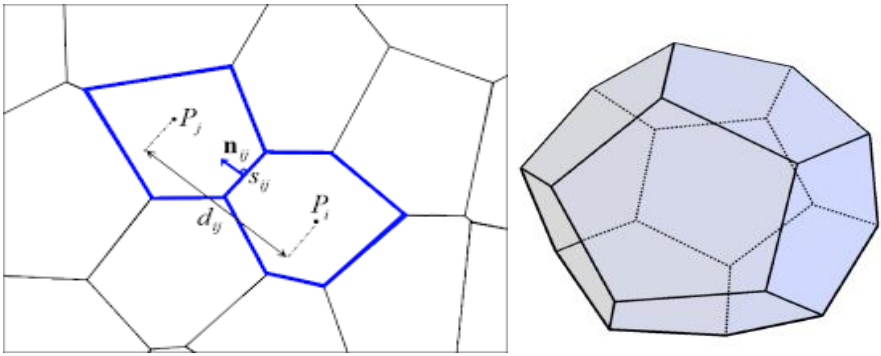
Способ концептуальной модели является предпочтительным для сложных объектов, каковыми практически всегда будут горные предприятия. Методика создания концептуальной модели предполагает создание геометрической модели исследуемой территории без привязки к сетке моделирования. Используя инструменты модуля MAP, осуществляется дискретизация моделируемой территории на элементы в виде характерных точек, дуг, контуров, полигонов. Выделенным элементам присваиваются соответствующие значения краевых условий, инфильтрации, коэффициентов фильтрации, отметок слоёв и других показателей, требуемых для моделирования. Затем автоматически осуществляют дискретизацию области моделирования на ортогональные элементы, инициализируют ПО MODFLOW и выделяют активные и неактивные ячейки. На следующем шаге интерполируют отметки начальных условий, кровли и подошвы слоёв, проверяют и при необходимости корректируют созданную информационную основу модели. Конвертируют концептуальную (геометрическую) модель автоматически в конечно-разностную цифровую модель MODFLOW.

ПО MODFLOW имеет модули, позволяющие использовать вложенные

сетки с более мелкими ячейками для дискретизации пространства вблизи объектов, интересующих исследователя. Разработаны компоненты, учитывающие осушение и повторное обводнение ячеек.

Модуль MODFLOW стохастического моделирования позволяет создавать модели и выполнять моделирование при вероятностном распределении исходной информации. Данный модуль поддерживает три метода стохастического моделирования: рандомизацию параметров (формирование случайной выборки по исходной информации), индикаторное моделирование (T-PROGS, когда формируются несколько равновероятных наборов исходной информации) и Монте-Карло (использование генератора случайных величин или латинского гиперкуба). Модуль предоставляет возможности анализа рисков результатов моделирования.

Для использования метода на основе конечных объёмов разработан модуль MODFLOW-USG. Модуль предполагает дискретизацию пространства ортогональными равномерными и неравномерными ячейками, треугольными ячейками и используя разбиение Вороного. Дискретизация сеткой Вороного имеет совершенно другой тип ячейки. Ячейки создаются таким образом, что информация задаётся в центре ячейки, а грани между соседними ячейками перпендикулярны линии, соединяющей центры ячеек [334, 335] (рис.11.7).



а б

Рис. 11.7. Дискретизация пространства сеткой Вороного:
а- 2-х мерная; б - 3-х мерная.

Разбивка Вороного увеличивает точность вычислений при использовании метода конечных объёмов. В MODFLOW-USG применяется несколько иной математический аппарат для учёта нелинейностей и множественных симметричных и асимметричных линейных схем для решения матрицы, возникающей из уравнений фильтрационного потока.

Математический аппарат в MODFLOW-USG рассчитан, в том числе, на неструктурированные сетки с неструктурированным матричным хранилищем и схемами решений. Разработаны опции создания и применения при моделировании фильтрации трёхмерных геологических моделей с выклинивающимися, линзообразными слоями и тектоническими нарушениями.

В целом интерфейс GMS в модулях MODFLOW и MODFLOW-USG содержит 50 отдельных самостоятельных компонентов, обеспечивающих разработку моделей фильтрации подземных вод в различных природных условиях для решения тех или иных технологических и экологических проблем.

Уделим несколько больше нашего внимания и времени рассмотрению компонентов, связанных с калибровкой уже созданной модели. Для любой модели перед решением прогнозных и технологических задач необходим процесс калибровки. Калибровку выполняют, чтобы добиться адекватного отображения на модели реальной природной обстановки. Поскольку мы имеем дело с неполнозаданным пространством, то необходимо на этом пространстве выделить наиболее доступные и чувствительные к изменениям показатели, влияющие на результаты моделирования. В большинстве случаев к ним относятся коэффициент фильтрации, параметры анизотропии, водоотдача, инфильтрация, испарение, потери на фильтрацию из водотоков и водоёмов, размеры дуг и полигонов в концептуальной модели. Изменяя эти показатели, с соблюдением принципов правдоподобия и физической сущности осуществляют поиск варианта, при котором полученный результат моделирования с заданной точностью будет соответствовать натурным данным (напору подземных вод или расходу, зафиксированному в дренах).

В GMS имеется не менее 10 компонентов для выполнения калибровки моделей, созданных в MODFLOW. Наиболее простым по методике, но достаточно трудоёмким по исполнению является метод проб и ошибок. Модель по этому методу калибруется путём неоднократного изменения значений исходной информации и выполнения многовариантного моделирования до тех пор, пока вычисленные показатели с заданной степенью точности не приблизятся к фактическим данным, определённым в полевых условиях. Такую методику калибровки целесообразно освоить первой, так как она даёт возможность понять сущность процесса адаптации модели к весьма неоднородной природной обстановке и необходимость глубокого проникновения в разработанную модель.

Несколько более сложными, но весьма приемлемыми и привлекательными являются компоненты для автоматической калибровки модели. В GMS решение этой задачи осуществляется на основе пакета программ PEST. Интерфейс GMS разработан для нескольких вариантов

использования PEST. Во всех вариантах программа PEST основана на решении обратной задачи, то есть полученные на модели результаты сравниваются с фактической информацией на известный момент времени. При решении обратной задачи PEST использует набор входной информации и изменяет её до тех пор, пока разница между вычисленными на модели и фактическими данными не достигнет минимума. Калибровка модели может выполняться или по контрольным точкам, или по выделенным зонам. При использовании выделенных зон количество калибруемых параметров должно быть меньше количества фактических данных. Методика калибровки по контрольным точкам не требует выполнения этого условия: число калибруемых параметров может превышать количество фактических данных. Достигается это за счёт введения 2-х опций регуляризации, требующих информации о параметре в форме уравнений.

Программа PEST определяет чувствительность исходной информации модели к вычисленным результатам. Изменение одних параметров сильно влияет на результаты моделирования, другие параметры оказывают незначительное влияние и, в принципе, могут не учитываться при калибровке. При решении обратных задач основное время тратится на вычисление матрицы Якоби, по которой затем определяется чувствительность и формируется соответствующий файл на каждом прогоне PEST. Для уменьшения количества итераций в PEST имеются опции, подключение которых позволяет не изменять нечувствительные параметры, что ускоряет процесс сходимости модели. PEST выполняет эту процедуру по уникальной среди программного обеспечения методике, основанной на комбинации регуляризации по Тихонову с усечённой регуляризацией, названной «SVD-Assistance». Методика основана на оценке комбинаций параметров, а не параметра самого по себе. Эти комбинации являются наиболее восприимчивыми к имеющейся исходной информации. Объединение сильных сторон двух разных методов регуляризации даёт огромный выигрыш в эффективности процесса калибровки: во многих случаях количество прогонов модели, необходимое для завершения процесса калибровки модели, сокращается от двух до десяти раз [336].

Имеется также компонента, позволяющая одновременно выполнять несколько итераций при калибровке модели.

Интерфейс GMS поддерживает две программы для калибровки модели в нестационарном режиме. Одна программа предполагает применение пакета PEST, вторая основана на адаптацию модели без него. Обе программы могут использовать данные опытно-фильтрационных работ откачки или нагнетания для установления соответствия изменения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах гидродинамическим параметрам водоносного горизонта.

Калибровка модели для стохастического моделирования предполагает решение обратных задач с применением методики индикаторов, программ PEST и T-PROGS. Метод индикаторов предусматривает использование равновероятных различных особенностей строения водоносного горизонта, созданных программой T-PROGS, присвоения массивов свойств и параметров каждому слою и материалу в водоносном пласте с последующим запуском стохастического моделирования для решения обратных задач. Имеется возможность калибровки по контрольным точкам для задания исходной информации при решении обратных задач.

Второй метод при стохастической калибровке модели основан на пакете программ с опцией Null Space Monte Carlo. Метод предполагает использование исходной, разработанной в MODFLOW, модели. В результате её стохастической калибровки получают несколько моделей с разным распределением в пространстве наборов данных, характеризующих их изменчивость в пределах допустимой при калибровке ошибки. На калиброванных моделях выполняется решение прогнозных задач с анализом рисков вычисленных результатов по каждой модели. Более детально с различными приёмами калибровки созданных моделей можно ознакомиться в указанной выше литературе.

Метод конечных элементов реализован в 2-х модулях, поддерживаемых GMS - FEMWATER и SEEP-2D. Модуль FEMWATER предназначен для разработки пространственных моделей, которые описывают фильтрационный поток и массоперенос в насыщенных-ненасыщенных пористых и трещиноватых породах. Пространственная дискретизация, используемая FEMWATER, представляет собой трёхмерную сетку из гексаэдров, призм или тетраэдров. Тетраэдры в задачах фильтрации и массопереноса не рекомендуется применять, чаще всего используется разбивка на треугольные элементы. Построение модели основано на концептуальном подходе. Принципы создания сетки для наилучшей дискретизации пространства учитывают ряд условий. Ячейки меньших размеров располагают на участках наибольшего возмущения потока подземных вод: вблизи дрен, устройств системы осушения, хвостохранилищ и т.д. Соблюдается правило: чтобы соседние элементы по размерам не отличались более чем на 50 %, следует стремиться исключать остроугольные и тупоугольные треугольники. По вертикали необходимо выполнять условие, чтобы водопроводимость соседних слоёв изменялась плавно и не отличалась более чем на один порядок.

Используя модуль FEMWATER, решают задачи установившейся и нестационарной фильтрации подземных вод, разноплотностных потоков, например, подтягивания солёных вод при эксплуатации водозаборов или систем осушения, а также переноса тех или иных растворённых компонентов подземной водой. Следует отметить, модуль FEMWATER требует весьма

корректно задаваемых краевых условий и детальной информации по параметрам, которая на практике не всегда имеется. В противном случае созданная модель требует большого количества итераций и может не сходиться к физически обоснованному результату. Достоинством метода конечных элементов является получение решений с пространственно непрерывными данными, простотой учёта анизотропии и заданием неоднородного строения водоносных горизонтов. В программе реализована возможность использования переменных граничных условий, которые могут изменяться в зависимости от испарения, проводимости среды, инфильтрации и уровня грунтовых вод.

В FEMWATER метод Галеркина применяется для моделирования потоков фильтрации и массопереноса. При массопереносе в модуле также предусмотрена возможность использования двух традиционных методов конечных элементов (Галеркина и взвешивания). Основное различие между этими методами конечных элементов заключается в том, что по методу Галеркина используются базовые функции в качестве весовых, метод предварительного взвешивания использует весовые функции, которые на один порядок (N+1) выше базовых. Преимущества использования метода конечных элементов с предварительным взвешиванием над методом Галеркина становятся очевидными, когда члены адвекции в уравнении массопереноса играют существенную роль наряду с дисперсией.

Модуль FEMWATER является весьма мощным инструментом для разработки моделей пространственной фильтрации и массопереноса. Основные сложности в его применении для решения практических задач на горных предприятиях заключаются в необходимости создания региональных моделей, охватывающих территории до 5000 км^2. Региональные модели во всех случаях страдают от отсутствия необходимого объёма исходной информации, что увеличивает затраты времени на разработку и калибровку модели. Неполнозаданное пространство зачастую приводит к необходимости неоднократного повторения процедуры возврата к построению начальной разбивки его на треугольную сетку и соответствующей корректировки исходной информации, задаваемой на периферийных участках исходя из теории фаций, формаций и справочной литературы. Разработка модели в программе FEMWATER наиболее целесообразна на территориях и объектах, на которых имеется достаточный объём исходной информации применительно к площади моделирования.

Пакет программ SEEP2D на основе метода конечных элементов предназначен в основном для решения профильных задач при стационарном режиме движения подземных вод. Программы разработаны в 2-х вариантах: в одном - рассмотрено создание моделей со свободным зеркалом подземных вод (безнапорный режим), во втором – при условии насыщения водой пласта на

всю его мощность (напорный режим). Реализовано задание на модели анизотропных свойств обводнённых пород, гетерогенных условий в структуре объекта моделирования (наличия шпунтовых стен, ядра в плотинах, дрен, скважин и т.д.), изменения границы между насыщенной и ненасыщенной зонами. Модели разрабатываются на основе концептуальной методики. Пакет программ SEEP2D используется для горных предприятий при создании моделей фильтрации подземных вод на таких объектах, как хвостохранилища, отвалы, а также при детализации водопритоков по выделенным лентам тока на участках бортов карьеров. Результаты, полученные на профильных моделях, применяются при геомеханических расчётах устойчивости объектов, имеющих откосы.

В GMS имеются пакеты программ для моделирования массопереноса, теплопереноса, биохимических и химических реакций, влияния изменения термодинамических показателей на химический состав подземных вод. Практически все программы основаны на использовании на начальном этапе модуля MODFLOW для создания моделей фильтрации потока подземных вод. Разработанная модель фильтрации импортируется в модуль массопереноса, в котором на основании созданной цифровой модели миграции с набором соответствующих показателей, характеризующих изменение качественного состава подземных вод, решаются прогнозные или технологические задачи.

Наиболее часто модели массопереноса разрабатывают, используя пакет программ MT3D. Программа MT3D основана на конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения, описывающего изменения концентрации веществ, переносимых потоком подземной воды. Начальные условия задаются распределением концентрации $c\ (x, y, t_0)$ на момент начала моделирования t_0. Граничные условия первого рода (Дирихле) определяют заданные концентрации на границе. Как правило, они применяются для задания источников – стоков, влияющих на изменения концентрации тех или иных компонентов в подземных водах. Граничные условия второго рода (Нейман) определяют градиент концентрации, перпендикулярный границе, то есть они служат для задания дисперсионного потока. На непроницаемых границах в фильтрационной модели расход равен нулю и соответственно отсутствует дисперсионный поток. Общий поток в виде суммы конвективного и дисперсионного потоков на границе соответствует граничному условию третьего рода 11.5, граничное условие Коши - это линейное сочетание концентрации на границе, c, и нормальной её производной $\partial c / \partial n$ [315].

$$f_{\substack{\text{ext}\\ \text{вн}}} = \frac{\vec{u}\vec{n}}{R} c - \vec{n} \frac{D}{R} \bar{\nabla} c. \qquad (11.5)$$

Если дисперсионный поток незначителен по сравнению с конвективным, то граничное условие третьего рода приближается к

граничному условию первого рода. При моделировании практических задач наиболее часто используют граничные условия первого рода, задавая постоянную концентрацию.

Имеющиеся программы MT3D позволяют применять сетевой и концептуальный способы для создания простых и сложных моделей соответственно. Программы учитывают показатели сорбции, дисперсии, молекулярной диффузии при переносе химических компонентов как в обычной, так и в гетерогенной среде. Кроме этого, имеется модуль MT3D-USGS, с помощью которого можно моделировать массоперенос инфильтрующейся через сухие породы воды, например, по зоне аэрации, с последующим проникновением загрязняющих веществ в водоносный горизонт.

Специальная программа предназначена для разработки моделей теплопереноса в подземных водах (MT3DMS).

Весьма интересен модуль MODPATH, который на основе фильтрационной модели MODFLOW даёт возможность рассчитать траектории движения отдельных химических компонентов в водоносном горизонте и определить тем самым расстояния их переноса фильтрационным потоком за заданный промежуток времени. Моделирование позволяет оценить размеры ореола захвата частиц при работе водозаборной скважины или площадь возможного загрязнения водоносного горизонта при наличии источника загрязнения и градиента потока. Можно также дать прогноз времени, за которое частица достигнет указанной точки на моделируемой области.

Комплект программ RT3D нацелен на разработку моделей при возникновении проблем с загрязнением подземных вод и обводнённых пород нефтепродуктами. Всего разработано 5 программ с заданными процессами разложения углеводородов. Программы рассчитаны на создание моделей по биодеградации соединений нефтепродуктов с помощью акцепторов электронов с участием кислорода, нитратов, соединений железа, сульфатов и получения в конечном результате метана. Для интенсификации очистки подземных вод и загрязнённых пород водоносного пласта можно разработать модель нагнетания в водоносный пласт донора электронов и поглотителей электронов, питательных веществ для стимулирования размножения микробов как в воде, так и в породе. В водной фазе моделируется наличие 3-х компонентов: доноры и акцепторы электронов, а также бактерии, в твёрдой фазе только бактерии. В принципе такая модель при определённых допущениях может использоваться для расчётов противофильтрационных завес, создаваемых в результате биохимических реакций (методов биоремедиации).

Имеется программа для моделирования в стационарном режиме на основе аэробного разложения углеводородов процесса их распространения при заданных условиях в пространстве за определённый интервал времени. Рассчитываются как ореолы углеводородов, так и содержание кислорода.

Массоперенос в водоносных горизонтах тесно связан с сорбционными процессами. Наиболее распространённым вариантом постановки задачи является рассмотрение равновесного состояния, при котором имеется равновесие между адсорбированным породой веществом и его содержанием в воде при постоянных термодинамических условиях. Данное состояние описывается изотермой сорбции как для линейной зависимости (закон Генри), так и для нелинейной (изотермы Фройндлиха или Лэнгмюра). Программа RT3D в GMS для моделирования процессов сорбции разработана с учётом скорости массообмена загрязняющих компонентов между породой и подземной водой. При большой скорости массообмена модель имитирует равновесное состояние, при очень малых скоростях загрязняющие вещества необратимо адсорбируются в порах породы. В практических задачах в большинстве случаев скорость массообмена имеет промежуточные значения, и на модели рассматриваются варианты изменения концентрации в результате сорбционных процессов как в подземной воде, так и в породе.

Одна из программ нацелена на разработку модели последовательной деградации в подземной воде тетрахлорэтилена по цепочке тетрахлорэтилен – трихлорэтилен - дихлорэтилен и винилхлорид. Прогнозируются ореолы деградации и временные графики изменения концентрации соответствующих компонентов.

Все программы RT3D используют фильтрационные модели, созданные в модуле MODFLOW.

Пакет программ SEAWAT, дополненный совместным использованием с модулями MODFLOW и MT3D, расширяет круг задач, решаемых на основе цифровых технологий в горном деле. Реализована программа для оценки влияния температуры и концентрации растворённых веществ на фильтрацию и массоперенос разноплотностных жидкостей. Такие задачи имеют место быть при взаимодействии поверхностных водоёмов и водотоков с подземными водами в регионах с развитием многолетней мерзлоты, в горной местности, в районах при положительном годовом балансе температуры и прибрежных зонах морей и океанов. Программа SEAWAT основана на использовании концептуальной методики разработанных моделей фильтрации и массопереноса в MODFLOW и MT3D. В принципе в ней можно использовать также модели, созданные по способу сетки. SEAWAT позволяет определить продвижение границы раздела разноплотностных жидкостей как в случае вторжения солёной воды, так и её отступления под напором пресного потока.

Доступна возможность моделирования потоков подземной воды с изменяющейся плотностью.

В пакете SEAWAT имеется программа, которая позволяет учесть на модели изменение температуры, теплообмена, концентрации и давления на положение границы раздела разноплотностных жидкостей. Вода является мало сжимаемой жидкостью, и в практических расчётах влияние этих показателей может проявиться только в специфических условиях (например, в складчатых областях)

Массоперенос в подземных водах характеризуется физико-химическими процессами, среди которых для отдельных объектов горных предприятий (например, хвостохранилищ, отвалов горных пород) заметную роль играют ионный обмен и комплексообразование. При ионном обмене те или иные ионы поглощаются из воды твёрдой фазой, и другие ионы поступают в неё из твёрдой фазы в равном количестве. Поглощение определённого иона сопровождается вытеснением из поглощающей фазы одноимённо заряженного иона. В большинстве решаемых задач происходит равновесный обмен, и твёрдая фаза имеет постоянную обменную ёмкость. Процесс комплексообразования несколько иной, в данном случае реакция идёт между электрически заряженными частицами в твёрдой и жидкой фазах, образующиеся соединения характеризуются донорно-акцепторными связями, когда донор отдаёт электрон, а акцептор присоединяет его. Для моделирования этих процессов в GMS имеются программы RT3D и PHT3D, с помощью которых оценивается влияние обменных реакций на миграцию химических компонентов в подземной воде.

Эти же программы позволяют создать модель геохимических реакций в подземных водах. Моделирование химических реакций растворения и осадкообразования актуально для горных предприятий, расположенных на территориях развития карстующихся пород, при наличии относительно легко растворимых минералов, добычи сырья по технологии выщелачивания и при использовании горных выработок для складирования отходов.

11.2. Классические этюды разработанных моделей

При разработке моделей фильтрации и массопереноса в подземных водах на основе цифровых технологий всегда необходимо руководствоваться некоторыми принципами и правилами. В наиболее сжатом виде они были сформулированы Азизом К. (K. Aziz, 1989) для нефтяной отрасли [337]. С некоторой корректировкой они справедливы и для моделей водоносных пластов.

1. Сформулируйте задачу и определите цели исследования. Перед

началом моделирования изучите геологические и гидрогеологические характеристики пласта и насыщающих его флюидов, а также их динамическое поведение. Прежде всего, ясно определите и зафиксируйте цели исследования. Оцените, насколько эти цели реалистичны. Всё это поможет выбрать наиболее подходящую программу и модель для исследования.

2. Упрощайте. Используйте наиболее простые модели, отражающие природу пласта, цели исследования и имеющиеся данные. Простые аналитические модели или балансовые расчёты всегда должны быть проанализированы и учтены при разработке модели. В то же время, наиболее сложные из доступных моделей могут не соответствовать конкретным потребностям. Следует учитывать возможности и ограничения используемого ПО.

3. Оценивайте степень взаимодействия различных элементов системы. Пласт не является изолированным объектом. Он может сообщаться с другими слоями и земной поверхностью. Кроме того, пласт взаимодействует напрямую или через скважины с подземными и наземными объектами. Изоляция различных компонентов системы при проведении отдельного исследования часто приводит к неверным результатам из-за пренебрежения взаимодействием различных элементов единой системы. Однако, если возможно, не бойтесь разбивать большую проблему на части и создавать локальные модели из региональной. Это приведёт не только к значительной экономии, но и к лучшему пониманию сложных природных механизмов.

4. Не думайте, что больше - всегда лучше. Объём исследования всегда ограничивается вычислительными ресурсами или бюджетом. Инженеры, которые занимаются моделированием, часто полагают, что ни один компьютер не позволяет моделировать именно ту задачу, которую они считают нужным рассматривать, поэтому они просто стремятся увеличивать размерность модели в соответствии с имеющимися вычислительными мощностями. Но увеличение числа расчётных блоков и компонентов не приводит автоматически к увеличению точности и достоверности. В действительности, в некоторых случаях верно обратное. Поэтому необходимо обоснованно определять количество расчётных блоков, используемое в каждом исследовании, рассчитывая на использование в региональной модели принципа телескопичности.

5. Доверяйте здравому смыслу. Помните, что моделирование не является точной наукой. Все модели основаны на воспроизведении неполнозаданного пространства и дают только приближённые решения реальных задач. Следовательно, физически хорошее понимание задачи и модели - необходимое условие успеха. Численная аппроксимация может привести к таким «псевдофизическим» феноменам, как численная дисперсия. Используйте свой здравый смысл и опыт, особенно если он основан на анализе

фактических полевых и лабораторных наблюдений. Внимательно проверяйте входные и выходные данные. Проводите простые расчёты методом материального баланса, чтобы проверить результаты моделирования. Уделяйте особое внимание нереальным значениям физических параметров.

6. Не ожидайте от модели больше, чем она может дать. Часто самое большое, что можно получить в результате исследования, – это лишь показатели для относительного сопоставления доступных вариантов. В других случаях можно ожидать гораздо большего и рассчитать параметры оптимального варианта. Без учёта какого-либо физического механизма при построении модели нельзя изучить его влияние на процессы в пласте с использованием данной модели.

7. Существует проблема корректировки параметров при воспроизведении истории. Всегда подвергайте сомнению подбор данных при воспроизведении истории. Помните, что эта задача имеет не единственное решение. Самое разумное решение будет получено только в результате тщательного анализа его приемлемости с физической и геологической точки зрения. Хорошее совпадение истории при нереальных значениях корректируемых параметров приведёт к плохому прогнозу. Хорошее качество воспроизведения истории не всегда гарантирует достоверный прогноз в силу исследования неполнозаданного пространства.

8. Не сглаживайте крайности. Уделяйте внимание крайним значениям проницаемости (по барьерам и водным объектам). Будьте внимательны при осреднении для того, чтобы не потерять важную информацию о крайних значениях. Никогда не усредняйте крайние значения.

9. Уделяйте внимание масштабам измерения и использования параметров. Величины, измеренные на масштабе керна, не могут непосредственно переноситься на масштабы водоносных пластов, однако эти данные должны быть обязательно учтены при определении значений параметров на модели. Осреднение может изменить природу усредняемого параметра. Например, проницаемость может быть скаляром на некоем малом масштабе и тензором на большем масштабе. Даже смысл капиллярного давления и проницаемостей может различаться на разных масштабах. Кроме того, вследствие осреднения в уравнениях фильтрации может появиться дисперсионное слагаемое.

10. Не скупитесь на необходимые лабораторные и полевые исследования. Модели не заменяют хороших лабораторных экспериментов, которые ставятся для приобретения понимания природы моделируемого процесса или для измерения значимых параметров уравнений, которые решаются при моделировании. Планируйте работу с учётом разумного использования полученной информации. Научитесь тому, как масштабировать данные. Используйте аппарат опытно-промышленных экспериментов.

11.2.1. Модель рудного узла (подземная отработка)

В геологическом строении рудного узла (РУ) принимают участие осадочные отложения, магматические породы и рыхлые отложения четвертичной системы. Общая мощность детально изученного геологического разреза превышает 2000 м. Породы залегают моноклинально с падением на восток. Тектоника района сложная и характеризуется наличием крупных разломов и оперяющих их более мелких дизъюнктивных нарушений. Геологический разрез района насыщен интрузивными телами, имеющими различные формы, мощность и состав. Гидрогеологическое строение обусловлено наличием нескольких водоносных и водоупорных слоёв и осложняется развитием мощной зоны многолетнемёрзлых пород. Проницаемость трещиноватых пород изменяется с глубиной по зависимости [50]:

$$\kappa(z) = \kappa_o e^{-\beta z / m}, \qquad (11.5)$$

где K_o –коэффициент фильтрации пород у кровли пласта (z=0), м/сут;

e – основание натурального логарифма;

m (или h) – мощность трещиноватых пород (или глубина грунтового потока), м;

z – вертикальная координата, м;

β – безразмерная постоянная, характеризующая интенсивность снижения коэффициента фильтрации пород по глубине.

Коэффициент анизотропии водно–физических свойств изменяется от 1,1 до 4.

В пределах рудного узла ведётся подземная разработка полезного ископаемого с закладкой выработанного пространства для сохранения целостности подработанного горного массива. В эксплуатации находятся несколько шахт.

Разработка геофильтрационной модели РУ выполнялась в GMS на базе модуля MODFLOW в три основных этапа:

1. Обработка первичной геологической, гидрогеологической и горно-геологической информации.

2. Создание геологической модели района рудного узла.

3. Создание региональной геофильтрационной модели рудного узла.

На первом этапе разработки региональной модели проведен анализ и обработка исходной гидрогеологической, геологической и горной информации исследуемого района.

На втором этапе создавалась геологическая модель района рудного узла. Геологическая модель была построена после обработки первичной

информации, которая позволила наглядно представить геологические условия месторождений РУ. Дальнейший анализ гидрогеологических условий показал, что основным фактором обводнения горных выработок в скальных породах является не литолого-стратиграфические показатели, а трещиноватость горных пород. Таким образом, при вертикальной схематизации скальных пород в данном случае целесообразнее учитывать вертикальную зональность, которая обусловлена затуханием трещиноватости с глубиной.

На третьем этапе производилось непосредственное создание геофильтрационной модели РУ на основе обработанной исходной информации с использованием модулей программного комплекса GMS – 2D Grid, 2D Scatter Point, Map и других.

На первой стадии работ площадь моделирования в модуле 2D Grid дискретизировалась на равномерную ортогональную двухмерную сетку. При помощи модуля Map непосредственно в модель введена исходная топооснова района, гидрография, карты фактического материала, гидрогеологическая и иная информация, что исключило возможные искажения при задании техногенных и природных объектов. При отсутствии исходных данных информация задавалась методом интерполяции. Площадь, на которой реализована геофильтрационная модель, представляет прямоугольник размером более 1000 км^2. Область модели определялась площадью развития депрессионных воронок, влияния горных выработок горнодобывающих предприятий на динамику подземных вод, а также топографическими материалами (моделируемая территория включает водосборные бассейны рек) и границами естественного регионального дренажа на местности (рис. 11.8).

Пространственная дискретизация выполнена с шагом 100 х 100 м, с количеством ячеек по широте более 300, по долготе – 200 и общим количеством ячеек на выбранном полигоне – 95 000штук.

Размеры ячеек зависят от объёма компьютерной памяти и должны обеспечить учёт всех основополагающих факторов моделирующей гидродинамической обстановки (фильтрационная неоднородность, сложный характер и разнообразие граничных условий, перетекание, инфильтрация и т.д.). В плане рекомендуемый размер ячеек сетки региональных моделей (площадью от 500 км^2) для более детального отражения уровня обычно – 250 м.

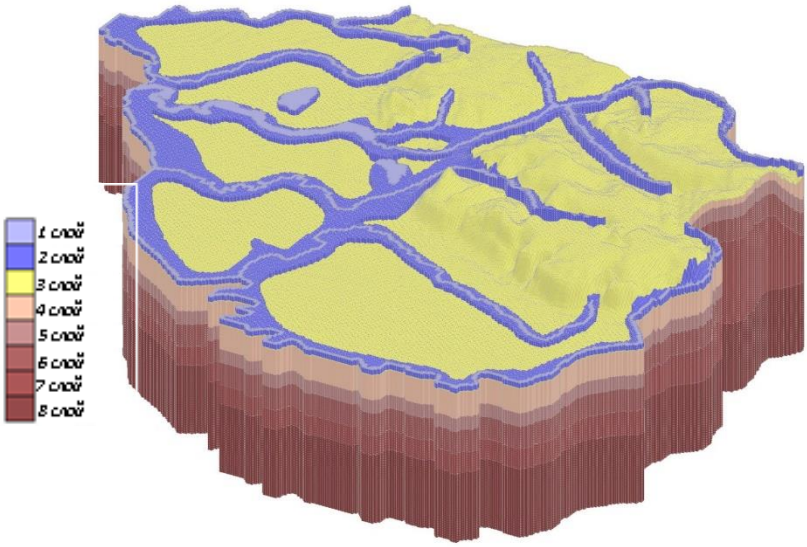


Рис. 11.8. Региональная геологическая модель

Для исследуемой территории характерен сильно расчленённый рельеф, поэтому принято решение сделать более дробную разбивку. Для учёта сложной конфигурации границ использован приём задания дополнительных (фиктивных) блоков.

Вертикальная дискретизация была приближена к природным условиям с отражением изменения естественных фильтрационных параметров. Всего на модели выделено 8 расчётных слоёв, размеры призм по оси z – равны мощности рассматриваемого слоя:

- 1ый слой – в зоне многолетнемёрзлых пород водоносный горизонт сквозных таликов современных аллювиальных отложений;
- 2ой слой – в зоне многолетнемёрзлых пород таликовый водоносный горизонт четвертичных древнеаллювиальных отложений;
- 3ий слой – водоносный комплекс коренных пород зоны повышенной трещиноватости (кора выветривания);
- с 4ого слоя по 8ой слой – водоносный комплекс трещиноватых коренных пород с учётом затухания трещиноватости с глубиной.

На стадии создания региональной модели для условий ненарушенного естественного режима подземных вод заданы следующие граничные условия.

В первом слое, моделирующем водоносный горизонт сквозных таликов современных аллювиальных отложений по площади их распространения

заданы граничные условия III-го рода по водотокам с помощью пакета River, по площадным водоёмам с помощью пакета General Head.

Разгрузка естественного регионального потока подземных вод подмерзлотных водоносных горизонтов в водоёмы и реки учитывалась граничными условиями I-го рода (H=const).

На водораздельных линиях задано граничное условие II-го рода (Q=const=0), что отвечает непроницаемой границе. Данная граница присутствует с 3^{его} по 8ой моделируемые слои. Во 2ом слое по границе распространения четвертичных древнеаллювиальных отложений также использовано граничное условие II-го рода (Q= 0).

Инфильтрационное питание подземных вод, поступающее через горизонтальную грань активной ячейки на модели, задавалось по сквозным таликам в 1ом расчётном слое с применением модуля Recharge. Для реализации на геофильтрационной модели потока подземных вод с нарушенным режимом, сформировавшимся в процессе отработки РУ, задавались дополнительно внутренние граничные условия. Горные выработки на модели реализовывались граничными условиями I-го и III-го рода. Шахтные стволы были введены в модель через модуль Drain.

Для модели использованы следующие массивы исходной информации:

- абсолютные отметки поверхности земли $H_з$ (м);
- абсолютные отметки кровли и подошвы моделируемых слоев H (м);
- абсолютные отметки уровней подземных вод водоносных горизонтов $H_у$;
- абсолютные отметки уровней воды в реках и водоёмах $H_р$ (м), абсолютные отметки дна рек и водоёмов $H_о$ (м);
- проводимости подрусловых отложений, характеризующие степень взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками $T_р$ (м^2/сут);
- величина интенсивности инфильтрационного питания W (м/сут);
- коэффициенты фильтрации моделируемых слоёв $К_ф$ (м/сут);
- другая количественная и качественная информация о природной среде и техногенной нагрузке.

Калибровка геофильтрационной модели осуществлялась в 2 стадии: до отработки полезного ископаемого по уровням воды в контрольно-стволовых скважинах; по притокам к подземным горным выработкам на 2017 г. в результате отработки полезного ископаемого.

Калибровка производилась с учётом анизотропии пород. В процессе калибровки модели в первую очередь корректировались такие параметры фильтрационной модели, которые являются наименее обоснованными с точки зрения полевых опробований и наблюдений. К ним, в первую очередь, относятся параметры горизонтальной анизотропии, а также параметры проводимости в дренажных блоках. Горизонтальная анизотропия на модели

учитывалась исходя из имеющейся информации, вертикальная - подбиралась в процессе решения обратной задачи. Калибровка модели осуществлялась по каждому из выделенных расчётных слоёв. В ходе калибровки оценивалась чувствительность модели к изменению показателей водопроводимости слоёв. По результатам решения «обратной» задачи в окончательном варианте разница между суммарными фактическими и модельными водопритоками составила незначительную величину от 0,5 % до 1,3 %.

Созданная региональная модель использовалась в двух направлениях: для решения задач по мониторингу подземных вод региона и разработки локальных моделей на конкретных участках добычи полезного ископаемого. На локальных крупномасштабных моделях подробно и с большей вероятностью учитывалось неполнозаданное пространство по формированию фильтрационных потоков в зоне влияния горных работ отдельных объектов.

Основными шагами преобразования региональной модели в локальные были следующие:

1. Использование откалиброванной региональной модели.

2. Использование команды Modflow Layers→2D Scatter Points для создания набора разбросанных точек вместе с данными напора и слоёв из региональной модели.

3. Создание трёхмерной сетки для крупномасштабной модели.

4. Интерполирование величин напоров и данных слоя из разбросанных точек в матрицу Modflow для локальной модели.

5. Калибровка и решение обратной задачи на локальной модели.

Дискретизация пространства для локальных моделей выполнялась с размером ячеек 25х25 м, 50х50 м и к периферии до 100х100 м. Всего на отдельных локальных моделях было выделено от 500 000 до 1 400 000 блоков (Рис.11.9)

Процедура калибровки локальной модели аналогична процессу калибровки региональной модели.

Крупномасштабные модели позволили более корректно учесть природную и техногенную ситуацию на каждом выделенном участке, детализировать расположение существующих и проектируемых горных выработок и выполнить анализ структуры потока подземных вод в зоне влияния каждого горного объекта. Модели использовались в дальнейшем при решении прогнозных задач по изменению технологии ведения горных работ и оценке её влияния на количественные и качественные показатели водных ресурсов региона.

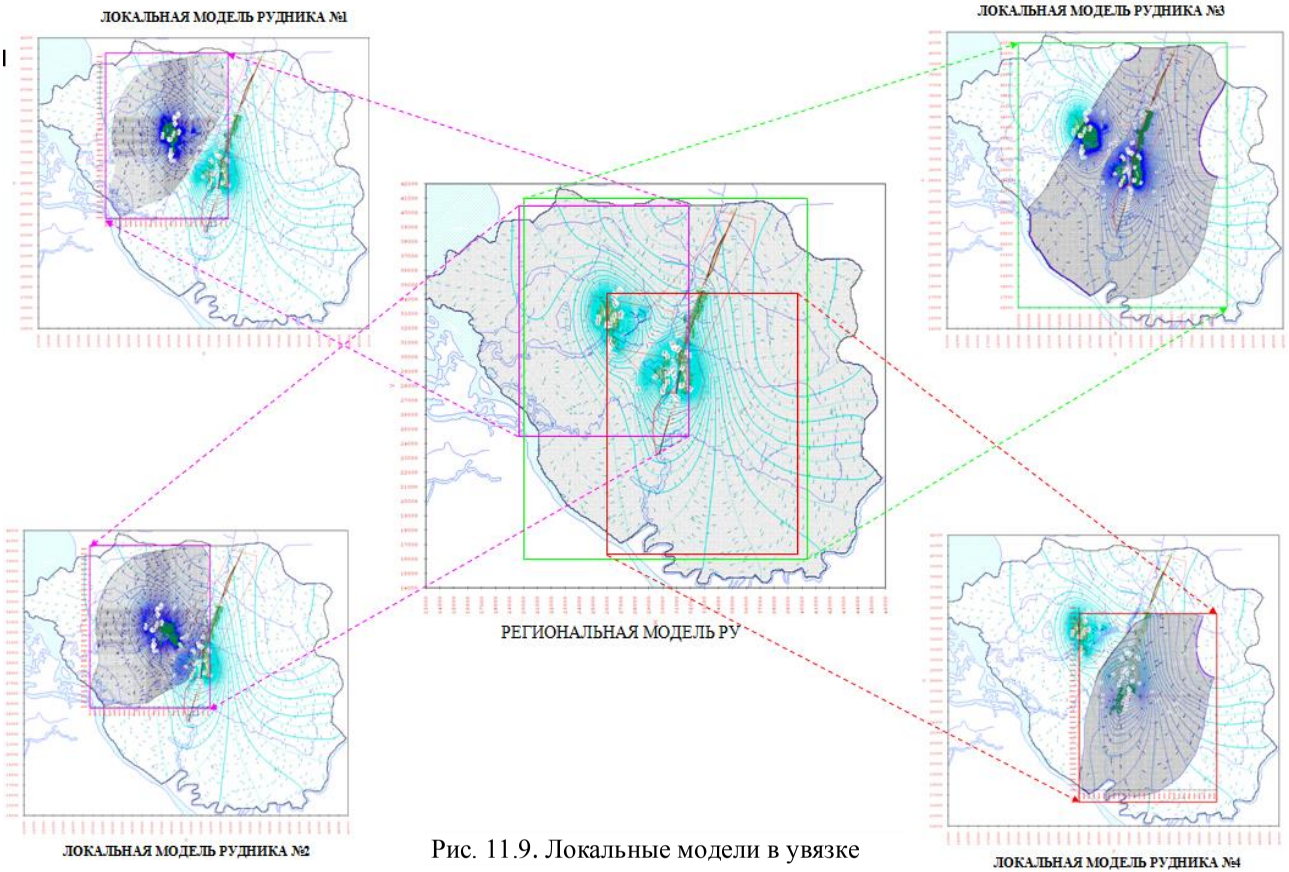


Рис. 11.9. Локальные модели в увязке с региональной

11.2.2. Модель при ведении открытых горных работ

Добыча полезного ископаемого ведётся открытым способом, глубина карьера составляет около 500 м, диаметр по поверхности порядка 2,0 км (рис. 11.10).

Горные работы ведутся в сложных гидрогеологических условиях, которые характеризуются [32, 36]:

- субвертикальными углами падения пород с многочисленными жилами;
- наличием зоны дезинтеграции, представленной сильно трещиноватыми породами и системой тектонических нарушений – коллекторов и проводников подземных вод на значительные глубины;
- наличием зон искусственной трещиноватости на бортах карьера;
- распространением сильно- и среднепроницаемых рыхлых отложений;
- искусственными сооружениями – отвалами, хвостохранилищем – коллекторами поверхностного стока вод;
- развитой гидрографической сетью, гидравлически связанной с подземными водами.

Рис.11.10. Карьер

В районе месторождения выделяется 3 водоносных комплекса с 8-ю водоносными горизонтами.

Для районирования бортов карьера по степени обводнённости выполнена инфракрасная тепловизионная съёмка, основанная на восприятии тепловизором температур от участков бортов карьера в виде цветовой гаммы и её дальнейшей интерпретации – в выделении аномальных участков,

относящихся к обводнению. Основополагающим критерием являлась разница температур воды, выходящей на борт карьера, и окружающих пород.

Тепловизионная инструментальная съёмка выполнялась с помощью тепловизора Infametrics-760 с разрешающей способностью 0,1°С.

Анализ снимков показал, что наиболее обводнены участки борта карьера, где верхними уступами подрезаются высокопроницаемые осадочные отложения, подрабатывается кора выветривания, или карьером пересекаются тектонические нарушения, что отражается сине-фиолетовыми и голубыми тонами на снимках (рис. 11.11 – 11.13).

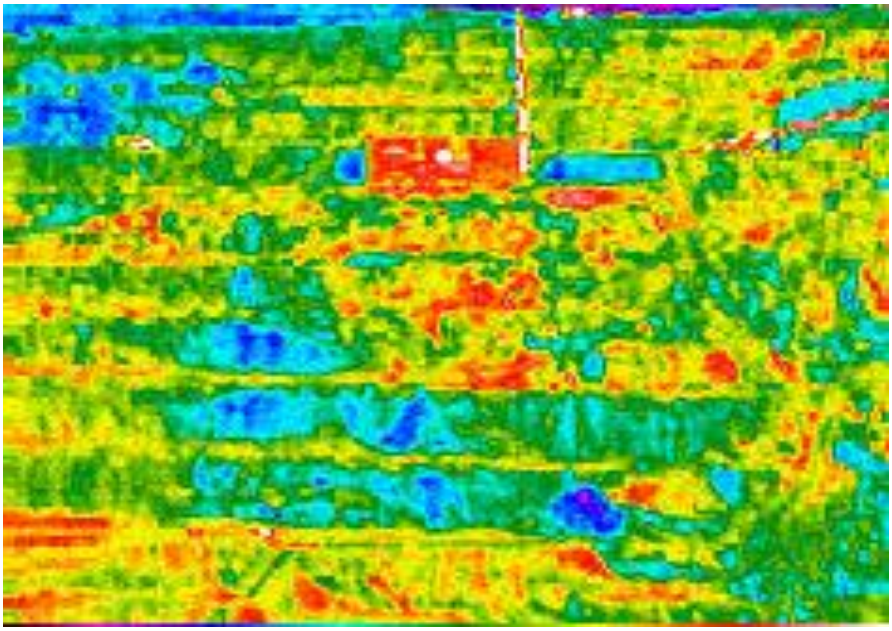


Рис. 11.11. Тепловизионный снимок участка восточного борта карьера

Для решения вопросов по защите карьера от отрицательного воздействия подземных вод была разработана региональная фильтрационная модель (рис. 11.14). При создании модели учтены природные и техногенные изменения в районе расположения карьера, в том числе прекращение откачки подземных вод на близлежащем горном предприятии, что привело к подъёму уровня и изменению структуры фильтрационного потока.

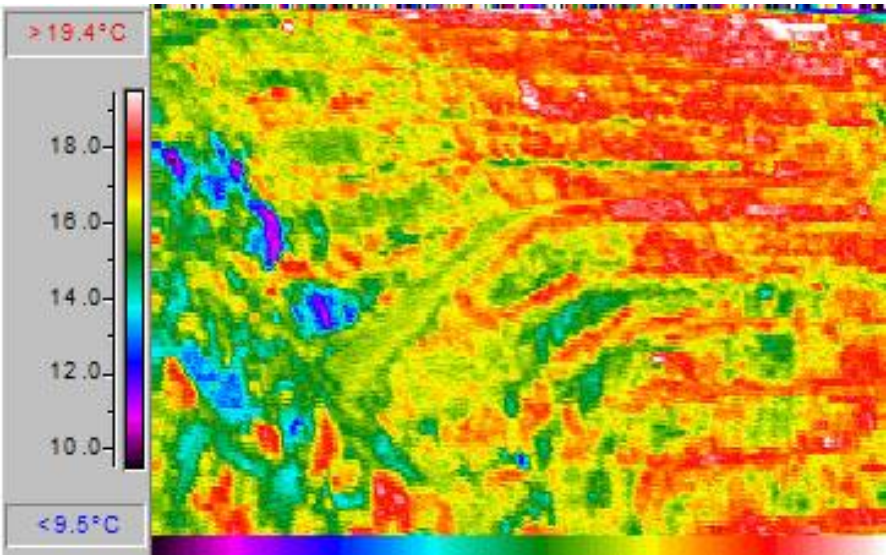


Рис. 11.12. Тепловизионный снимок участка северного борта карьера

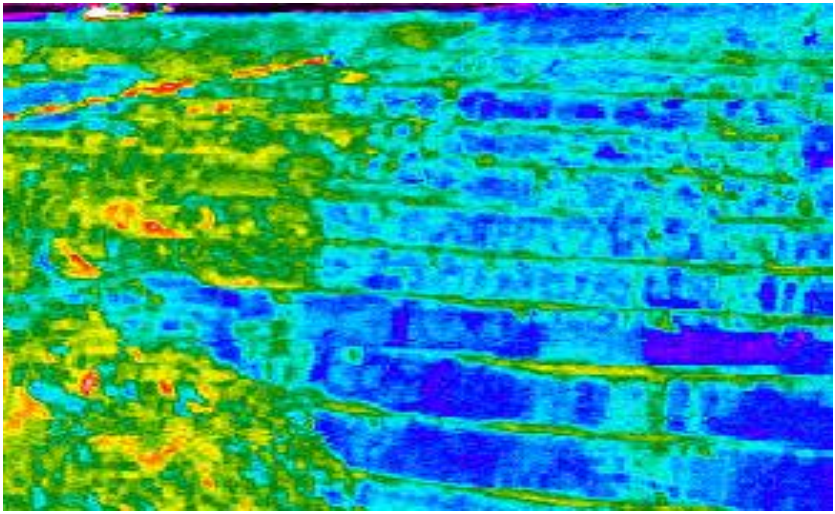


Рис. 11.13. Тепловизионный снимок участка юго-восточного борта карьера

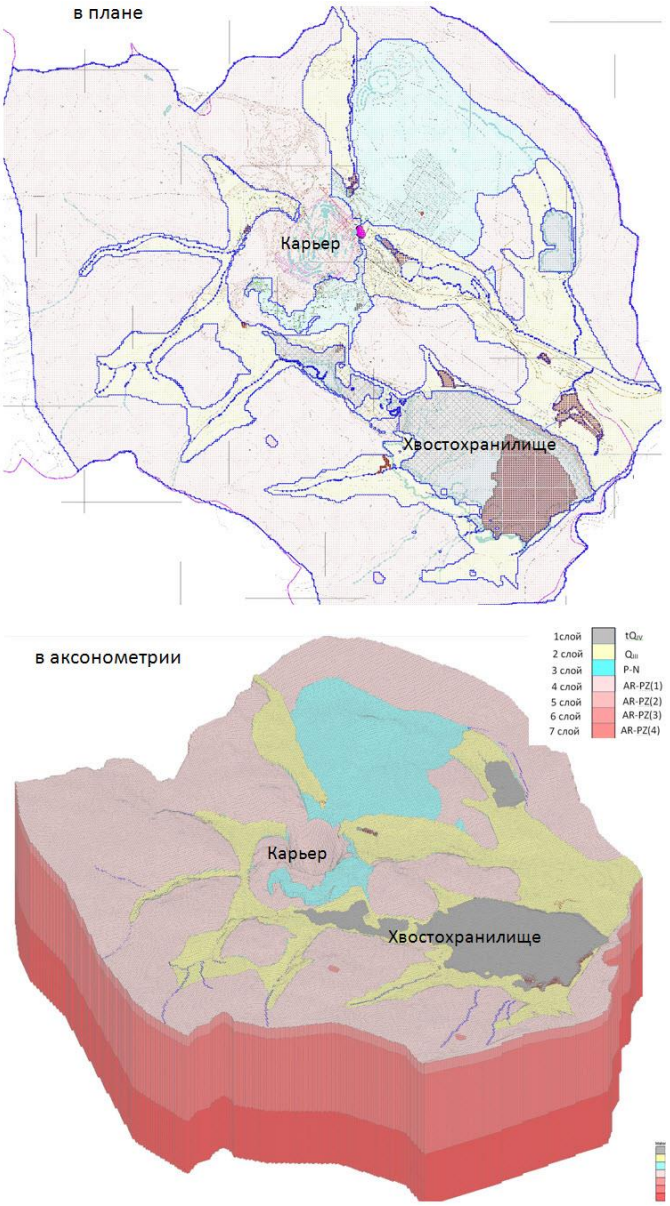


Рис.11.14. Геологическая основа региональной модели

Расчётная схема региональной модели была представлена семью слоями:

1 слой – водоносный современный техногенный горизонт;

2 слой – четвертичный водоносный (природный) горизонт;

3 слой – водоносный (слабоводоносный) палеоген-неогеновый горизонт коры выветривания;

4 слой – водоносный комплекс зоны дезинтеграции и интенсивной трещиноватости кристаллических пород;

5 слой – водоносный комплекс зоны трещиноватости кристаллических пород;

6 слой – слабоводоносный комплекс зоны замедленного водообмена кристаллических пород до абс. отм. -350 м;

7 слой – слабоводоносный комплекс зоны замедленного водообмена кристаллических пород до абс. отм. -800 м.

Модель разрабатывалась с использованием программного комплекса GMS, модуля MODFLOW. Детальная калибровка по соответствию модельных и натурных уровней подземных вод позволила достичь погрешности в 1,3-1,5 %. Выполненными расчётами с использованием программ MODFLOW и MODPATH определена структура потока подземных вод в пределах карьерного поля и оценены величины водопритоков к бортам карьера (рис. 11.15).

Для разработки технических решений по уменьшению обводнённости наиболее сложных участков борта карьера на основе региональной модели были разработаны локальные модели (рис. 11.16). Более детальное представление условий потока достигается на локальной модели благодаря меньшей площади и более детальной разбивке. Это позволяет максимально точно отобразить пространственную конфигурацию участка борта карьера и элементы поверхности земли, геофильтрационную изменчивость потока и свойств пород в плане и в разрезе, расположение технических объектов, более точно имитировать каждую дрену с её геолого-гидрогеологическими и техническими параметрами в модель. В качестве исходных данных для локальной модели используются результаты решения, полученные на региональной модели, а также подобранные на ней значения гидрогеологических параметров. Этим учитывается влияние на имитируемые процессы объектов, расположенных в рамках региональной модели, но не попадающих на территорию локальной модели.

В целом технология формирования локальной модели во многом соответствует процедуре имитации региональной реальности на компьютере. Основное отличие заключается в необходимости задания специфических условий по границам локальной модели.

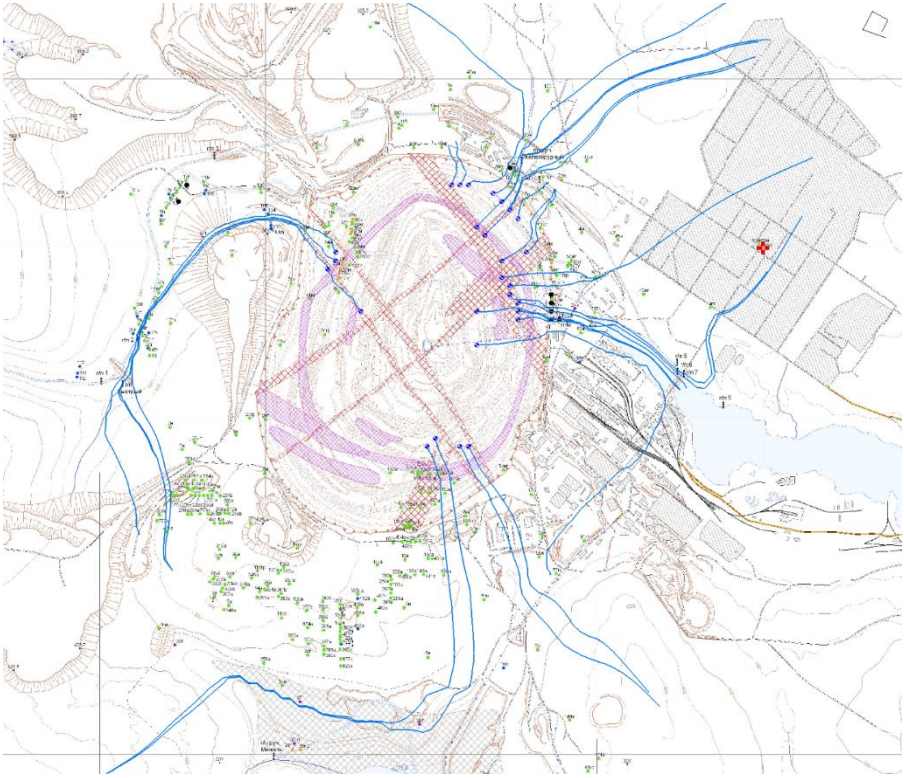


Рис.11.15. Траектория движения подземных вод к нисходящим источникам на бортах карьера

Калибровка локальной модели близка к аналогичному процессу калибровки региональной модели, но её проведение предполагает также соблюдение ряда дополнительных требований. В их числе соответствие уровней, задаваемых по внешним границам первого рода локальной модели, уровням, рассчитанным на региональной модели.

Был разработан массив граничных условий для создания локальной модели. Внешний её контур отвечает граничным условиям I рода (H=const). Нижняя граница модели задавалась непроницаемой и реализована граничными условиями II рода (Q=0). Инфильтрационное питание подземных вод на верхней поверхности модели задано расходом (Q = const), поступающим через горизонтальную грань ячейки. Объекты техногенной и

природной нагрузки реализованы через внутренние граничные условия I, II и III рода. При калибровке локальной модели учитывалась, в том числе, информация по эксплуатируемым водопонижающим скважинам. В результате калибровки погрешности при сопоставлении натурных уровней подземных вод и полученных при моделировании не превышали 0,8 % (рис. 11.17).

На разработанной локальной модели рассматривались различные технические решения и технологические приёмы по уменьшению обводнённости участка борта карьера в том числе при сооружении противофильтрационной завесы (ПФЗ) (рис. 11.18, 11.19).

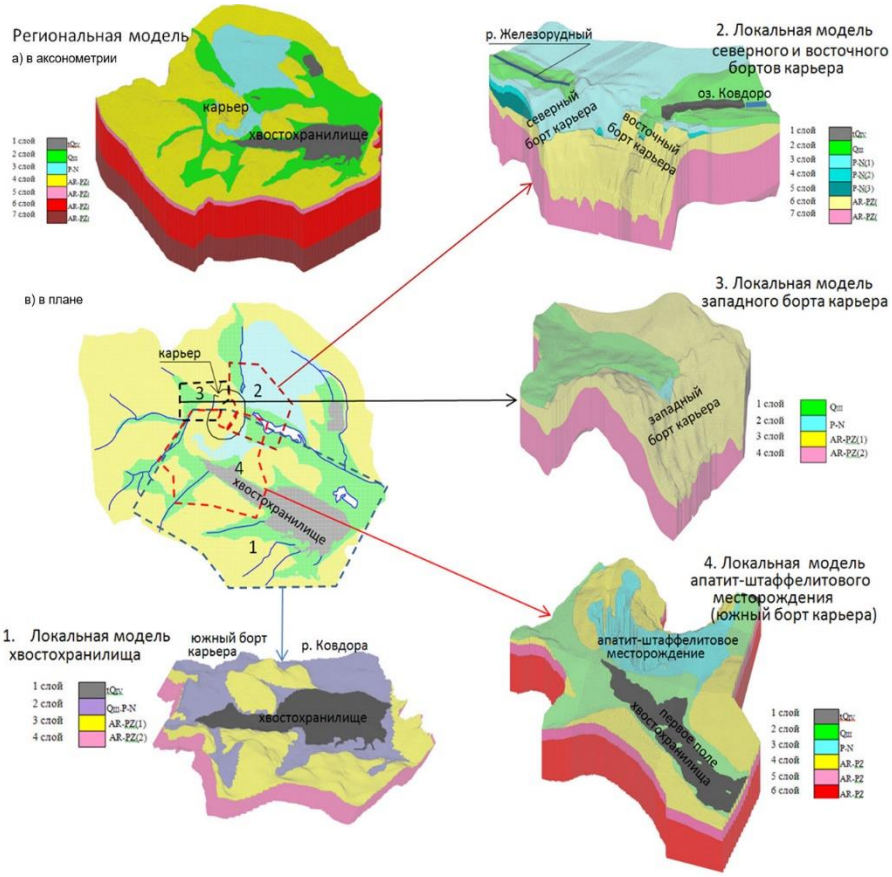


Рис. 11.16. Локальные модели

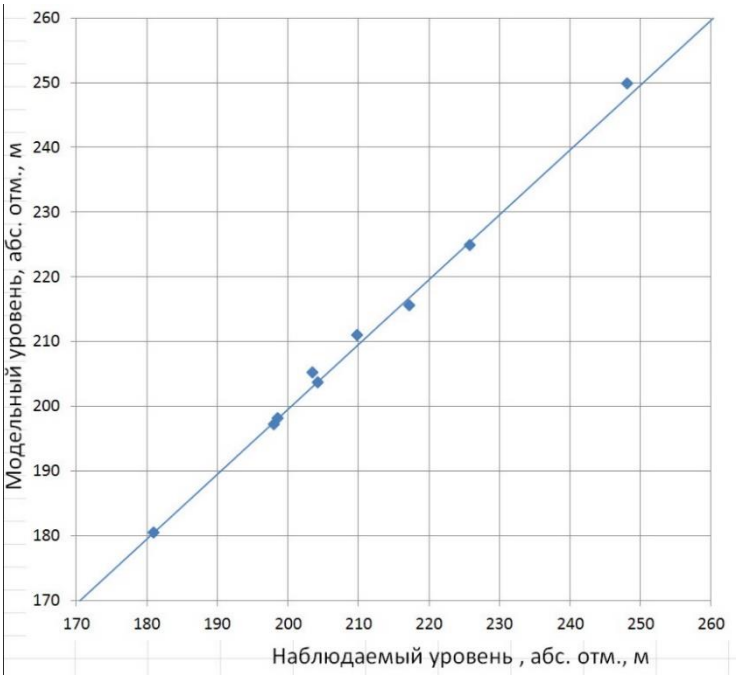


Рис.11.17. График сравнения модельных и фактических уровней подземных вод

Для уточнения условий обводнения прибортового массива, решения прогнозных задач по оценке структуры фильтрационного потока и определения мест его выхода на откосах уступов, расчёта величин притоков подземных вод на выделенный участок борта была разработана профильная модель в программе SEEP2D.

В моделях SEEP2D решается уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}+K_{xy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}+K_{yx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)=0 \qquad (11.7)$$

где: *h*- общий напор, м; *K*- коэффициент фильтрации, м/сут.

Программное обеспечение SEEP2D основано на методе конечных элементов. Дискретизация пространства на треугольные элементы выполнена с помощью команд интерфейса GMS, который имеет разнообразные методы построения сеток и интерактивные средства их редактирования. Были заданы

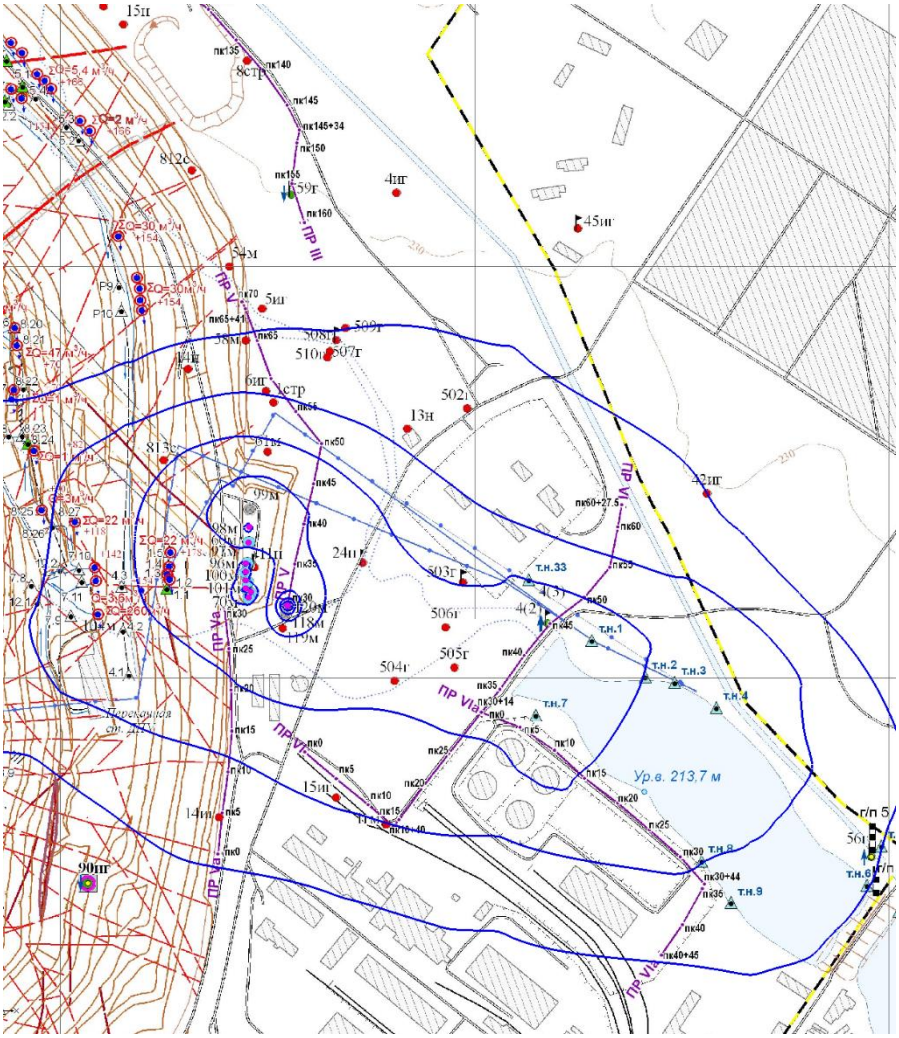


Рис.11.18. Защита с помощью водопонижающих скважин

граничные условия как I рода - постоянный напор в узле, так и II рода - расход в узле или вдоль стороны элемента. Гидрогеологические параметры для двухмерной профильной модели адаптированы из трёхмерной модели.

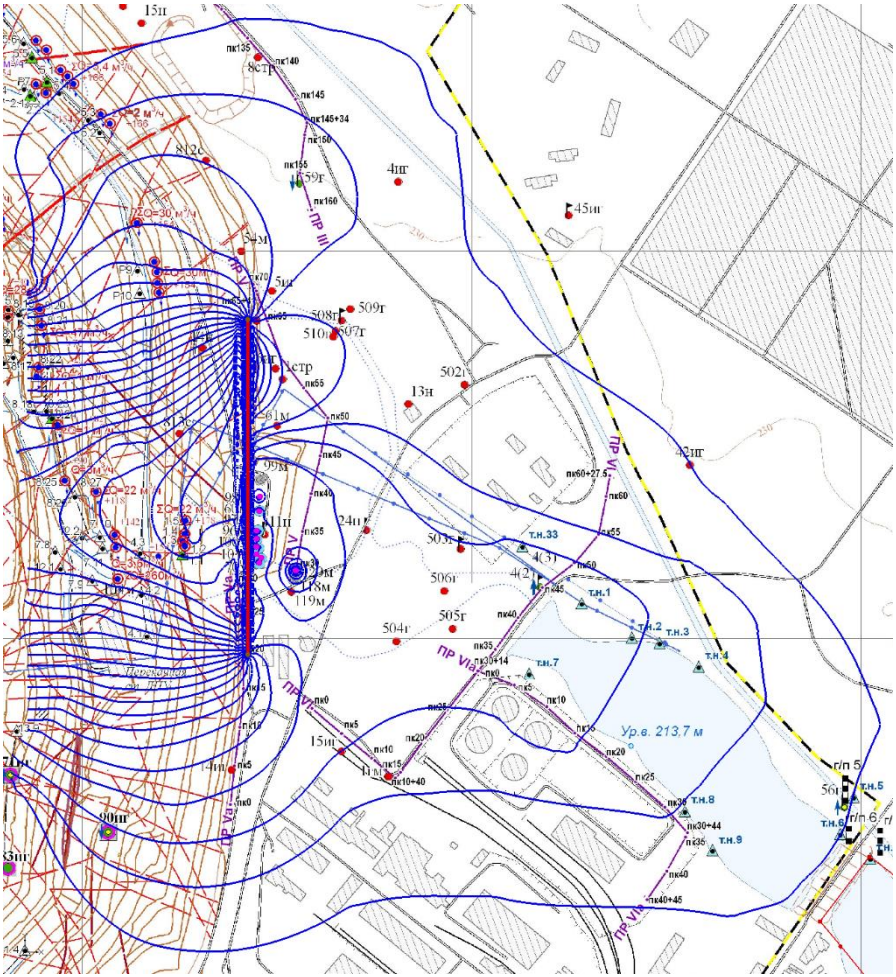


Рис.11.19. Компьютерная модель защиты восточного борта карьера с помощью ПФЗ

Результаты модельных расчётов - зеркало и напор подземных вод, формирующийся в прибортовом массиве (линии равных напоров), направление движения и расход потока по выделенным профилям приведены на рис. 11.20, 11.21.

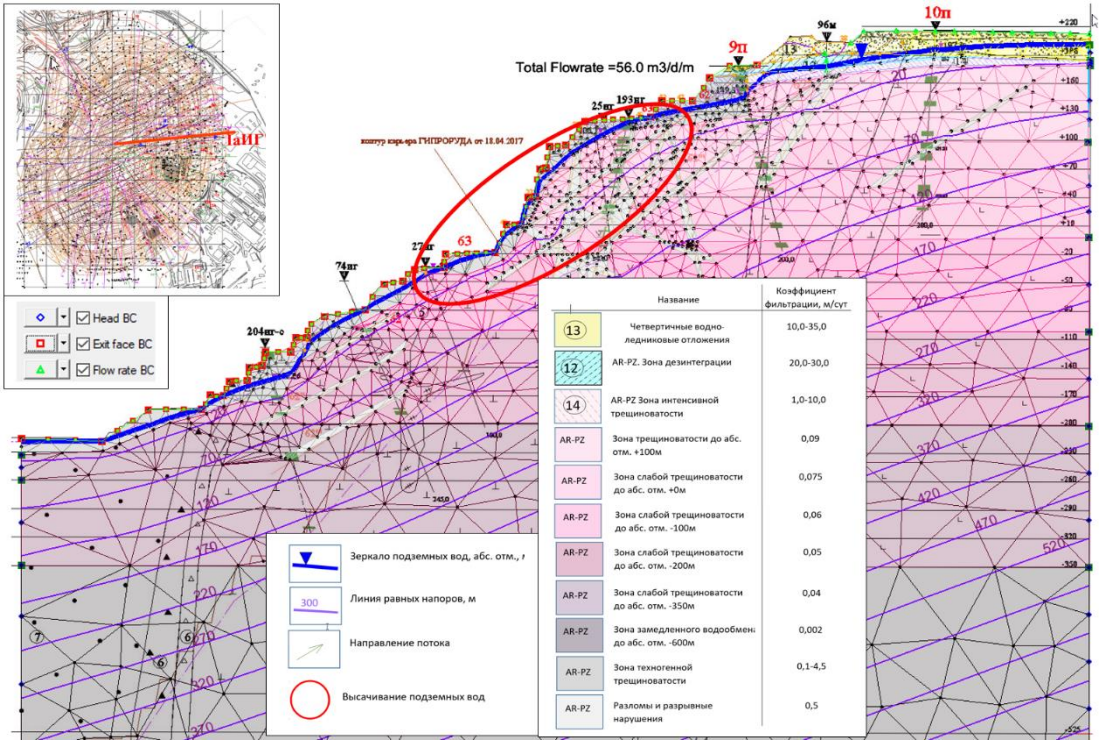


Рис.11.20. Профильная модель восточного участка борта карьера

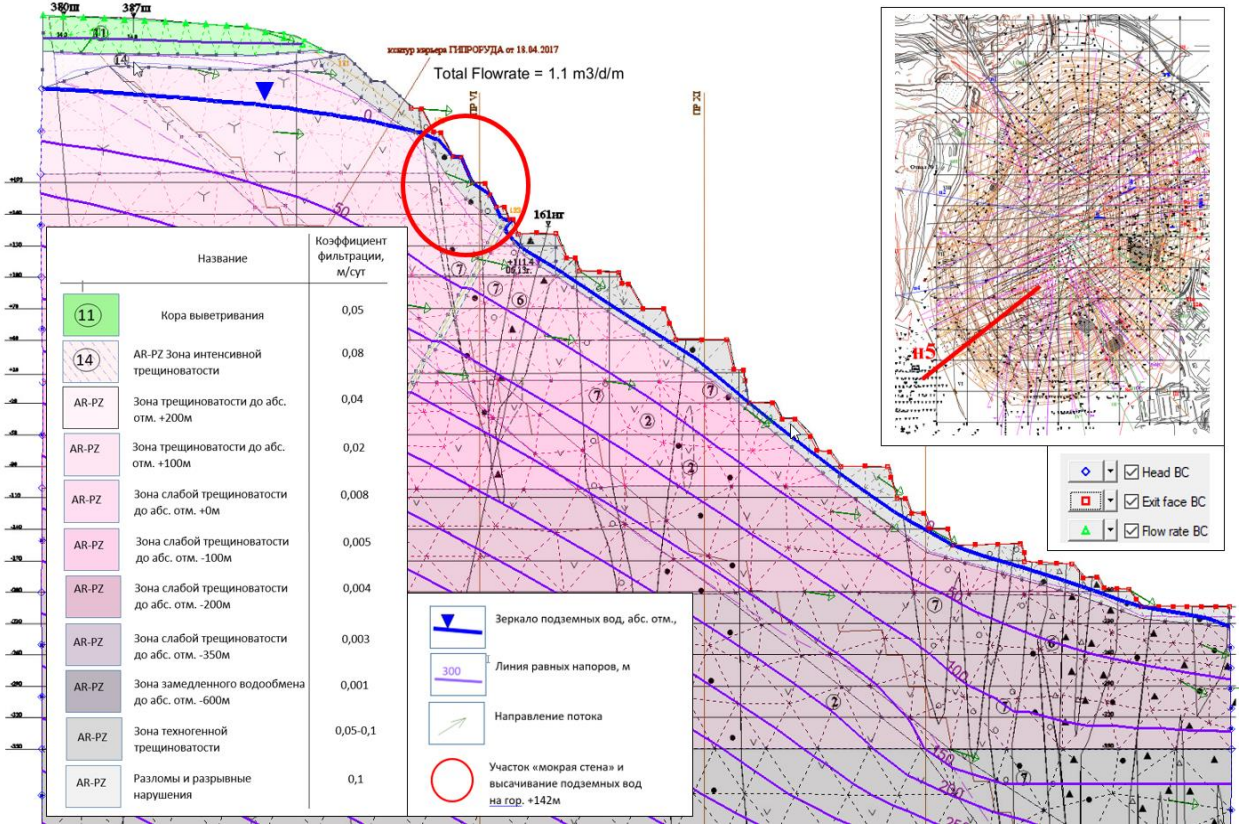


Рис.11.21. Профильная модель юго-западного участка борта карьера

Построенные профильные модели позволили получить для анализа все основные показатели формирования режима уровня и притоков подземных вод на различных участках бортов карьера и использовать их для расчёта устойчивости уступов.

11.2.3. Модель на побережье океана

Месторождение расположено на расстоянии 3,5 километра от береговой линии океана. Добычу полезного ископаемого предполагается вести открытым способом. Для решения технологических и прогнозных задач были разработаны модели в модулях GMS - MODFLOW и MT3D. Размеры области моделирования определялись геологическими, гидрогеологическими и граничными условиями с учётом влияния на естественную гидрогеологическую обстановку проектируемого карьера, вскрывающего все водоносные горизонты [338].

При схематизации природных условий выяснилось, что в обводнении руды и вмещающих пород участвуют 6 водоносных слоёв, также отмечается наличие карстовых полостей. При анализе параметров рыхлых водоносных слоёв принято условие их квазиоднородности с оценкой средневзвешенного коэффициента фильтрации, для трещиноватых пород учитывалось затухание трещиноватости с глубиной. Карстовые зоны характеризовались высокой водопроницаемостью. Краевые условия для реки и морского залива задавались I рода, в остальных объектах II и III рода (перетекание, линии тока и другие). В плане область фильтрации была фрагментирована квадратными блоками 50х50 м. Суммарный объём расчётных блоков составил 153 600 штук (рис. 11.22, 11.23). Инфильтрация по активным ячейкам задавалась исходя из информации о количестве выпадающих осадков и модуля поверхностного стока.

Калибровка разработанной модели проводилась эпигнозным моделированием с изменением исходной информации для уменьшения погрешности между расчётными и фактическими значениями уровней подземных вод. На основании анализа материалов детальной разведки месторождения основное внимание при калибровке уделялось величине инфильтрационного питания и фильтрационным свойствам отложений. В итоге калибровки было достигнуто минимальное отклонение модельных и реальных напоров в водоносных горизонтах, что свидетельствует об адекватности построенной модели натурным условиям (рис. 11.24.).

На созданной модели выполнялись многовариантные расчёты технических и технологических решений по защите горных работ от отрицательного влияния подземных и поверхностных вод как в период строительства, так и при эксплуатации карьера (рис. 11.25).

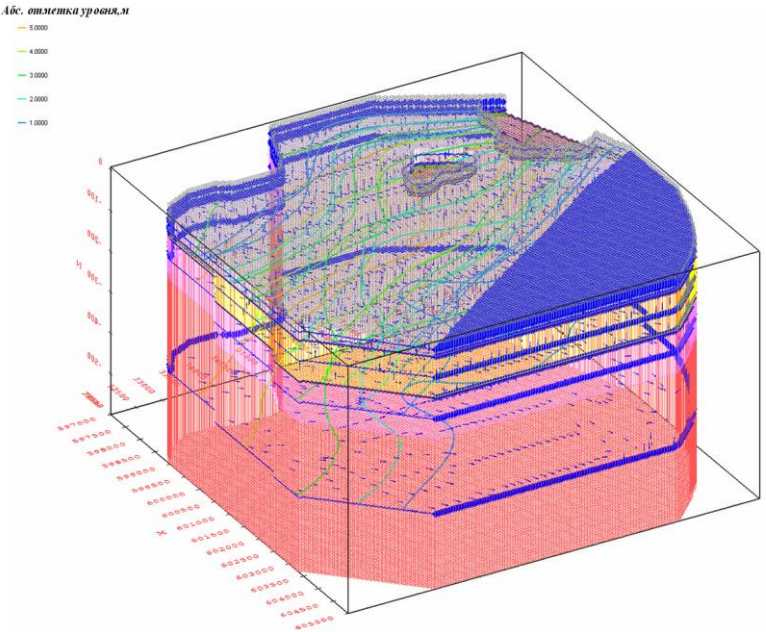


Рис.11.22. Геофильтрационная модель исследуемого района в аксонометрии

Многовариантное моделирование технических решений по управлению потоками подземных вод в данных природных условиях тесно связано с необходимостью детального рассмотрения влияния поверхностных вод морского залива и реки на качественные показатели воды, откачиваемой дренажными устройствами. Для решения этой задачи созданная в MODFLOW геофильтрационная модель была дополнена разработанной моделью массопереноса в модуле MT3D. Программа MT3D основана на конечно-разностной дискретизации пространства и времени и представлении частных производных уравнения массопереноса системой алгебраических уравнений с использованием различных методов их решения. Для данной задачи использовался метод решения на основе алгоритма Рунге – Кутта четвёртого порядка. В качестве индикатора загрязнения подземных вод принята величина минерализации. Граничные условия 1 рода задавались в заливе и по реке, которые рассматривались как постоянно действующие

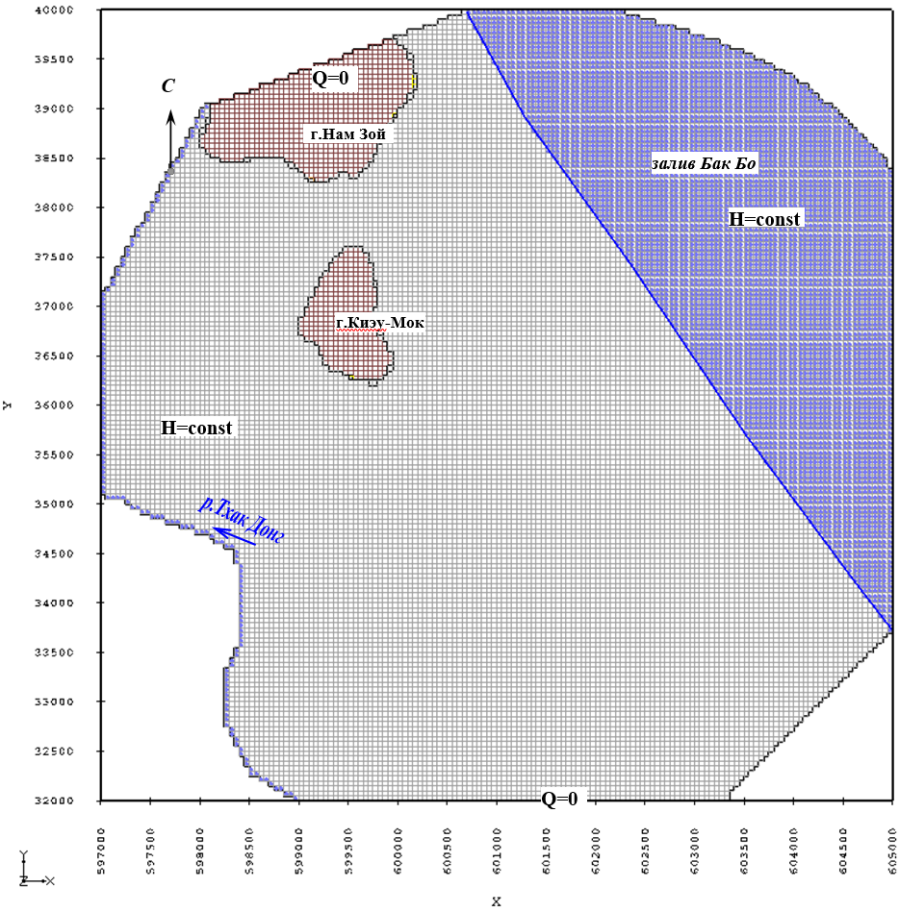


Рис.11.23. Фильтрационная модель в плане

источники повышенной минерализации. Был реализован, в том числе, наихудший вариант загрязнения подземных вод, т.е. в источниках приняты максимальные значения минерализации. Для водоносных горизонтов заданы следующие параметры: пористость, коэффициент молекулярной диффузии, коэффициент сорбции, продольная дисперсия и отношение параметров продольной и поперечной дисперсии. В конечном варианте параметры соответствовали химически неактивному флюиду. Модель разработана для нестационарного режима. Некоторые результаты решения прогнозных задач в увязке с развитием горных работ и системы защиты карьера от обводнения приведены на рисунках 11.26 и 11.27. Из данных моделирования следует, что

количество воды с повышенной минерализацией на конечный период отработки карьера увеличилось от 0 до 89 % суммарного расхода дренажных скважин.

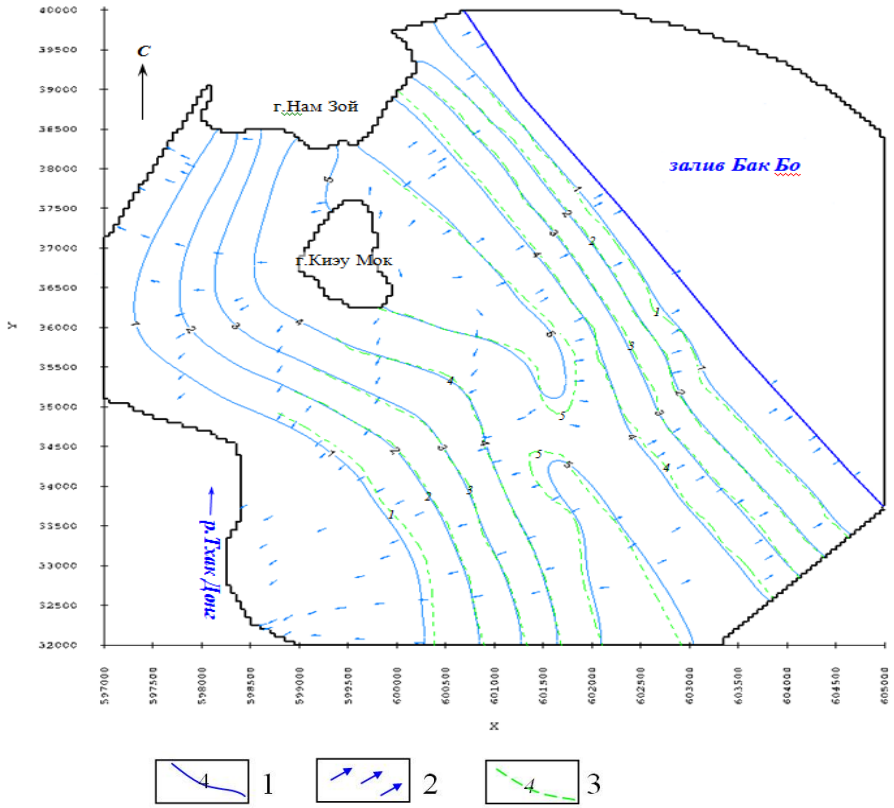


Рис.11.24. Карта гидроизогипс четвертичного водоносного горизонта

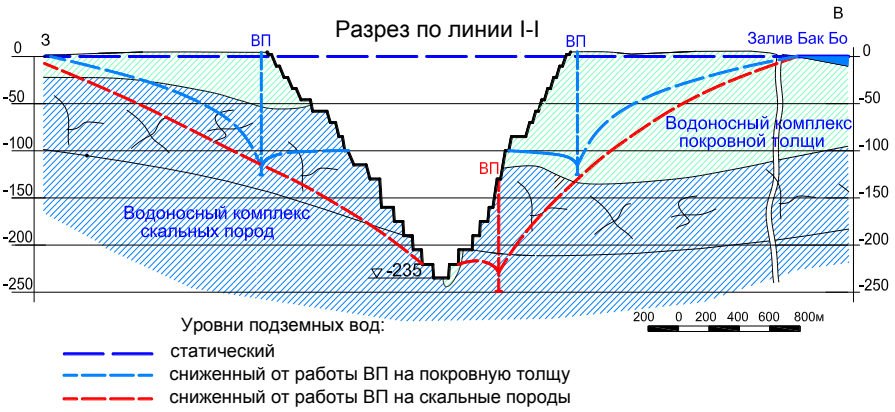
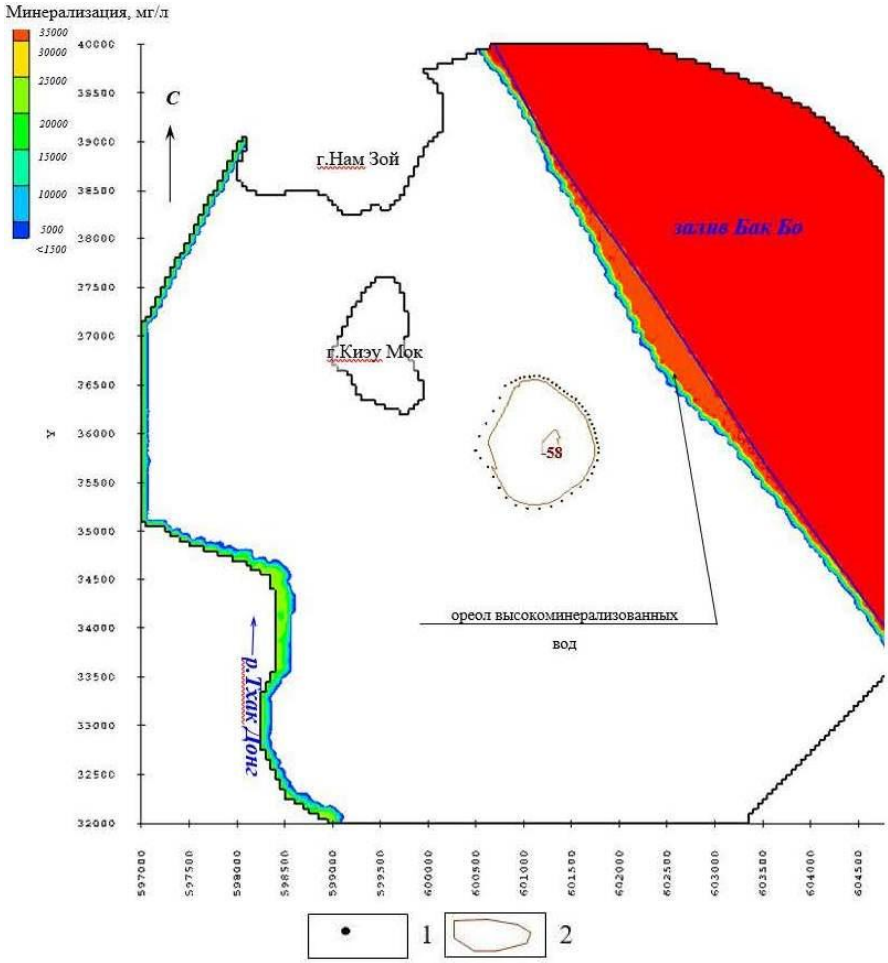


Рис.11.25. Вариант защиты карьера от подземных вод в период его эксплуатации

11.2.4. Модель хвостохранилища

Объектами горного предприятия, оказывающими существенное влияние на водные ресурсы региона и обводнённость горных выработок, являются хвостохранилища, поля фильтрации и участки выщелачивания ценных компонентов. Эти объекты являются дополнительными источниками пополнения запасов подземных вод и изменения их качественного состава. При оценке воздействия на водные ресурсы, как правило, используют модули MODFLOW и MT3D. Однако весьма содержательную информацию можно получить также комбинацией программ MODFLOW и MODPATH. Программа MODPATH, используя результаты моделирования потока подземных вод в MODFLOW, вычисляет траектории движения частиц в потоке и определяет время, за которое они достигают заданных границ. Алгоритм для расчёта траекторий движения частиц в потоке воды, разработанный в программе, полуаналитический и реализован как для стационарной, так и нестационарной фильтрации. Он основан на линейной интерполяции вычисления скорости потока в ячейках конечно-разностной сетки и позволяет в необходимых случаях определять траектории движения частиц как вниз, так и вверх по потоку. В программе MODPATH реализованы варианты гидрогеологической схематизации:

- сетки прямоугольные в плане и непрямоугольные по вертикали;
- водоносные горизонты со свободной поверхностью;
- планово-пространственная фильтрация.

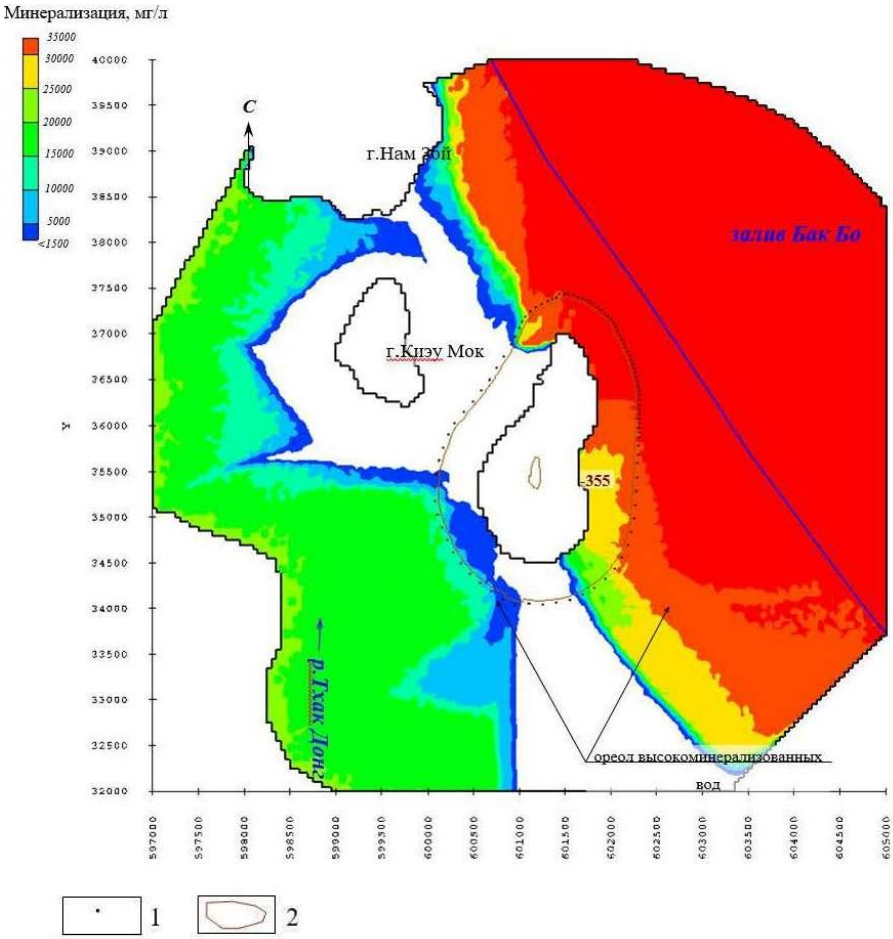


1 – дренажная скважина;

2 – контур карьера.

Рис.11.26. Изменение минерализации подземных вод при строительстве карьера

Для учёта сорбционных процессов в исходной информации вводится коэффициент замедления. Программа позволяет анализировать участки перетекания подземных вод из одного водоносного горизонта в другой.



1 – дренажная скважина; 2 – контур карьера.

Рис. 11.27. Изменение минерализации подземных вод через 37 лет работы карьера

Управление потоками инфильтрационных вод выполнялось на моделях для разработки технических решений расширения хвостохранилища и затопления карьера. На участке расположения хвостохранилища в результате увеличения его объёма и изменения расхода инфильтрации прогнозировался

подъём уровня подземных вод до критических отметок. Потребовалось разработать технические решения для его понижения на прилегающей к хвостохранилищу территории. Оценка предлагаемых вариантов выполнялась на созданной модели фильтрации в GMS MODFLOW и вычисления ореола захвата в MODPATH (рис. 11.28).

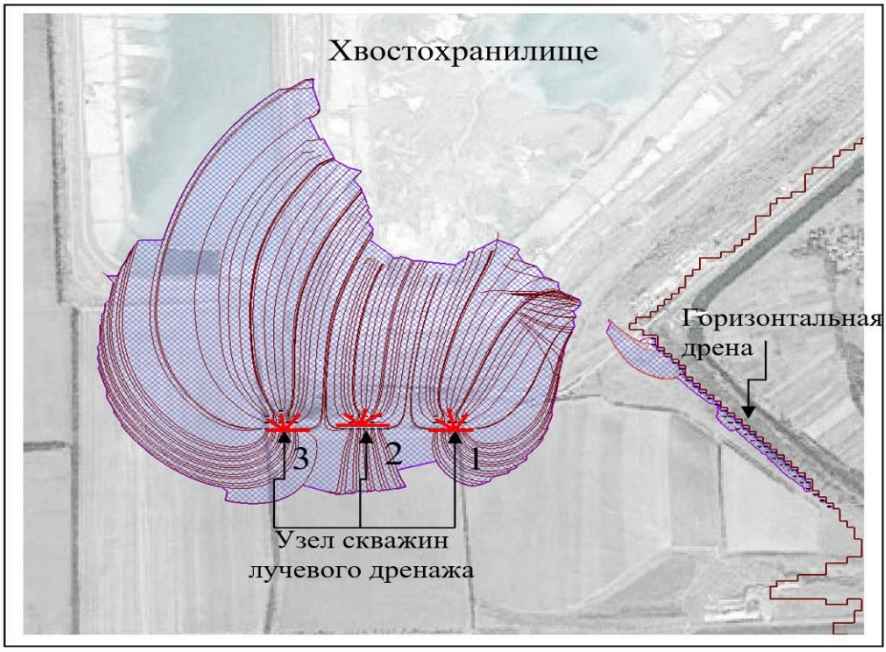


Рис. 11.28. Ореол захвата инфильтрационного потока из хвостохранилища скважинами лучевого дренажа

С использованием программ MODPATH и MODFLOW рассматривались на модели условия затопления карьера подземными водами с поддержанием уровня на заданных отметках в пределах участка борта карьера (рис.11.29). На моделях хвостохранилища и карьера задавались граничные условия I и III рода, формировались наборы частиц для определения ореола захвата и времени его формирования при различных вариантах защитных сооружений для перехвата потока подземных вод и увеличения глубины залегания их уровня от поверхности земли. Полученная на модели информация использовалась при разработке проектной

документации для защиты территории прилегающей к карьеру и хвостохранилищу от подтопления инфильтрационным потоком из технических водоёмов.

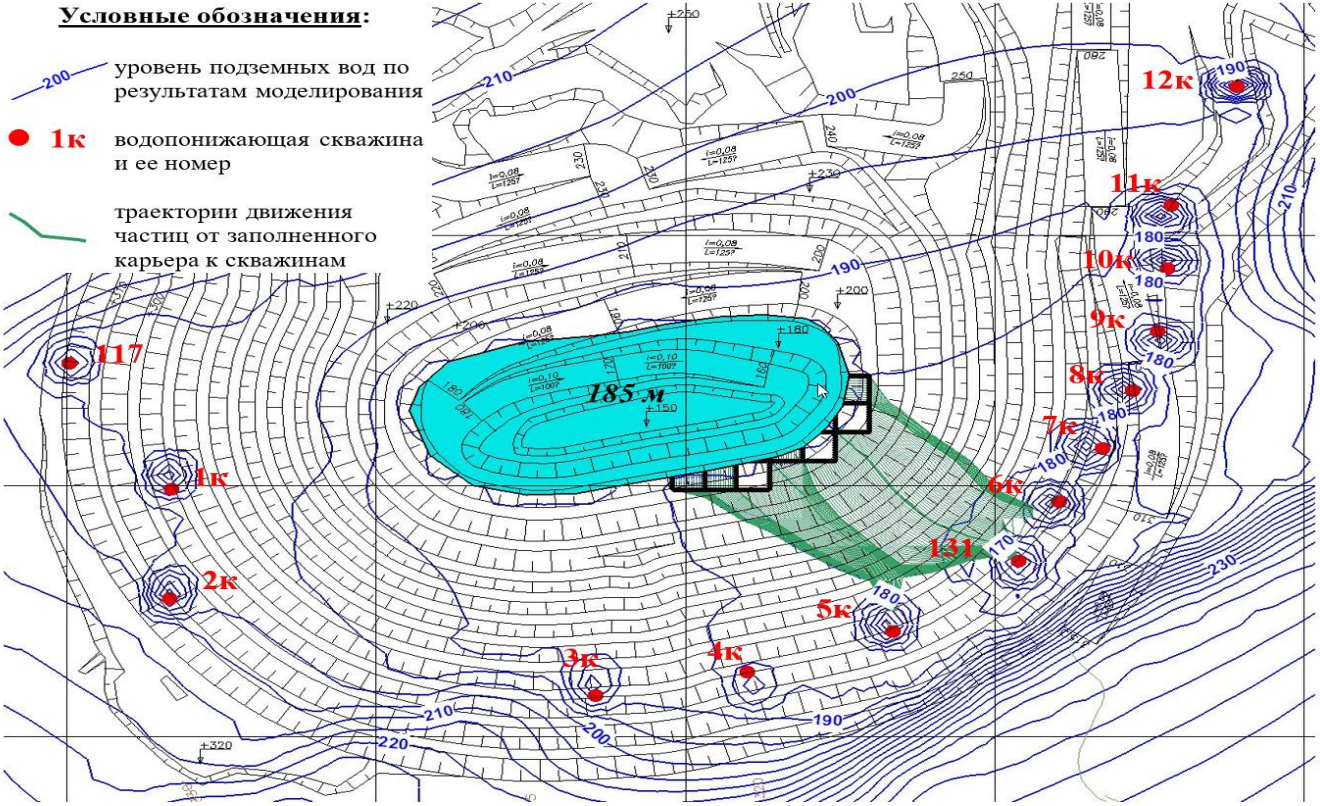


Рис. 11.29. Ореол захвата инфильтрационного потока из затопленного карьера

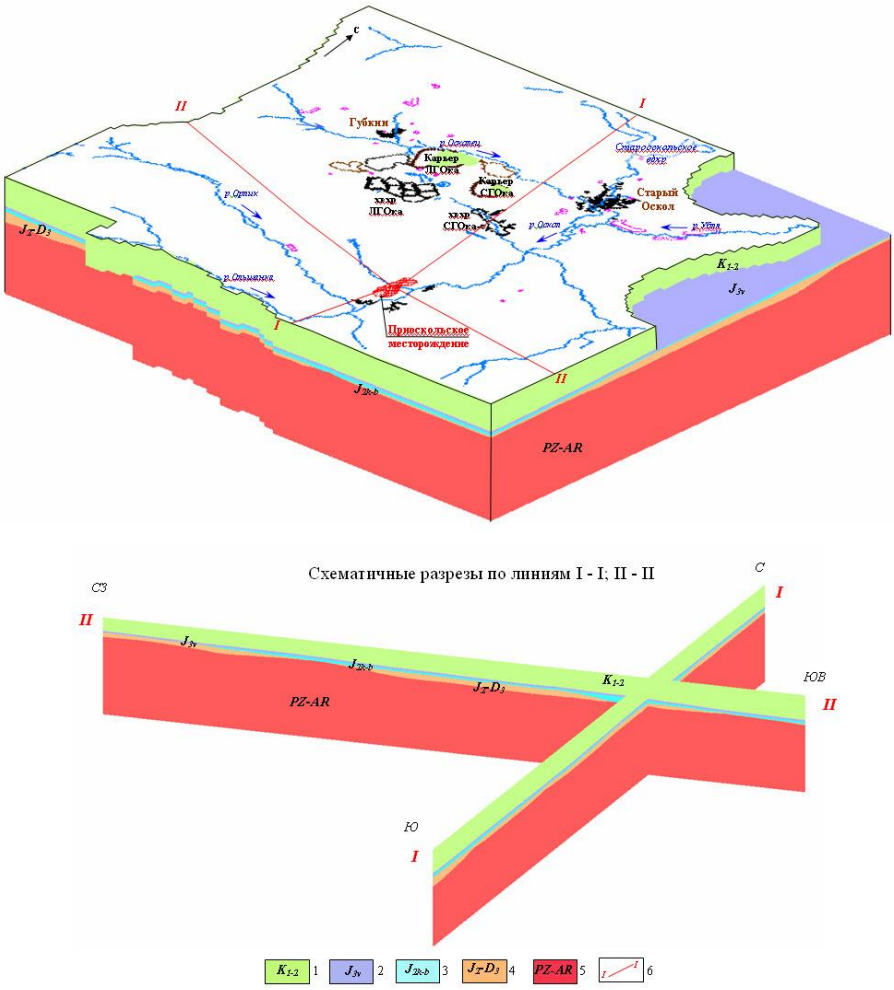
11.2.5. Региональная постоянно действующая модель

Район, для которого реализована постоянно действующая модель (ПДМ), представляет многоугольник размерами 45,0 х 65,5 км общей площадью 2947,5 км^2 [339]. Размеры моделируемой территории определялись наличием депрессионных воронок по верхнему и нижнему водоносным комплексам от работы систем осушения действующих горнодобывающих предприятий и крупных водозаборов. Внешние границы модели проведены таким образом, чтобы учесть имеющиеся на территории гидротехнические и водозаборные сооружения (водохранилища, водозаборы, системы осушения карьеров и т.д.), месторождения твёрдых полезных ископаемых перспективные к отработке. На севере граница проходит в широтном направлении примерно по линии водораздела рек, захватывая водохранилище. На западе и востоке границы площади моделирования обозначены по гидроизогипсам верхнего водоносного комплекса. На юге граница принята в широтном направлении по реке и далее смыкается с восточной границей модели.

Результаты построения гидродинамической модели изучаемой территории представляют собой огромный массив природной и антропогенной информации.

На начальной стадии разработки гидродинамической модели была создана геологическая основа, на которой в дальнейшем актуализировались во времени и в пространстве следующие пакеты информации как природного, так и техногенного происхождения (рис. 11.30):

- гипсометрия моделируемых пластов;
-гидрогеологические параметры основных водоносных и слабопроницаемых слоёв;
- величина интенсивности инфильтрационного питания;
- абсолютные отметки урезов и дна рек и водоёмов;
- проводимость ложа рек и водоёмов;
- фактические уровни водоносных горизонтов и комплексов (по наблюдательным скважинам);
- скважинный водоотбор из водоносных горизонтов и комплексов;
- водоотливы из карьеров и шахт;
- местоположение водозаборов, гидротехнических сооружений, шахты и дренажных систем карьеров с абсолютными отметками уровней заложения дренажа;
- проводимость дрен;
- другие количественные и качественные данные о природной среде и техногенной нагрузке.



1 – верхний водоносный комплекс (мел и песок); 2 – водоупор юрских глин; 3 – юрский водоносный горизонт (песок); 4 – водоупор юрских, каменноугольных и девоских глин; 5 – нижний водоносный комплекс (известняк, песок и трещиноватые рудно-кристаллические породы); 5 – линия разреза.

Рис.11.30. Геологическая основа ПДМ с водоёмами, водотоками и техногенными объектами

Гипсометрия модулируемых слоёв строилась на основе имеющихся исходных данных разведочных работ. В результате анализа и обработки геологоразведочных данных были построены карты изолиний мощностей основных водоносных горизонтов и комплексов, которые стали основой для

построения карт изолиний кровли и подошвы водоносных толщ и разделяющих их водоупоров.

Для модели построены карты гипсометрии:

1. Подошвы пород верхнего водоносного комплекса – по фактическим данным разведочных работ;

2. Подошвы юрских глин волжского яруса, являющихся региональным водоупором – путём прибавления мощности глин к отметкам подошвы песков сеноманского и неоком-аптского возрастов;

3. Подошвы пород юрского водоносного горизонта – путём прибавления мощности песков юрской системы к отметкам подошвы глин волжского яруса;

4. Кровли пород нижнего водоносного комплекса – путём прибавления мощности отложений каменноугольной и девонской систем к отметкам кровли пород архей-протерозойского возраста;

5. Кровли пород архей-протерозойского водоносного комплекса – по фактическим данным разведочных работ.

Исходные значения проводимости водоносных горизонтов принимались по данным многочисленных опытно-фильтрационных работ, опробований одиночных скважин, кустовых откачек и по результатам решения обратных задач при создании моделей систем осушения действующих карьеров. На части территории использовали метод интерполяции с учётом анализа сходства геолого-структурных и литолого-фациальных условий.

Значения коэффициентов перетекания разделяющих слоёв вычислялись в программе автоматически с учётом выдержанности в плане и в разрезе мощности и литологического состава слабопроницаемых пластов.

Абсолютные отметки уровней подземных вод водоносных горизонтов и комплексов принимались на основании замеров, проводившихся в рамках режимных наблюдений в скважинах, входящих в стационарную режимную сеть.

Величина проводимости подрусловых отложений поверхностных водотоков по данным опытных откачек принималась равной 10^{-2} - 10^{-4} 1/сут. Параметры проводимости ложа гидротехнических сооружений изменялись на модели пропорционально увеличению площади зеркала воды водоёмов и мощности отложений.

Инфильтрационное питание по площади принималось исходя из среднемноголетнего модуля подземного стока 50 % обеспеченности. Увеличенное инфильтрационное питание задавалось на промплощадках, отвалах, а также на территории городской застройки.

Дискретизация выбранного полигона была выполнена прямоугольной сеткой с шагом 500 х 500 м по большей части площади модели, в районе месторождений размеры ячеек составляли 125х125 м и 60х60 м (рис. 11.31).

Адекватность региональной гидродинамической модели реальной ситуации в регионе достигалась решением обратной задачи (эпигнозное моделирование) с корректировкой краевых условий, природных и техногенных параметров. На модели использованы граничные условия I, II и III рода.

Калибровка модели проводилась по наиболее чувствительным параметрам фильтрационных свойств водоносных горизонтов и комплексов, условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод, фильтрационных свойств слабопроницаемых отложений (параметров перетекания) и величины инфильтрационного питания. Средняя величина погрешности по уровням подземных вод и величинам расходов систем осушения при калибровке составила 1,9 % (рис.11.32).

Разработанная модель используется при мониторинге режима водных ресурсов региона, модернизации систем защиты горных объектов от отрицательного воздействия подземных вод, разработке мероприятий по рациональному использованию подземных и поверхностных вод, при оценке водопритоков к карьерам и шахтам намечаемых к отработке месторождений. Разработка была выполнена в модуле MODFLOW GMS. На основе региональной модели создавались крупномасштабные локальные модели по тому или иному объекту [339]. В комплексе с вышерассмотренными модулями (MT3D и др.), имеющимися в GMS рассматривались различные задачи природного и технического характера для объектов горных предприятий.

11.2.6. Модель промплощадки

Достаточно часто на горных предприятиях требуется решать задачи, связанные с водоносными слоями и прослоями неглубокого залегания. Обычно это является следствием взаимодействия природных и техногенных факторов. Для решения таких задач требуется, как правило, детальное расчленение фильтрационно-неоднородных пород верхней части разреза.

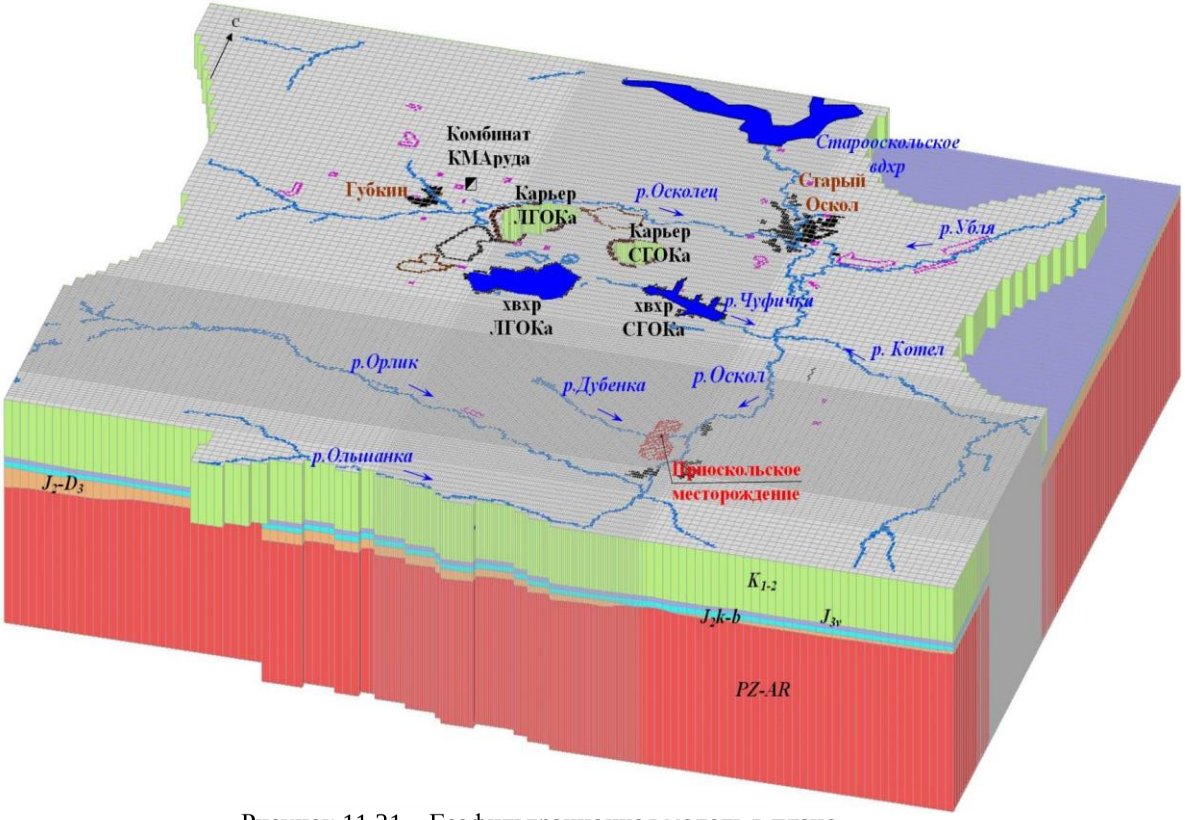


Рисунок 11.31. Геофильтрационная модель в плане

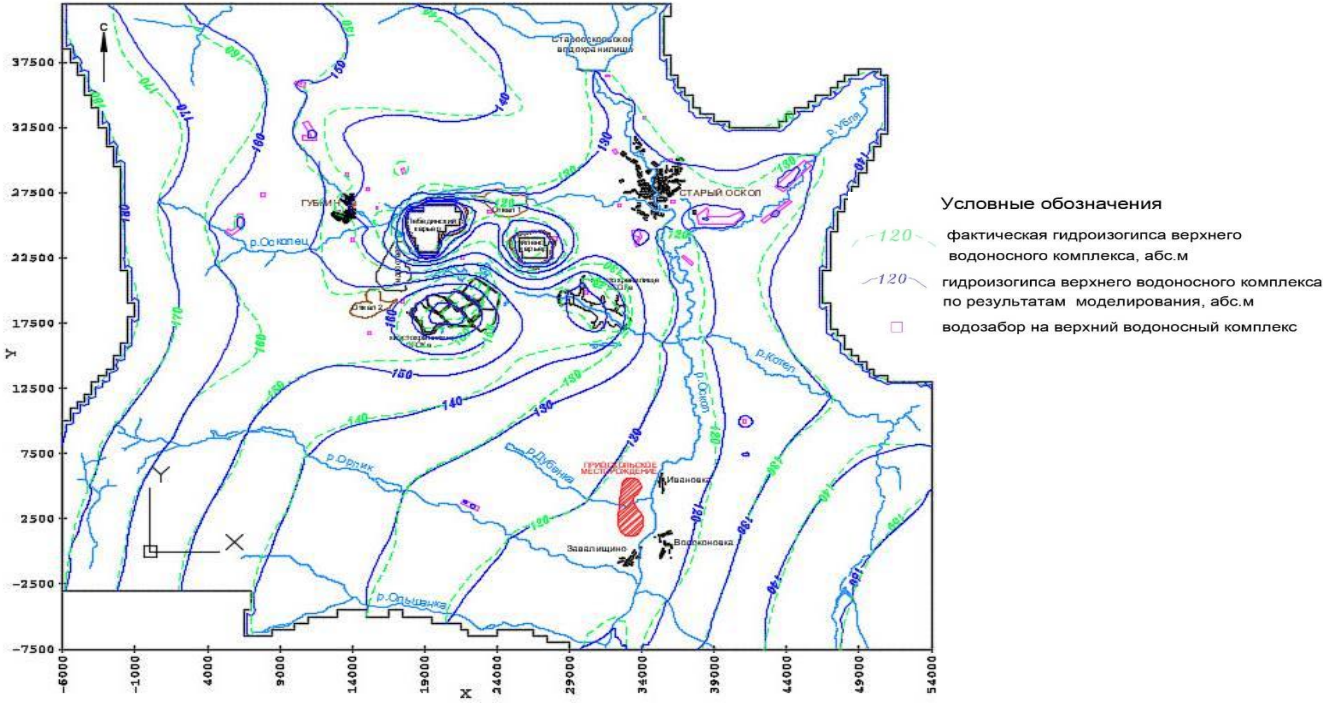


Рисунок 11.32. Результат эпигнозного моделирования

11.2.6.1. Модель промплощадки в простых природных условиях

В качестве примера рассмотрим промплощадку, на которой уровень грунтовых вод залегал на глубине 0,5 м от поверхности земли. В геологическом строении исследуемой территории до глубины 20-40 м принимали участие: техногенные (tQ_{IV}) образования, верхнечетвертичные современные эолово-делювиальные (vdQ_{III-IV}) отложения, нерасчленённые неоген-четвертичные (N_2-Q) отложения. Для разработки инженерных мероприятий по защите от подтопления производственных объектов на промплощадке создана численная модель в модуле MODFLOW GMS. Границы области моделирования были увязаны с направлением фильтрационного потока подземных вод, наличием объектов техногенной нагрузки, влияющих на режим подземных вод, и радиуса влияния, предполагаемых элементов системы водопонижения.

Гидрогеологическая схематизация выполнялась в следующей последовательности:

- определение типа гидрогеологической структуры;
- гидрогеологическая стратификация разреза;
- установление гидродинамического режима подземных вод;
- выделение гидродинамических зон в разрезе;
- определение условий питания - разгрузки подземных вод;

В расчётной схеме выделено 7 слоёв (сверху вниз):

1 водоносный горизонт в уплотнённых техногенных образованиях (tQ_{IV});

2 водоносный горизонт современных верхнечетвертичных и нерасчленённых неоген-четвертичных суглинков (vdQ_{III-IV} - N_2-Q);

3 относительно водоупорный горизонт неоген-четвертичных глин (N_2-Q);

4 водоносный горизонт неоген-четвертичных суглинков (N_2-Q);

5 относительно водоупорный горизонт (прослой) неоген-четвертичных глин (N_2-Q);

6 водоносный горизонт неоген-четвертичных суглинков (N_2-Q);

7 относительно водоупорный горизонт неоген-четвертичных глин (N_2-Q).

Пространственная дискретизация промплощадки размерами 2,08 х 1,69 км выполнена прямоугольной сеткой. Размеры призм по осям х и у равны 10 м, по оси z - мощности рассматриваемого слоя (рис. 11.33).

На внешних контурах модели задавались граничные условия I-го рода (H=Const) и II-го рода (Q=0), при расчёте дренажных мероприятий добавлены граничные условия II-го рода (Q=const), и III-го рода (Drain, Barrier).

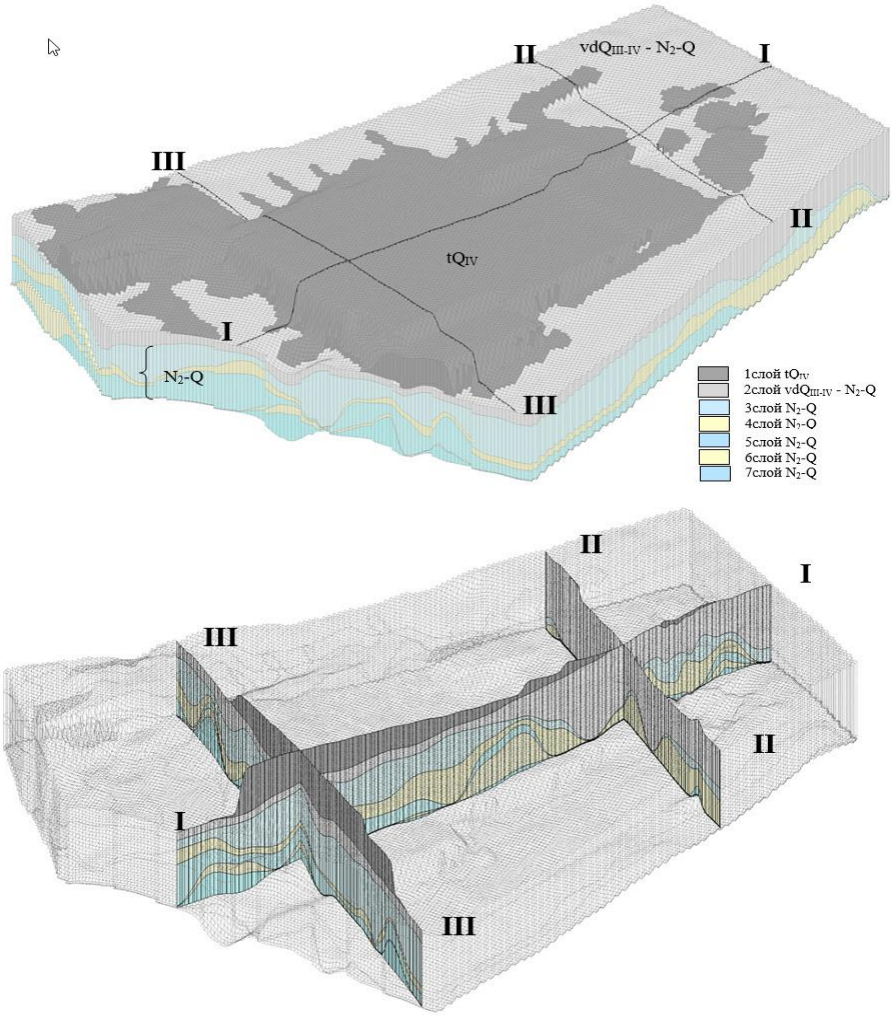


Рис. 11.33. Геофильтрационная модель промплощадки

Калибровка модели выполнена методом последовательного приближения, исходя из значений фильтрационных параметров, инфильтрационного питания и непротиворечивости результатам гидрогеологических исследований, проведенных на территории промплощадки. Исходная информация корректировались до приемлемой сходимости между модельными и наблюдаемыми уровнями грунтовых вод. Погрешность по уровням грунтовых вод была достигнута от 1,0 до 5,5 %. На

графике сходимости видно, что вычисленные значения расположены по обе стороны и в непосредственной близости от диагональной линии (рис. 11.34). Результаты решения «обратной» задачи указали на то, что разработанная геофильтрационная модель адекватно отражает гидродинамическую обстановку, сложившуюся на промплощадке и может использоваться для прогнозных и технологических расчётов.

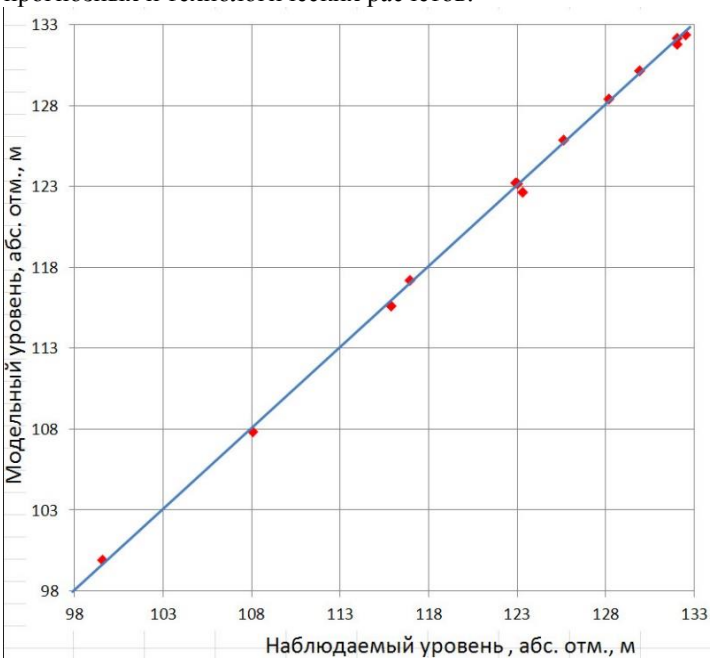


Рис. 11.34. График сходимости фактических и модельных значений

На созданной геофильтрационной модели проработаны пять вариантов инженерной защиты от подтопления грунтовыми водами производственных объектов промплощадки. Два из них с комбинацией противофильтрационной завесы и водопонижающих скважин приведены на рис.11.35 и лучевого дренажа на рис. 11.36.

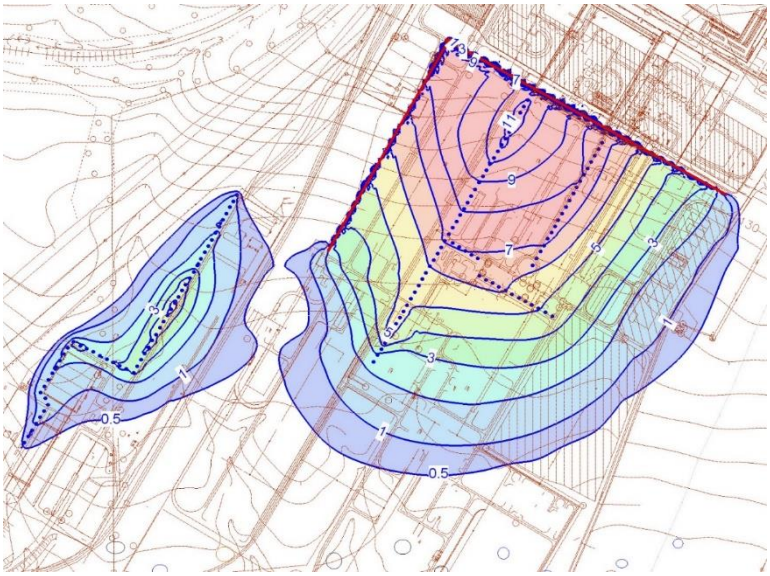


Рис. 11.35. Защита противофильтрационной завесой и водопонижающими скважинами

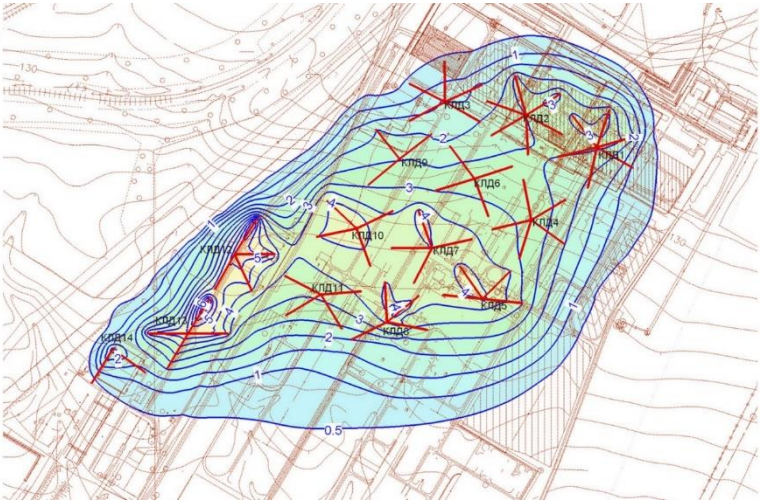


Рис. 11.36. Защита лучевым дренажом

11.2.6.2. Модель промплощадки в сложных природных условиях

Застройка промплощадки ведётся в зоне избыточного увлажнения непосредственно на берегу Кольского залива, где амплитуда колебания уровня моря за счёт приливов – отливов составляет более 5,0 м, что влияет на глубину залегания уровня подземных вод. Технология ведения производственных работ предполагает также затопление отдельных участков промплощадки и соединение их с морской акваторией.

Склоновая часть промплощадки изрезана оврагами и балками, которые аккумулируют поверхностный сток, и образованные ручьи служат дополнительным источником подтопления объектов строительства. Во время весеннего половодья, сезонных паводков и ливневых дождей уровень грунтовых вод повышается на 1,5 – 2,0 м.

Инженерно-геологическое строение площадки характеризуется развитием техногенных грунтов (tIV), биогенных (bIV), верхнечетвертичных морских (mIII-IV), нерасчленённых флювиогляциальных и ледниковых отложений (fg,gIII), а также кристаллических образований архея (Ar).

Подземные воды распространены в кристаллических и в перекрывающих их четвертичных отложениях. На территории промплощадки грунтовые воды в основном встречены пройденными выработками на глубине от 0 до 4 м. В насыпных грунтах площадки вскрыты грунтовые воды временного характера типа «верховодка» на глубине 0,4-1,8 м.

Для разработки инженерных мероприятий по защите от подтопления производственных объектов созданы гидрогеологические модели в модуле MODFLOW GMS.

Модели разрабатывались в три этапа:

1. Анализ и компьютерная обработка исходной информации.
2. Построение геофильтрационной модели.
3. Калибровка модели.

На первом этапе проведена обработка исходной гидрогеологической и геологической информации исследуемого района, сформированы базы данных с использованием модулей программного комплекса GMS – 2D Scatter Point, 2D Grid, Map.

При построении геофильтрационных моделей реализована трехслойная расчётная схема:

1 слой - водоносный горизонт в техногенных породах отсыпки;

2 слой – подземные воды четвертичных отложений;

3 слой – подземные воды трещиноватых кристаллических пород.

Область моделирования для одной из моделей размерами 3,5 х 1,8 км разбита прямоугольной сеткой. Размеры призм по осям X и Y составляют 10

м, по оси Z – равны мощности рассматриваемого слоя (рис. 11.37).

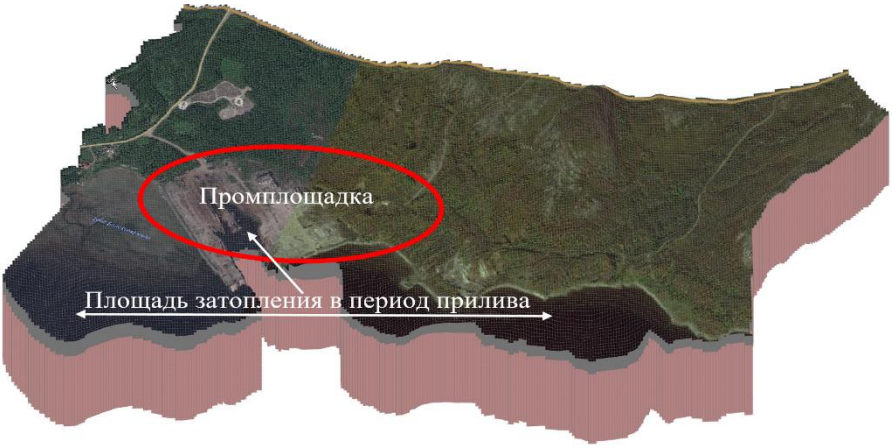


Рис. 11.37. Схема геофильтрационной модели в аксонометрии

На моделях задавались граничные условия I-го рода, II-го рода и III рода (River, General Head, Drain).

Калибровка численных моделей проводилась путём решения «обратной задачи», производился подбор величины инфильтрационного питания, коэффициентов фильтрации, параметра взаимосвязи поверхностных вод с подземными в пределах отдельных зон моделируемой площади с одновременным контролем положения уровней подземных вод. Невязка модельных балансовых расчётов в целом не превышает 0,0005 %, что ниже допустимых погрешностей.

Были выполнены прогнозы водопритоков к объектам первоочередного строительства и разработаны варианты их защиты от подтопления подземными водами и влияния морского прилива.

Рассмотрены варианты защиты объектов промплощадки с использованием закрытых водоотводных канав, трубчатого, лучевого и пластового дренажа.

На рис. 11.38 приведена глубина залегания уровня подземных вод на промплощадке в период прилива после строительства пластового дренажа.

За счёт прилива морской воды водоприток к дренажным устройствам увеличивался более чем на 100 $м^3$/час.

На разработанных фильтрационных моделях выполнен также прогноз притоков подземных вод в дренажную систему при формировании засыпки в

долинах ручьёв. Расчёты выполнялись с учётом конструкции и технологии формирования засыпки в долинах (рис. 11.39).

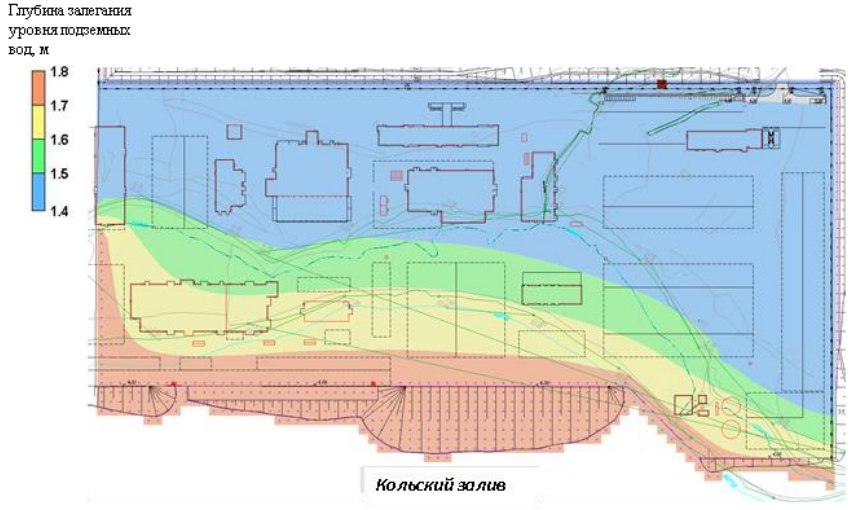


Рис. 11.38. Глубина залегания уровня подземных вод на промплощадке в период прилива при реализации пластового дренажа

В результате расчётов получены притоки к дренажной системе каждого из отсеков засыпки за счёт подземных вод и инфильтрационного питания и оценена эффективность проектных решений.

11.2.7. Модель отвального массива

Горнопромышленный ландшафт предприятий, разрабатывающих месторождения открытым способом, характеризуется значительным объёмом перемещённой рудной и нерудной горной массы, которая складируется в отвалы и изменяет геоморфологию окружающей среды. Отвалы аккумулируют атмосферные осадки, что негативно влияет на их устойчивость, и одновременно являются источниками формирования инфильтрационных вод сложного качественного состава.

Как пример, рассмотрен существующий отвал, расположенный на склоновой поверхности и ограниченный с трёх сторон балками. Согласно проекту, для складирования вскрышных пород намечается постоянное

наращивание отвального массива, а также использование дополнительной площади земельного отвода.

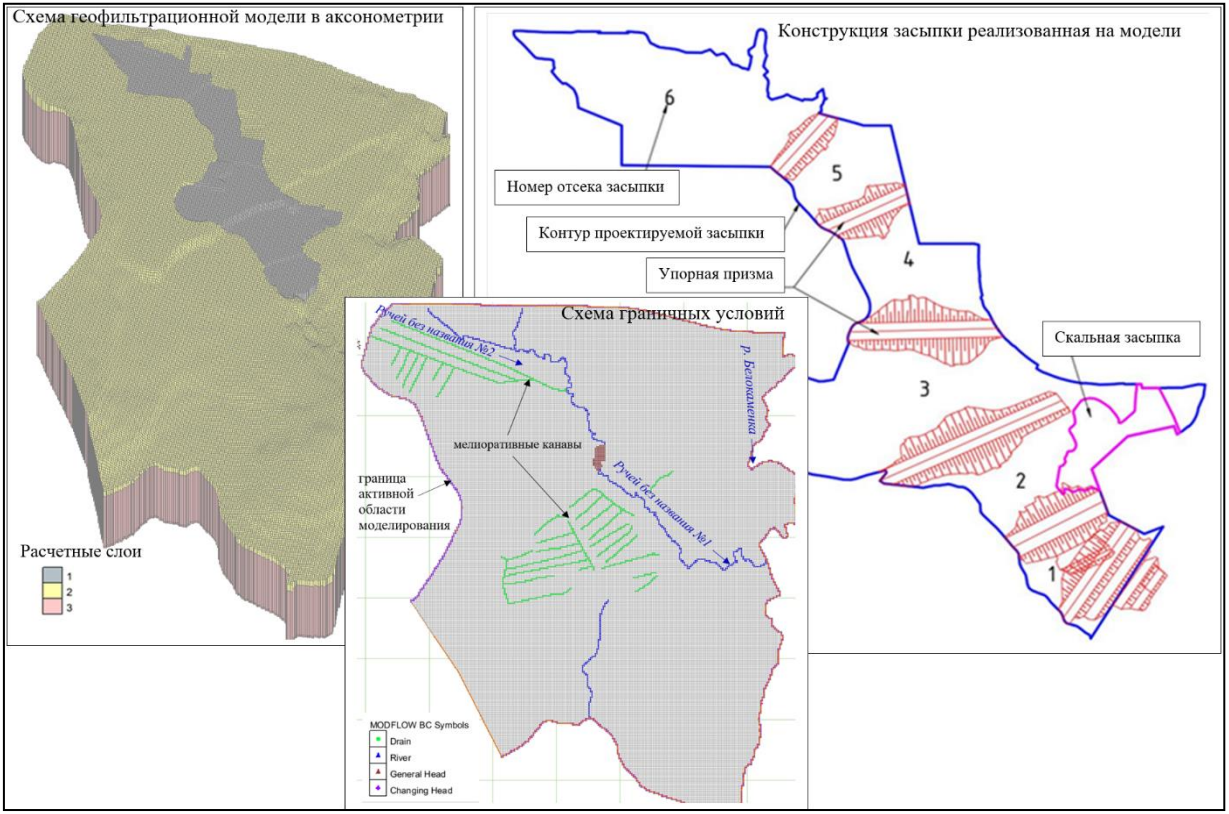


Рис. 11.39. Схема модели «врезки» с элементами проектных решений

Основание отвала сложено осадочными породами – суглинками, глинами и известняками неоген-четвертичного возраста. По периметру на пониженных участках наблюдаются выходы подземных вод.

Для оценки влияния обводнённости отвала на физико-механические свойства основания, воздействия отвала на окружающую среду и эффективности проектных решений по его конструкции построены численные модели геофильтрации и массопереноса подземных вод. Использованы программы MODFLOW, MT3D и SEEP2D.

В ходе расчётной схематизации выделены сверху вниз:

1 слой – водоносный современный техногенный горизонт;

2 слой – четвертичный водоносный горизонт лессовидных суглинков;

3 слой – неоген-четвертичные водоупорные глины;

4 слой – водоносный горизонт неогеновых известняков.

Исследуемая область фильтрации 1,52 х 2,7 км была разбита прямоугольной сеткой: по оси х - на 61, а по оси у - на 108 блоков (рис. 11.40). Размеры призм по осям х и у составили 25 м, по оси z – равны мощности рассматриваемого слоя.

На модели реализованы граничные условия I рода (H=const, C= const), и III рода.

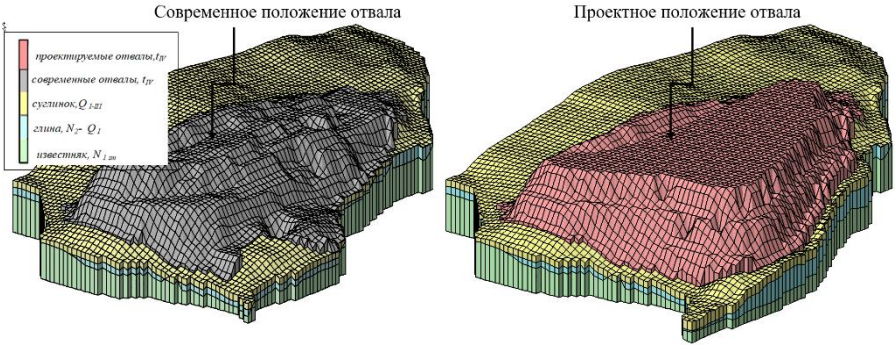


Рис. 11.40. Геофильтрационная модель отвального массива

При схематизации природной среды, в которой происходит миграция подземных вод, принимались во внимание:

1 – конвективный перенос, т.е. перенос под воздействием гидравлического градиента;

2 – процессы диффузии и дисперсии, обусловленные гетерогенными свойствами пород;

3 - активная пористость водовмещающих пород.

Калибровка выполнена на геофильтрационной и геомиграционной моделях. Критерием сходимости служили гидродинамические и гидрохимические показатели, определённые в ходе инженерно-геологических исследований.

Прогноз уровней и качественного состава подземных вод выполнен с учётом конструкции отвала (рис.11.41). По результатам прогнозных расчётов сделан вывод о степени увеличения экологической нагрузки на окружающую среду за счёт дальнейшей отсыпки отвала.

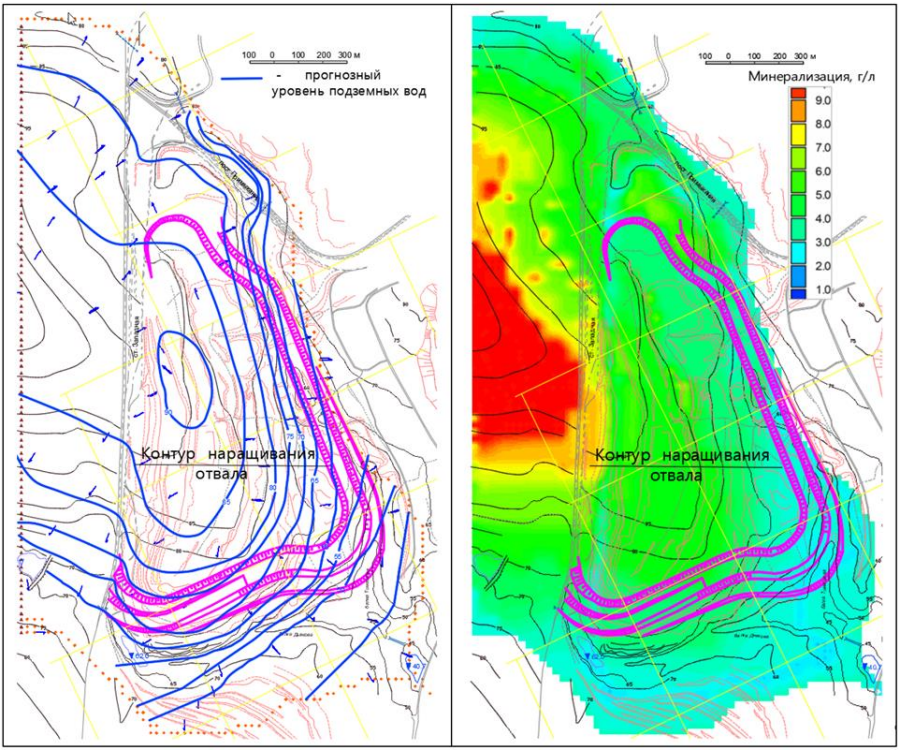


Рис. 11.41. Прогнозное распределение уровней и минерализации грунтовых вод

Выполненные расчёты показали, что расширение отвала приведёт к изменению гидродинамического режима подземных вод как в теле, так и в его основании. Подъём уровней увеличит площадь обводнённых пород, залегающих выше погребённого рельефа.

Прогнозное изменение минерализации подземных вод вызвано с одной стороны – незначительным продвижением границы высоко минерализованных вод на западе отвала, а с другой стороны - постоянно протекающим процессом уменьшения концентрации в связи с повышенной инфильтрацией ультрапресных атмосферных осадков. Площадь, на которой будет происходить процесс распреснения, увеличится в связи с расширением отвала, минерализация подземных вод на этом участке также незначительно снизится. На структуру фильтрационных потоков будут оказывать влияние балки, расположенные на территории, прилегающей к отвалу.

Каждый участок отвала, исходя из литологии отложений, слагающих их основания, геоморфологии, условий разгрузки, состава вскрышных пород, обладает своими, индивидуальными особенностями накопления и инфильтрации атмосферных осадков. Неравномерная обводнённость влечёт за собой различную степень устойчивости участков отвала.

Для анализа депрессионной кривой на разных участках отвального массива и определения параметров устойчивости отвала и его основания решались профильные задачи по выделенным разрезам. Пример профильной задачи с вычисленной депрессионной поверхностью приведен на рис. 11.42.

Одновременно с построением профильных моделей были выполнены расчёты критических градиентов и скоростей фильтрации, при которых происходит общее нарушение фильтрационной устойчивости горных пород, а в областях выходов фильтрационного потока из-под подошвы отвалов нарушается местная фильтрационная устойчивость отвалов и начинаются суффозионные процессы.

По результатам решения профильных задач и полученным на моделях максимальным скоростям потока были сделаны выводы о суффозионной устойчивости по периметру существующего и проектируемого отвалов.

11.2.8. Пространственная модель горнорудного региона

В горнодобывающих регионах, как правило, развиваются два противоположных по направлению процесса - осушение пород, связанное с откачкой воды из горных выработок, и обводнение ненасыщенных грунтов в результате сооружения хвостохранилищ, прудов-накопителей воды, каналов. Фильтрация воды носит в таких условиях сложный характер, и для решения прогнозных задач применялась пространственная модель на основе модуля FEMWATER, в котором использован метод конечных элементов, позволяющий разрабатывать модели фильтрации для любой среды, в том числе и для разноплотностных жидкостей.

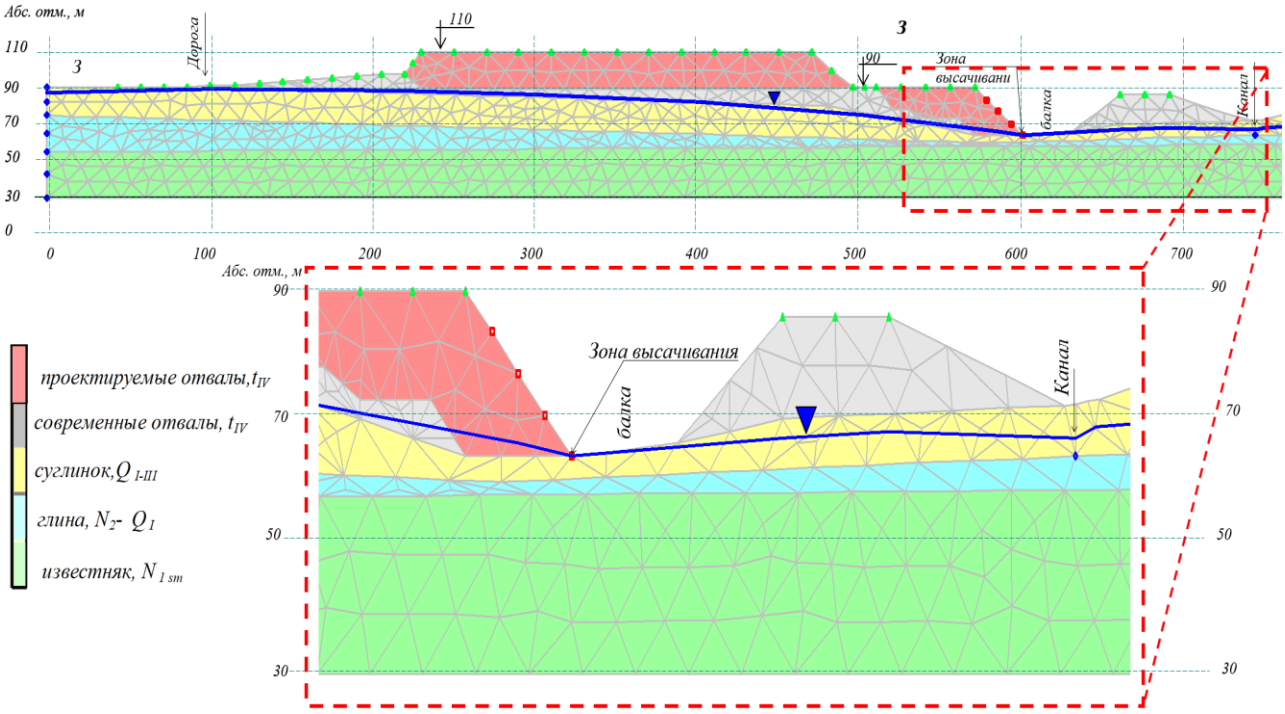


Рис. 11.42. Профильная модель фильтрации через тело отвала

Постановка задачи основывалась на необходимости получения прогноза подъёма уровня подземных вод на застроенной территории, в окрестностях которой расположены 2 хвостохранилища, обводной канал, пруд, отсыпаны отвалы горных пород и протекает река. Необходимо было решить задачу пространственной фильтрации в насыщенных и ненасыщенных породах при активном взаимодействии с поверхностными водотоками и водоёмами. Программа FEMWATER разработана для решения системы уравнений методом конечных элементов для моделирования пространственной фильтрации и массопереноса в пористых насыщенных и ненасыщенных средах. Движение жидкости описывается уравнением Ричардса [340]:

$$\frac{\rho}{\rho_{,,}}\frac{d\theta}{dh}\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla[k*(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_o}\nabla z)] + \frac{\rho^*}{\rho_o}q \ , \qquad (11.8)$$

где h - напор, м;

t -время, ч;

∇h -тензор проводимости, м/ч;

∇z -тензор потенциала напора, м;

θ - расход единичного источника/стока, $\frac{\text{м}^3/\text{ч}}{\text{м}}$;

ρ - плотность воды при концентрации С, кг/м^3;

ρ_o - плотность воды при С=0, кг/м^3;

ρ^* - плотность жидкости или вводимого флюида, кг/м^3;

q -влажность пород.

На первом шаге использовались модули Boreholes, Tins, 2D Mensches и 3D Mensches для разработки геологической модели исследуемого региона с учётом геометрии водопроводящих и водоупорных слоёв, типа пород, слагающих эти слои, а также других показателей стратиграфии и литологии. В модуле Boreholes (буровые скважины) строился геолого-стратиграфический разрез по всем скважинам, по каждой скважине задавались координаты *x, y* и *z* её расположения, координаты контактов моделируемых пластов и задавались породы, слагающие пласты. В качестве пород были определены следующие: суглинки для четвертичного водоносного горизонта; глины для разделяющего слой и пески, известняки для неогенового водоносного горизонта.

Следующим шагом было создание концептуальной геологической модели. Был определён полигон области, границы которого совпадали: с рекой на западе, по линии тока на юге, с хвостохранилищем на северо-востоке, обводным каналом и геоморфологическими элементами поверхности земли на юго-востоке, основу полигона составляла карта масштаба 1:25000.

После создания концептуальной модели полигон моделирования разбивался на треугольники в модуле 2D Mensches. Для создания

неравномерной треугольной сетки по всему полигону по границе концептуальной модели выбирались узлы исходя из условия сгущения сетки на участке от обводного канала в направлении населённого пункта и в его пределах. Затем с помощью автоматической триангуляции производилась разбивка области фильтрации на треугольники, удовлетворяющие критерию Деланю. В местах, требующих более детальной разбивки, размеры крупных треугольников уменьшались путём их последующего деления. Создание корректной треугольной сетки позволяет более точно решать задачи фильтрации.

Всего было создано в концептуальной модели 227 треугольников и 162 узла. Каждому треугольнику и узлу был присвоен соответствующий номер.

На основе созданной неравномерной сетки и геолого-стратиграфических разрезов по скважинам были построены поверхности кровли и подошвы моделируемых пластов в модуле Tins. Поверхности по каждому слою являлись основой для построения трёхмерных неравномерных элементов - треугольных призм. При создании трёхмерных элементов все слои были разбиты на подслои для корректного учёта фильтрационных параметров. В слое суглинков было выделено 3, глин 4 и песков-известняков 6 подслоёв.

Результатом была создана пространственная геологическая модель, которая с учётом разбивки каждого слоя на подслои содержала 2951 треугольных призм и 2268 узлов. Геологическая модель использовалась для разработки пространственной модели фильтрации. Размеры области фильтрации в плане и по глубине определялись на стадии разработки концептуальной модели и составили в плане около 25 км^2.

Для задания граничных условий был использован приём, разработанный авторами FEMWATER. Граничные условия области фильтрации могут быть исследованы с динамической, физической или математической точек зрения [340, 341]. С динамической точки зрения граничный сегмент (в нашем случае треугольная призма) может рассматриваться как непроницаемый или пропускающий поток воды. С физической точки зрения это может быть классифицировано как контакт между границами порода-порода, воздух-порода и вода-порода. С математической точки зрения граничный сегмент может быть классифицирован как один из четырёх типов граничных условий, а именно: 1 - описываемое уравнением Дирихле; 2 - Неймана; 3 - Кэйча; 4 - переменная граница во времени.

Для конкретной модели принималось условие Дирихле на границах с рекой, хвостохранилищем и обводным каналом по зависимости:

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t), \qquad (11.9)$$

где x_b, y_b и z_b - коэффициенты границ, м; h_d - напоры на границе области фильтрации, м.

По каждому слою на модели были определены соответствующие параметры, учитывающие природные и техногенные условия фильтрации подземных вод.

Были сформированы массивы исходных данных: по напорам, по изменению влажности, по проницаемости и по концентрации растворённых в воде веществ.

Начальные условия по напорам установлены как:

$$h = h_i(x, z) \qquad (11.10)$$

в области R, где R - область фильтрации, ограниченная граничными условиями, м^2; h - уровни для начальных условий, м.

Для геологических слоёв по направлениям x, y и z были заданы осреднённые коэффициенты проницаемости.

На модели были заданы свойства жидкости и пород. Задача массопереноса, когда она не рассматривалась, и соответственно массив концентрации задавался в виде C=0, в других вариантах задавалась конкретная величина.

Для моделирования насыщенного и ненасыщенного потока были определены параметры по влажности, относительной проводимости в зависимости от напора. Были введены стандартные графики для пород, аналогичных моделируемым: суглинки, глины и пески. Вода была охарактеризована следующими физическими константами: плотность и вязкость.

Калибровка модели производилась путём решения "обратной задачи", при которой все параметры модели корректировались таким непротиворечивым образом, чтобы модельные уровни максимально соответствовали природным и контуры распространения обводнения в четвертичном водоносном горизонте максимально совпадали. Калибровка модели выполнялась в несколько этапов по методике холодного и горячего моделирования.

В результате эпигнозного моделирования по всей площади четвертичного водоносного горизонта подъём уровня, который в первую очередь влияет на подтопление населённого пункта, достигнута приемлемая сходимость натуры и модели, расхождение не превышало 10-15 %. В районе канала было достигнуто достаточно точное совпадение распространения границы обводнённых пород в натуре и на модели.

Со стороны хвостохранилища инфильтрационный поток в четвертичных породах в сторону населённого пункта не формируется. Инфильтрация расходуется на пополнение запасов подземных вод в неогеновом водоносном горизонте.

Прогнозное моделирование выполнялось при соблюдении условия, что ситуация, сложившаяся в исследуемом регионе, по комплексу природных и техногенных факторов мало изменится по сравнению с начальным годом. Это условие связано с тем, что существует явная неопределённость в

перспективных планах развития горного производства и вспомогательных объектов. В целом же модель и программное обеспечение позволяют вносить коррективы в соответствии с теми или иными действиями предприятий и населения. Учитывая это обстоятельство, было выполнено краткосрочное прогнозирование изменения обводнённости пород четвертичного возраста и положения уровня подземных вод в неогеновом водоносном горизонте. Прогноз выполнялся на 20 и 30 лет.

На участке балки и обводного канала в течение моделируемого периода будет происходить дальнейшее увеличение размеров обводнённой зоны в четвертичных суглинках. Через 20 лет граница обводнённой зоны продвинется в направлении населённого пункта на 130-150 м, а через 30 лет - на 160-220 м; по сравнению с её начальным положением. Расстояние от границы обводнённых суглинков до населённого пункта через 20-30 лет составит 2000-2100 м, то есть эти объекты по-прежнему не будут оказывать никакого влияния на подтопление застроенной территории.

Глубина залегания уровня подземных вод в неогеновом водоносном горизонте на территории населённого пункта через 20-30 лет изменится незначительно, и при неизменной существующей общей ситуации возможен подъём уровня на локальных участках восточной окраины села на 1-2 м (глубина залегания составит 19-20 м).

На участке между хвостохранилищем и населённым пунктом сколь-либо заметного изменения уровней через 20-30 лет не будет наблюдаться, и хвостохранилище по-прежнему не будет оказывать влияние на его подтопление.

11.2.9 Супермодель прогноза миграции более чем 20 компонентов в подземных водах на объектах горнорудного предприятия

11.2.9.1 Качественный состав подземных и поверхностных вод

Краткая характеристика качественного состава подземных и поверхностных вод исследуемого района и прилегающей территории выполнена на основании:

- мониторинга качества подземных и поверхностных вод;
- информации имеющейся в открытом доступе.

Имеющиеся данные показали, что в поверхностных водоёмах и в подземных водах появились такие компоненты, как талловое масло (ТМ), фенолы, поверхностно-активные вещества (АСПАВ), изменился показатель pH, щёлочности, содержания сульфатов, аммония, нефтепродуктов (НП), солей тяжёлых металлов: марганец, молибден, ванадий, стронций, никель, свинец, цинк, магний, медь, алюминий, фосфаты.

На рисунке 11.43 приведен вариант пространственного изменения качественного состава подземных вод в районе исследуемого объекта. В пределах участка №1 распространены подземных воды с фоновым химическим составом и минерализацией, не превышающей 1г/л, на втором участке наблюдается влияние на качественный состав подземных вод поверхностного водного объекта, увеличивается концентрация сульфат-иона и наблюдается замещение ионов кальция ионами натрия, на участке №3 происходит активное смешение подземных вод с инфильтрующимися атмосферными осадками, что также приводит к метаморфизму химического состава воды.

Анализ содержания в водах поверхностных водоёмов, водотоков и в подземных водах органических соединений (нефтепродукты, фенолы) приведен на рисунках 11.44 и 11.45. Такой же анализ был выполнен по содержанию поверхностно-активных веществ (АСПАВ), и других компонентов.

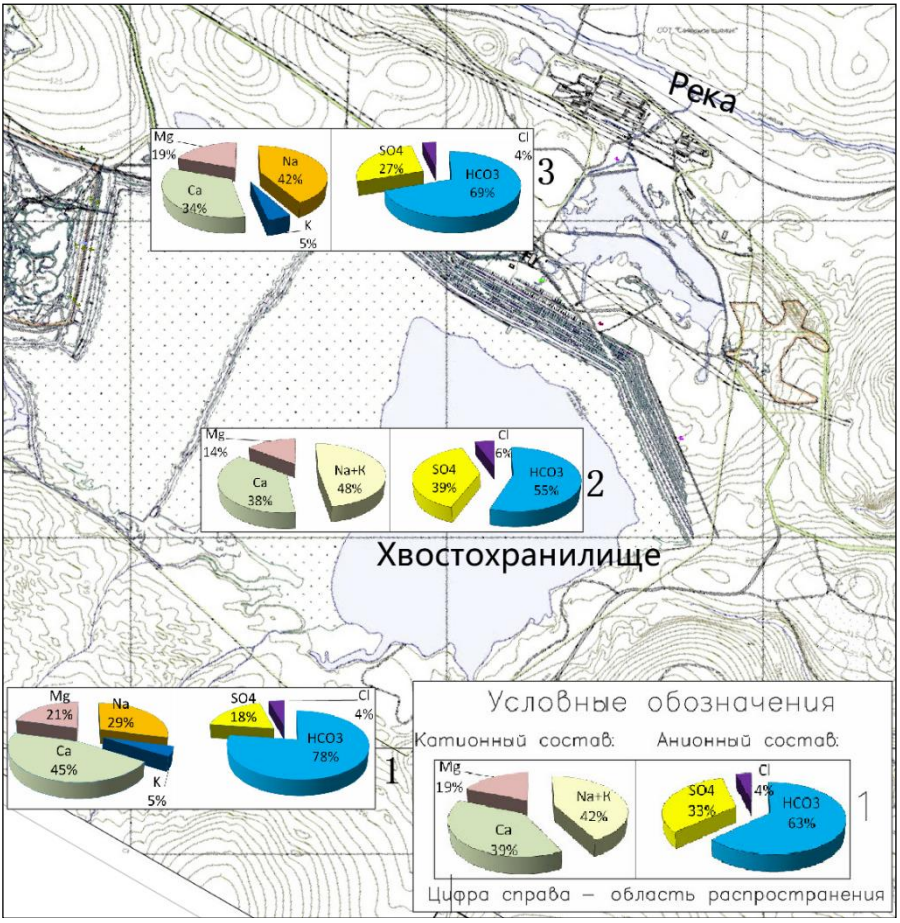


Рис 11.43 Распространение отдельных компонентов химического состава в поверхностных и подземных водах

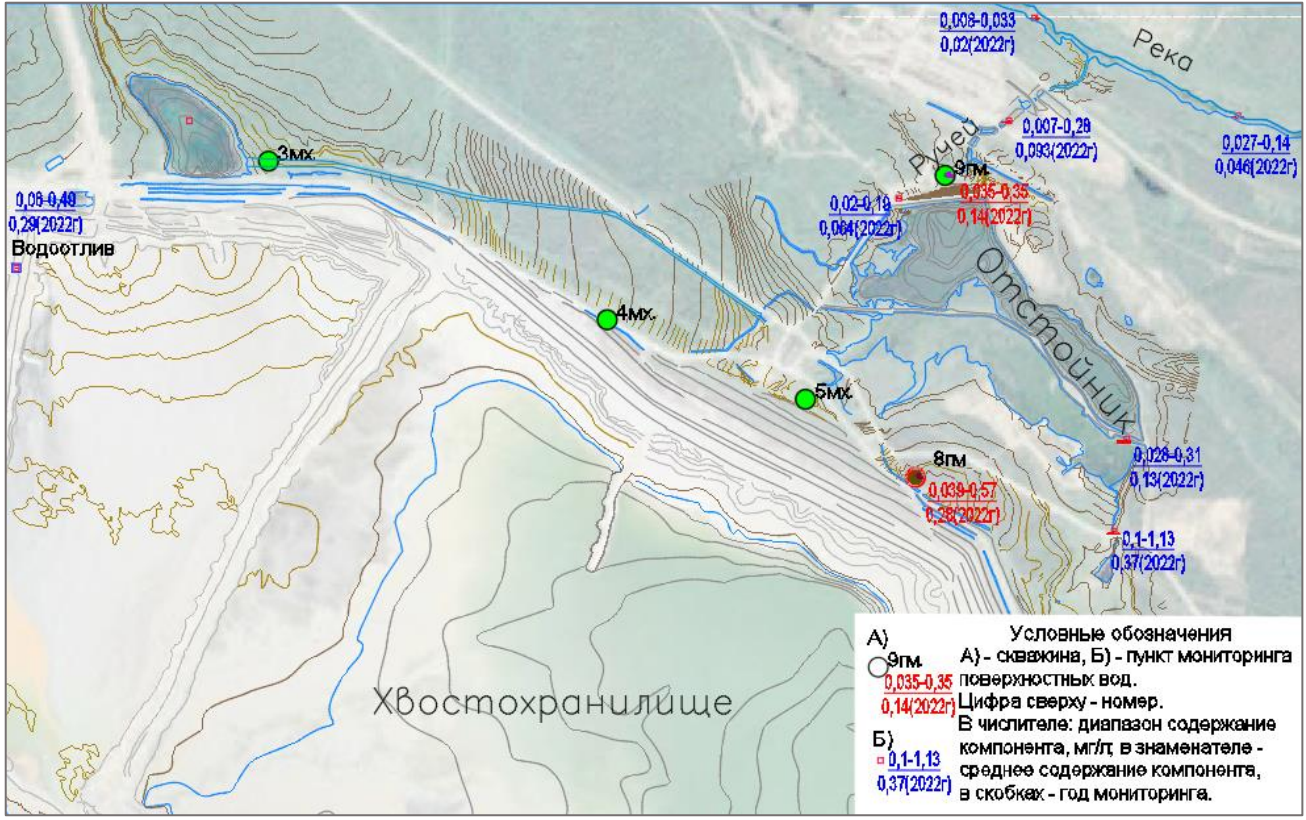


Рисунок 11.44 Содержание нефтепродуктов в поверхностных и подземных водах

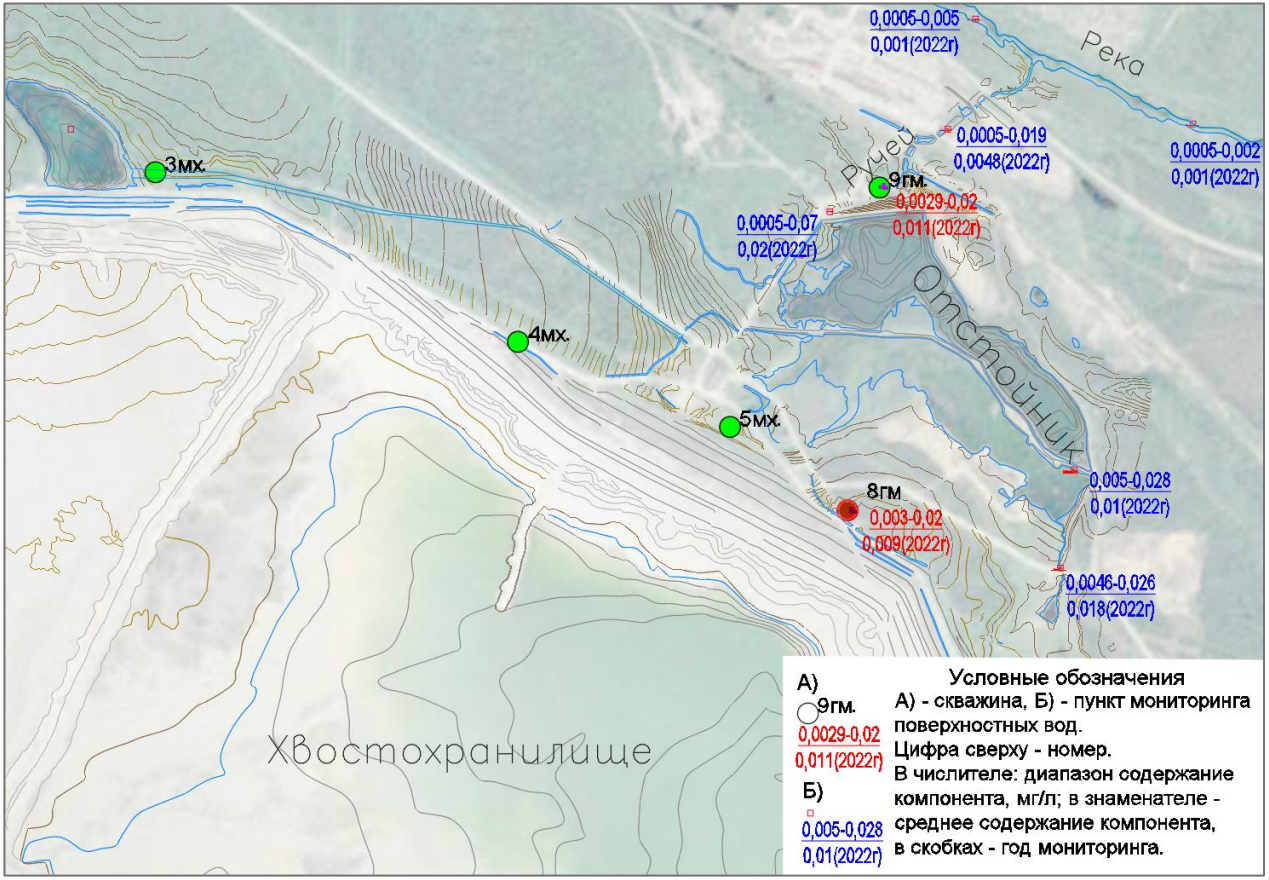


Рисунок 11.45 Содержание фенолов в поверхностных и подземных водах

Анионоактивные синтетические поверхностно-активные вещества (АСПАВ) поступают в водные объекты с хозяйственно-бытовыми (использование синтетических моющих средств) и промышленными сточными водами, а также со стоками из сельскохозяйственных угодий (входят в состав гербицидов). Из анионоактивных СПАВ наиболее широко используются соли сернокислых эфиров (сульфаты) и соли сульфокислот (сульфонаты).

На рисунке 11.46 приведено содержание АСПАВ в поверхностных и подземных водах района исследуемого объекта.

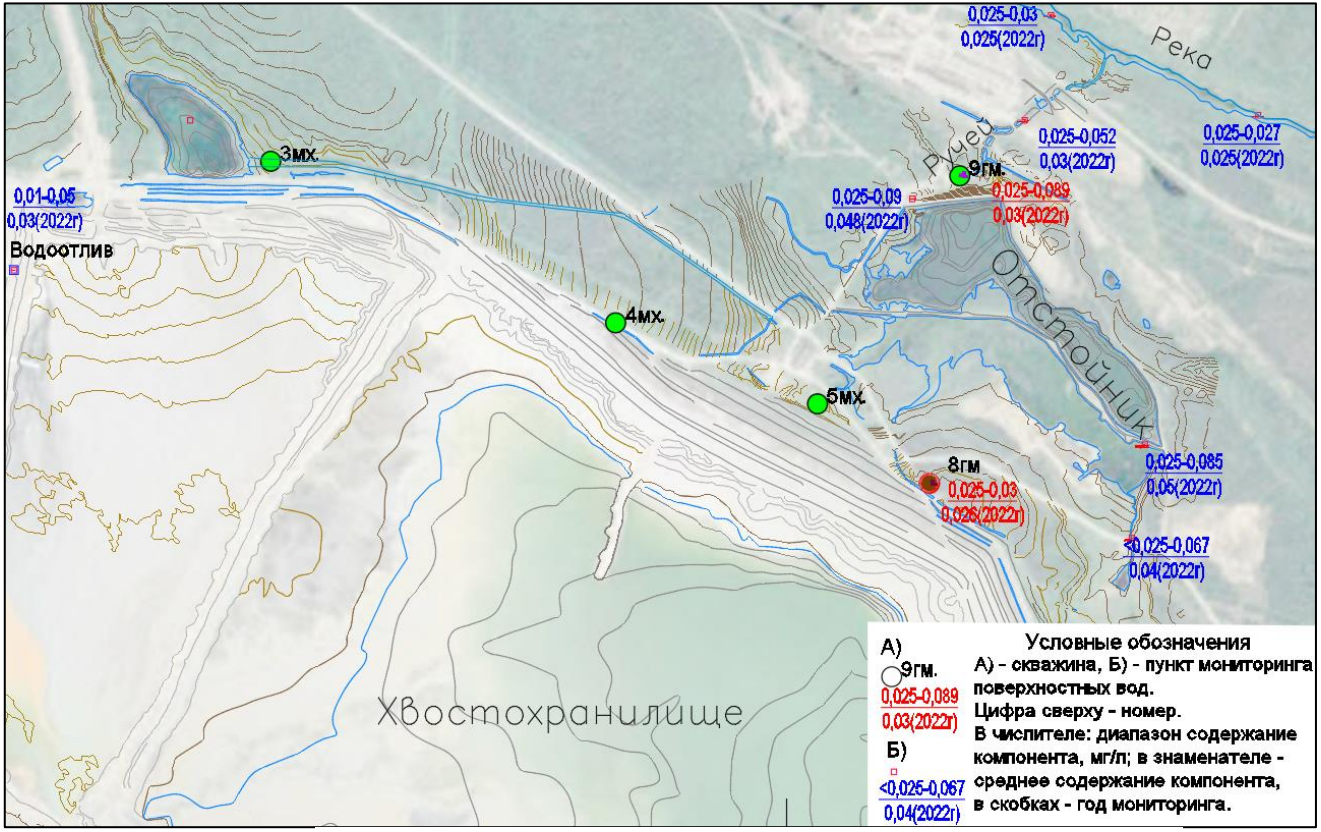


Рисунок 11.46 Содержание АСПАВ в поверхностных и подземных водах

Распространение солей тяжёлых металлов, как правило, носит повсеместный характер вследствие переноса растворимых соединений с течением рек и движением подземных вод. Главным природным источником тяжёлых металлов являются породы (магматические и осадочные) и породообразующие минералы, из которых в результате экзогенных процессов выносятся соли тяжёлых металлов. Техногенное поступление тяжёлых металлов и их солей в водную среду также связано со сточными водами и атмосферными осадками, проходящими через дымовые выбросы.

В районе исследуемого объекта проводился мониторинг содержания солей тяжёлых металлов в поверхностных и подземных водах по следующим компонентам: Fe, Cu, Mn, Sr, Zn, Mo, V.

На рисунках 1.47-11.49 приведены информационные данные, в качестве примеров, распространения в водных объектах таких тяжёлых металлов как V, Mo, Mn.

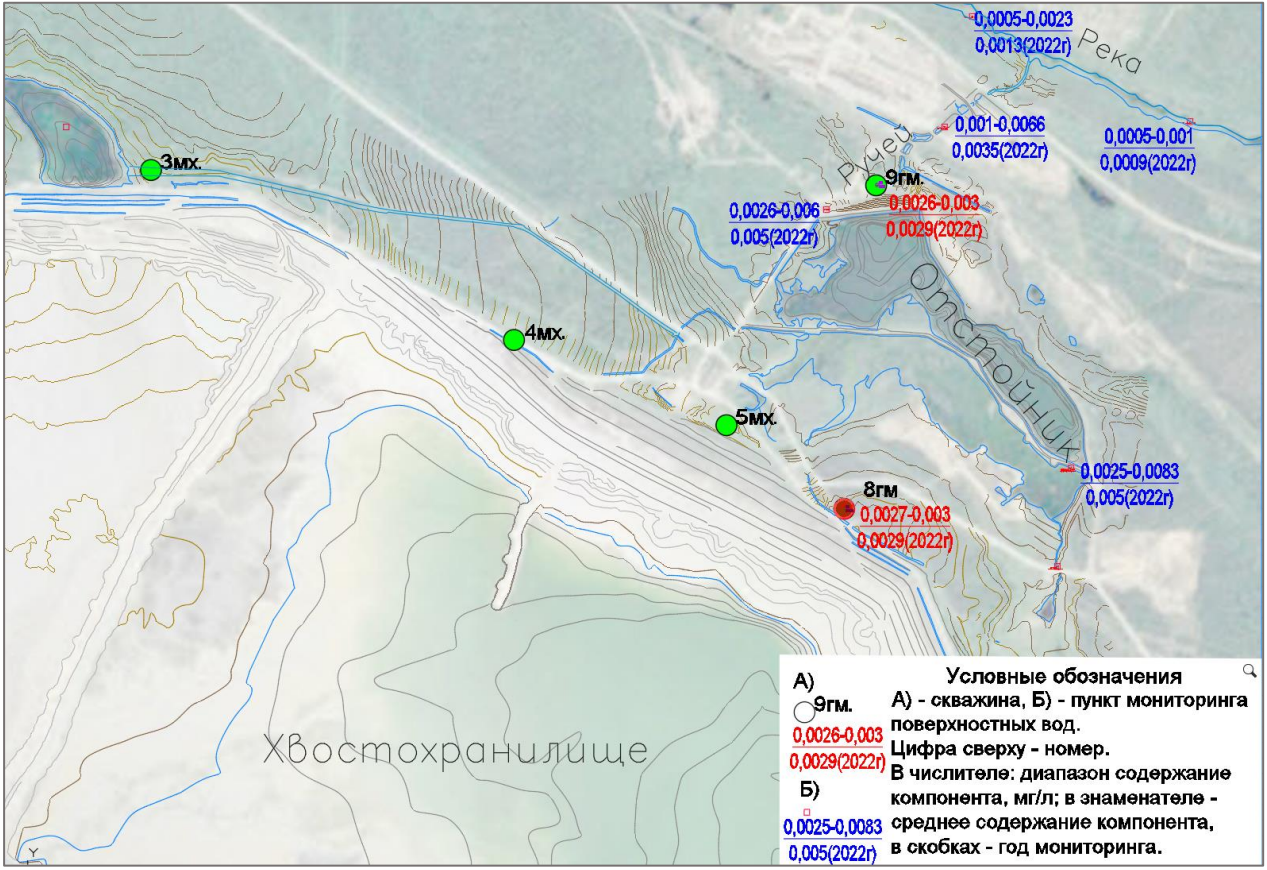


Рисунок 11.47 Содержание ванадия в поверхностных и подземных водах

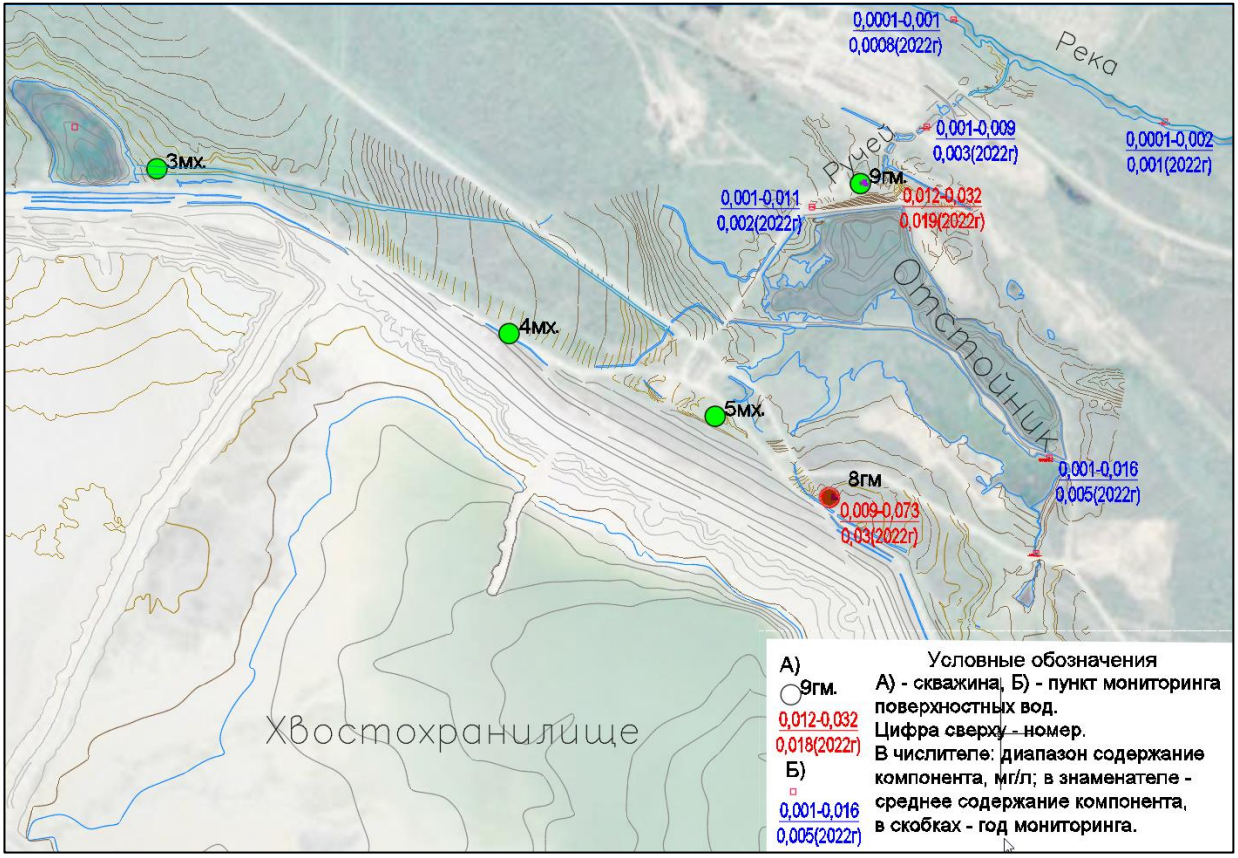


Рисунок 11.48 Содержание молибдена в поверхностных и подземных водах

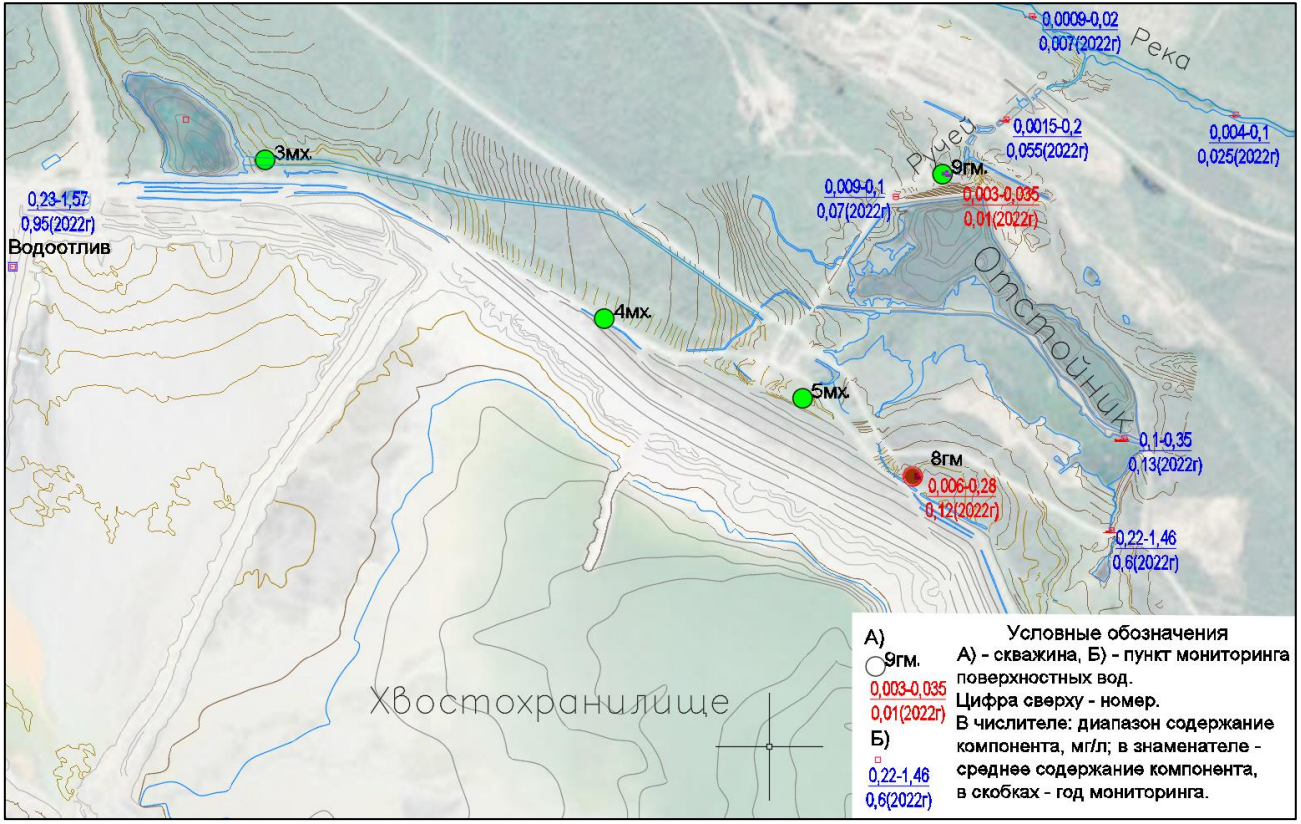


Рисунок 11.49 Содержание марганца в поверхностных и подземных водах

Анализ имеющейся информации свидетельствует также о наличии гидравлической взаимосвязи между подземными и поверхностными водами, что приводит к изменению их качественного состава. В поверхностных водотоках отмечается периодическое или постоянное превышение предельно допустимых концентраций по компонентам: сульфаты, аммоний, нитриты, магний, фосфаты, нефтепродукты, фенолы, железо, медь, марганец, стронций, молибден, ванадий.

11.2.9.2 Расчёт миграции компонентов в подземной водной среде

Развитие предприятия по добыче твёрдых полезных ископаемых потребовало сооружения дополнительного отсека на действующем объекте для сброса и хранения отходов обогатительного производства. В такой ситуации необходимо было выполнить прогнозные расчёты и оценить влияние нового объекта на качество подземных и поверхностных вод. Для решения поставленной задачи использовались два основных модуля программного комплекса GMS: MODFLOW и MT3D. В модуле MODFLOW была разработана концептуальная и геофильтрационная модели, захватывающие все объекты горного предприятия (карьер, отвалы и т.д.). Геофильтрационная модель была откалибрована и адаптирована к природным и технологическим показателям региона. Более подробно технология создания моделей в модуле MODFLOW изложена в предыдущих подразделах (см., например, подраздел 11.2.2). При разработке модели и моделировании использовалась информация, имеющаяся в открытом доступе [342-352].

Миграционная модель исследуемого объекта и прилегающей территории была создана на основе программы MT3D GMS, позволяющей моделировать процессы массопереноса в потоке подземных вод в трёхмерном пространстве. Программа MT3D имеет модульную структуру и состоит из основной программы и большого количества достаточно независимых подпрограмм (пакетов). Каждый из пакетов позволяет учесть один из аспектов моделирования миграции (конвективный перенос, дисперсию, смешивание, молекулярную диффузию т.д.). MT3D при расчётах миграции компонентов использует результаты моделирования фильтрационного потока в MODFLOW. Напоры и составляющие перетока от ячейки к ячейке, вычисленные в процессе моделирования фильтрации, записываются в файл специального формата и затем считываются MT3D для расчётов массопереноса.

Построение контуров поршневого вытеснения и областей захвата выполняется по линиям тока, на которых определяются точки с одинаковым временем их продвижения от источника того или иного компонента.

Моделирование миграции выполнялось по следующим компонентам: сульфаты, хлориды, АСПАВ, аммоний, нитриты, нитраты, магний, фосфаты, нефтепродукты, фенолы, железо, медь, цинк, марганец, стронций, ванадий, алюминий, никель, свинец, молибден.

Для оценки миграции вещества из одного местоположения в другое в MT3D предлагаются две численные схемы: алгоритм Эйлера первого порядка и алгоритм Рунге-Кутта четвёртого порядка.

Алгоритм Эйлера первого порядка используется для вычисления перемещения растворённых компонентов в областях относительно однородной скорости фильтрации. Алгоритм Рунге-Кутта четвёртого порядка более точен, допускает использование больших шагов переноса и применяется вблизи источников и стоков. Этот алгоритм принят в данной задаче для увеличения точности решения перемещения частиц.

В основном выделяют следующие процессы, влияющие на перенос растворенных веществ:

- диффузия - движение ионов, молекул и комплексных соединений на основе броуновского движения из области с высокой концентрацией к области с более низкой концентрацией;
- конвекция (*адвекция*) - перенос растворенных веществ потоком жидкости;
- дисперсия - разделение фильтрующегося потока, обусловленное структурой порового пространства, уменьшает концентрацию и увеличивает объем облака загрязнения;
- физико-химические и биологические процессы, такие как ионный обмен, радиоактивный распад, сорбция, разложение бактериями и др.

В модели массопереноса были реализованы пакеты:

- Advection package (конвективный перенос);
- Dispersion package (дисперсия, молекулярная диффузия);
-Chemical reaction package (сорбция);
-Source/Sink mixing package (смешивание на источниках/стоках).

Учёт сорбционных процессов выполнялся по кинетике Генри на основе аналитического решения одномерной задачи миграции вдоль линии тока.

Исходные массивы объёмной плотности пород и активной пористости в зависимости от состава вмещающих пород изменялись в пределах 2000 - 2090 кг/м^3 и 1-40% соответственно, величина продольной дисперсии варьировала от 0,5 до 5 м. Соотношение горизонтальной поперечной к продольной дисперсии и вертикальной поперечной к продольной дисперсии приняты 0,1 и 0,01 соответственно.

Фоновые значения расчётных компонентов и их граничные показатели приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Содержание расчетных компонентов

№ п/п	Название	Фоновое содержание компонента, мг/л		ГУ III рода (поверхностные водоёмы), мг/л
		Водоносный горизонт	Поверхностные водотоки	
1	Хлориды	5,0	3,0	11,0
2	Сульфаты	10	10	325
3	Нитраты	0,3	0,3	2,8
4	Нитриты	0,02	0,02	0,32
5	Аммоний	0,07	0,5	0,52
6	Магний	5	1	37
7	Фосфаты	0,07	0,07	1,2
8	Нефтепродукты	0,05	0,025	0,37
9	Фенолы	0,0003	0,0006	0,018
10	АСПАВ	0,02	0,025	0,05
11	Железо	0,05	0,07	0,26
12	Медь	0,002	0,001	0,007
13	Марганец	0,003	0,003	0,6
14	Стронций	0,4	0,22	1,8
15	Цинк	0,003	0,005	0,03
16	Ванадий	0,001	0,001	0,005

Коэффициент молекулярной диффузии равнялся нулю для каждого слоя, так как молекулярную диффузию можно не учитывать при прогнозах, если речь идёт о переносе растворённых компонентов на расстояния более нескольких метров.

При решении прогнозных задач учитывался химический состав атмосферных осадков.

Сорбционные процессы при миграции ряда элементов приводят к уменьшению их концентрации. В модели процесс сорбции рассчитывался по линейной изотерме с учётом значения коэффициента равновесного сорбционного распределения (Kd). Коэффициент равновесного сорбционного

распределения зависит от состава горных пород (сорбента) и свойств элемента-мигранта. Варьирует в широких пределах от $nx10^{-5}$ до 14,2$м^3$/кг.

Калибровка модели массопереноса выполнялась по всем компонентам указанных выше. Результаты решения «обратных задач» при калибровке на примере массопереноса сульфат-иона SO_4^{2-} и иона меди Cu приведены на рисунках 11.50 и 11.51. При решении «обратных задач» было выявлено, что для инертных и слабо осаждающихся веществ (хлор, сульфаты, лёгкие нефтепродукты, фенолы, нитраты, нитриты, АСПАВ) основным составляющим процесса миграции является конвективный перенос. Для переноса большей части компонентов солей тяжёлых металлов (магний, марганец, ванадий и другие) становятся приоритетными процессы осаждения и адсорбции.

Калибровка показала, также, похожие результаты распределения сульфатов в верхних водоносных горизонтах, что подтверждает прямую гидравлическую связь между ними и существование единого безнапорного водоносного комплекса подземных вод.

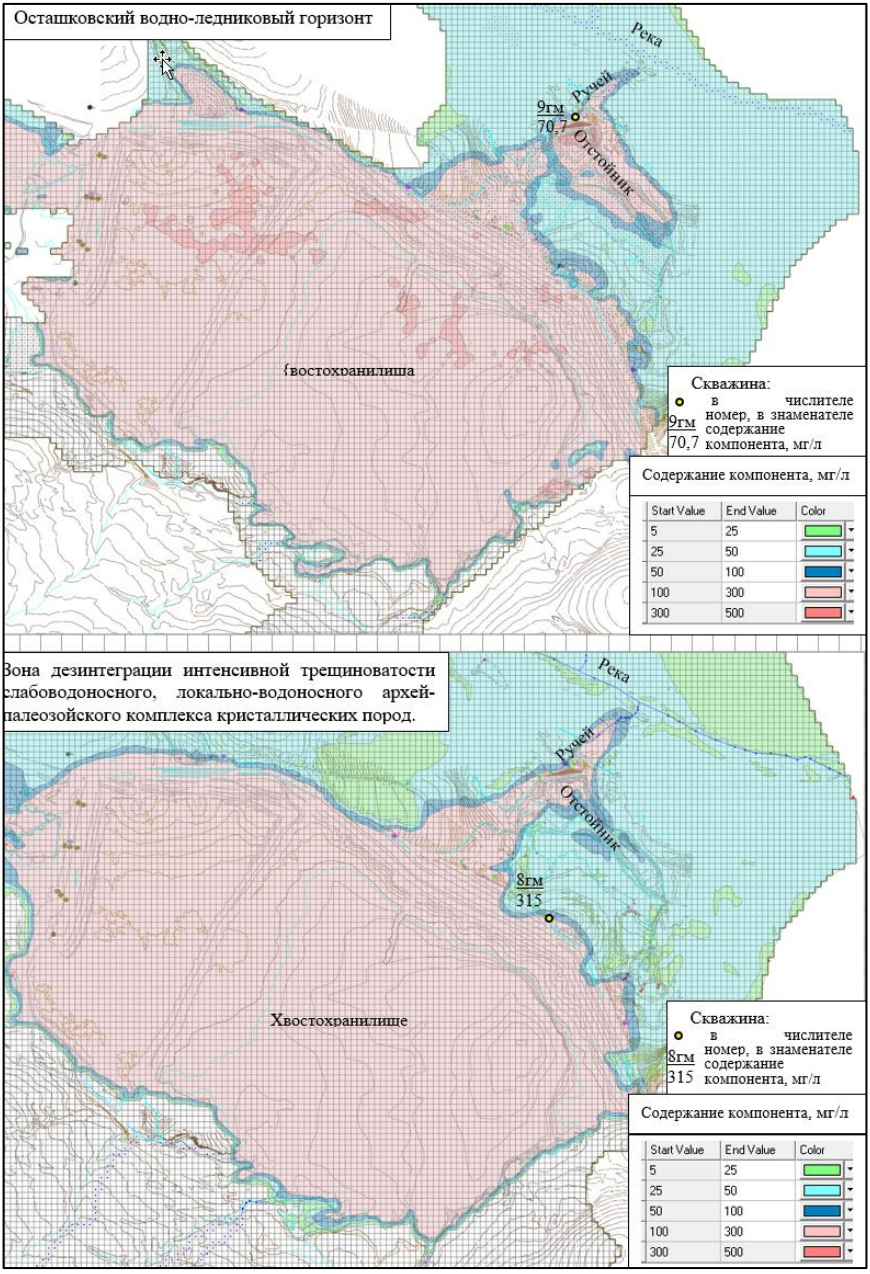


Рисунок 11.50 Содержание сульфатов в водоносных горизонтах при решении «обратной» задачи

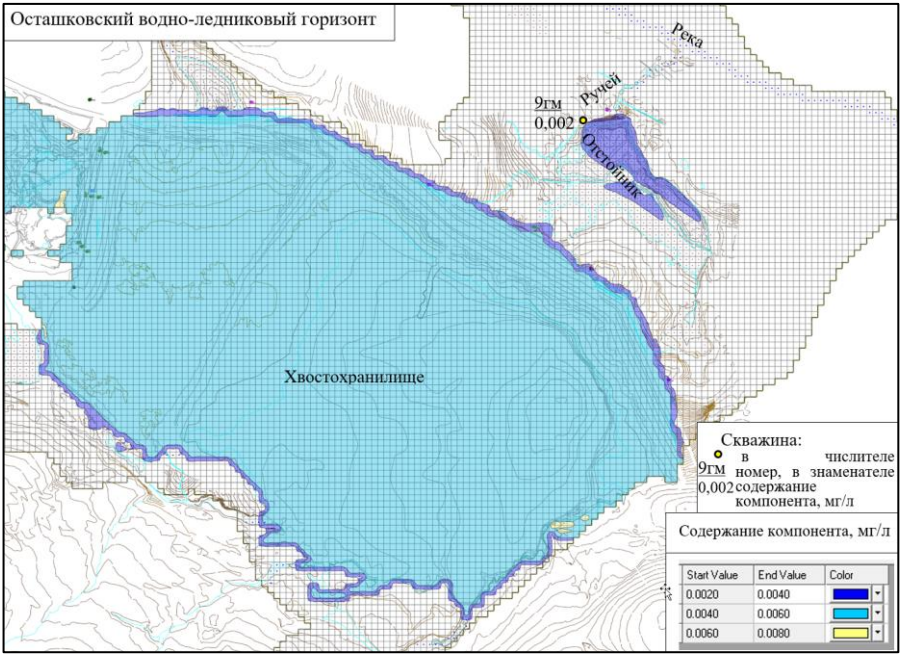


Рисунок 11.51 Содержание меди в подземных водах по результатам решения «обратной» задачи

Решение прогнозных задач распространения в подземных водах инертных и слабо осаждающихся веществ при расширении площади складирования отходов обогащения подтвердило, что основным составляющим процесса миграции является для этих компонентов конвективный перенос. Фронт продвижения таких веществ-мигрантов в подземных водах согласуется с фронтом продвижения подземных вод содержащих эти компоненты. Результаты решения прогнозных задач приведены на примере отдельных веществ на рис. 11.52-11.54.

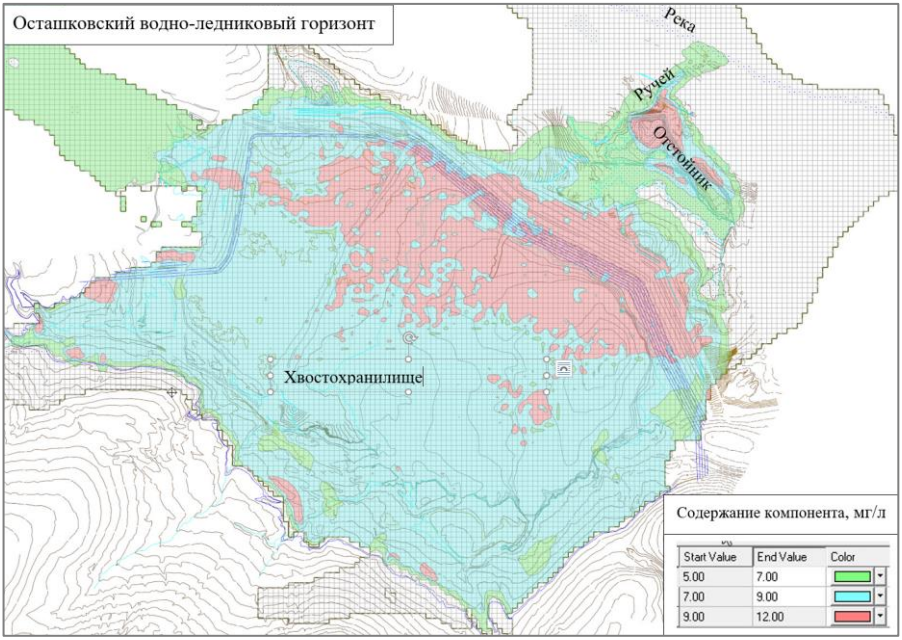


Рисунок 11.52 - Прогноз распространения хлоридов в подземных водах

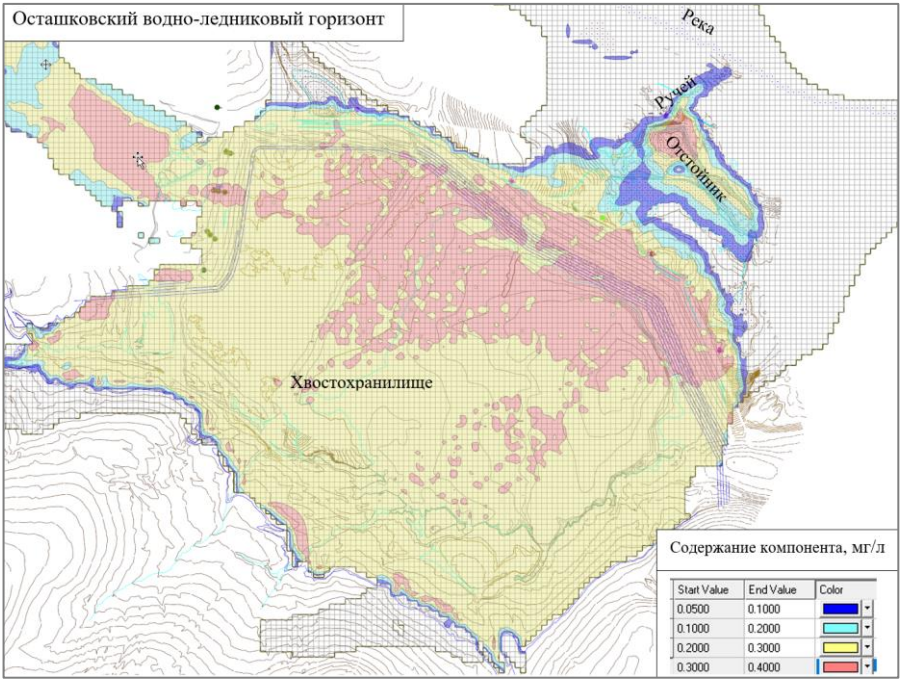


Рисунок 11.53 - Прогноз распространения нефтепродуктов в подземных водах

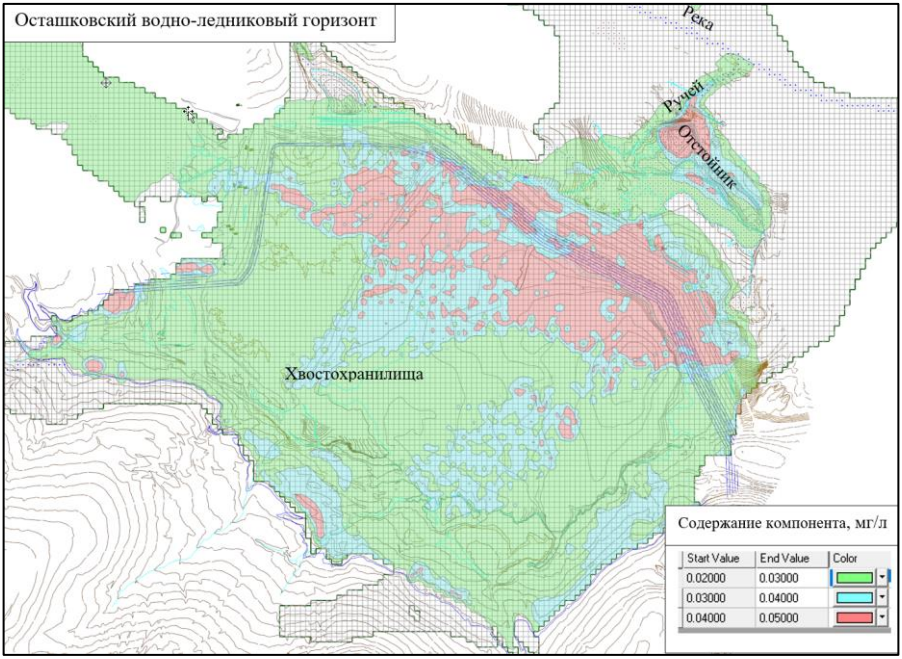


Рисунок 11.54 - Прогноз распространения АСПАВ в подземных водах

Прогноз распространения солей тяжёлых металлов в подземных водах и их взаимодействие с водами поверхностных водоёмов и водотоков был выполнен для более чем 50 вариантов. Метаморфизм химического состава подземных вод в результате распространения магния, аммония, марганца, ванадия, железа, меди, цинка, минеральных фосфатов и стронция моделировался с учётом процессов осаждения и адсорбции растворенных соединений отходами обогащения и горными породами. На рисунках 11.55-11.58 приведены, как пример, результаты моделирования распространения некоторых элементов в верхнем водоносном горизонте при увеличении площади складирования отходов обогащения до заданных отметок.

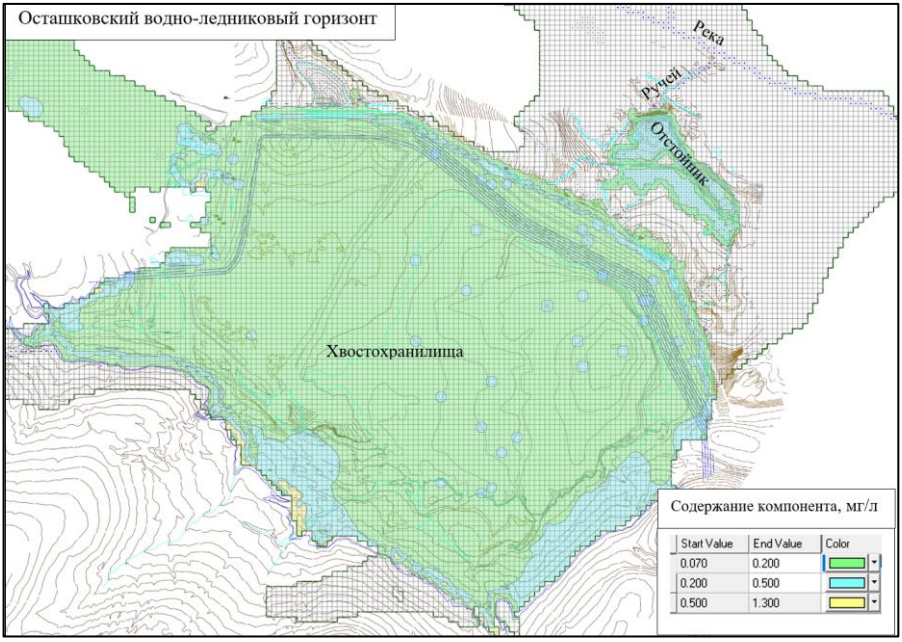


Рисунок 11.55 - Прогноз распространения минеральных фосфатов в подземных водах

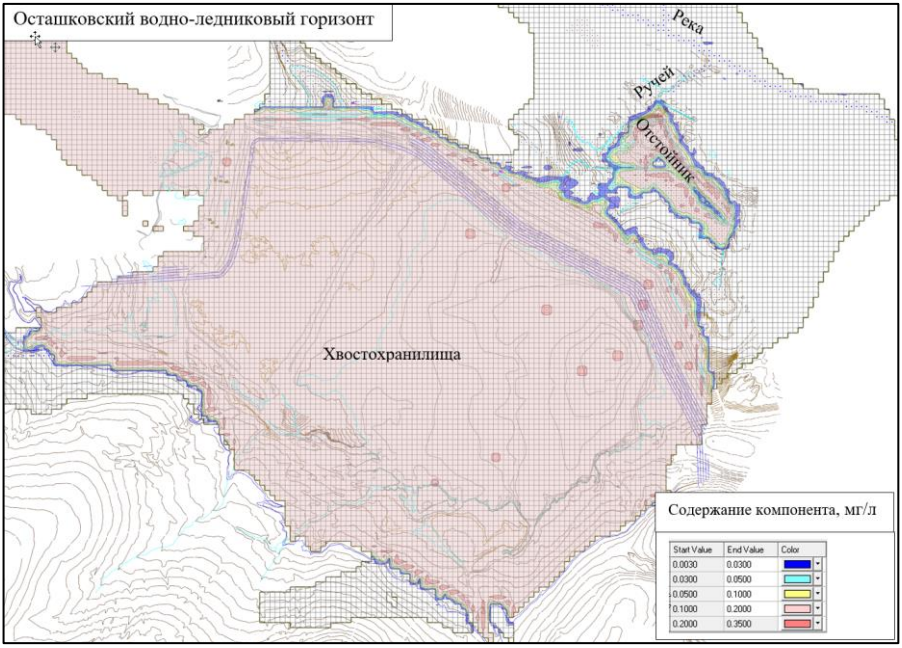


Рисунок 11.56 - Прогноз распространения марганца в подземных водах

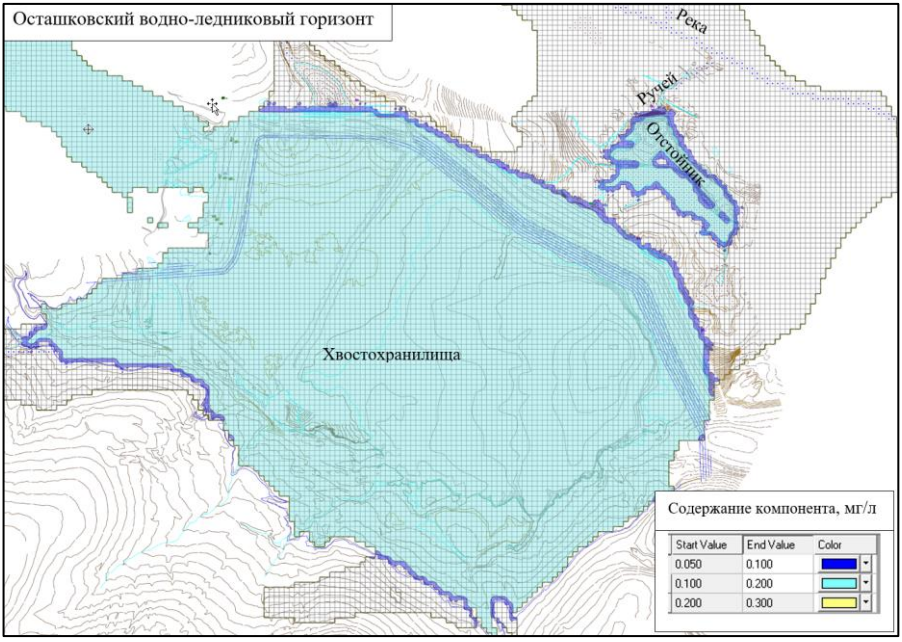


Рисунок 11.57 - Прогноз распространения железа в подземных водах

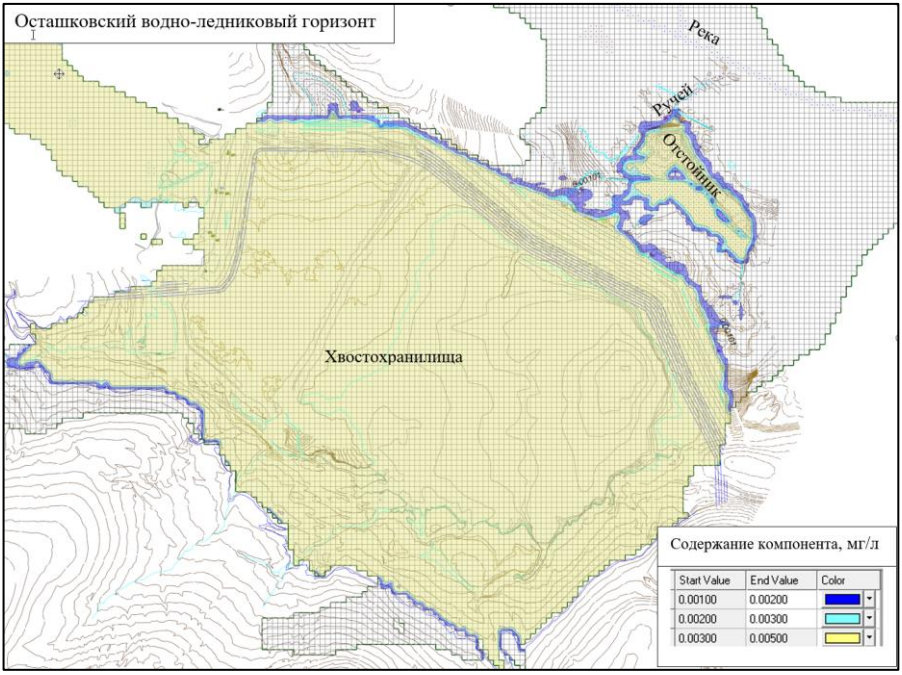


Рисунок 11.58 - Прогноз распространения ванадия в подземных водах

При низких миграционных способностях элементов-мигрантов (стронций, цинк, медь, железо, ванадий, фосфаты) происходит резкое снижение их концентрации в подземных водах сразу за площадью складирования, в большинстве случаев до фоновых показателей. Фильтруясь через породы, элементы-мигранты сорбируются и передвигаются дальше только вследствие молекулярной диффузии, роль которой в массопереносе в данных условиях минимальная. Поэтому при попадании сорбируемых веществ в породы с высокой обменной ёмкостью и низкой проницаемостью (песчано-глинистые породы) они не мигрируют далеко от источника.

Для инертных и слабо осаждающихся веществ (хлор, сульфаты, лёгкие нефтепродукты, фенолы, нитраты, нитриты, АСПАВ) на модели было установлено, что основным составляющим процесса миграции в подземных водах является конвективный перенос.

При миграции в водоносном пласте большей части компонентов солей тяжёлых металлов, как было получено на модели, возрастает (магний,) или становится приоритетным (аммоний, марганец, ванадий, железо, никель, алюминий, медь, цинк, фосфаты, молибден, стронций, свинец) процесс осаждения и адсорбции растворенных соединений горными породами различного состава.

Прогнозные расчёты по таким компонентам как алюминий, никель и молибден выполнялись с учётом дополнительной исходной информации, связанной с корректным представлением в модели природной и техногенной обстановки.

Моделирование обеспечило принятие рациональных конструктивных решений при разработке мероприятий и обустройстве площади складирования отходов для уменьшения инфильтрационных потерь. Конструктивные решения прогонялись на модели для поиска оптимального варианта создания защитных экранов, обеспечивающих охрану водных ресурсов.

ГЛАВА 3

СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ ОСУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

3.1. Основные положения формирования систем осушения

Требования к структуре системы и технологии осушения подразделяются на две группы: общего и специфического характера. К основным требованиям первой группы относятся:

- обеспечение безопасных условий разработки месторождения, высокопроизводительной работы горного оборудования, минимальных затрат на производство конечной продукции;
- создание условий для механизации и автоматизации производственных процессов при разработке полезного ископаемого;
- необходимость охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

Без учёта хотя бы одного из этих требований невозможно выбрать высокоэффективную защиту от обводнения горных выработок.

Требования специфического характера проявляются в зависимости от конкретных природных и технических условий и довольно многообразны. К числу наиболее распространенных относятся:

- увязка технологии осушения с технологией разработки месторождения;
- соответствие уровню развития техники осушения;
- обеспечение механизации и автоматизации операций по сооружению дренажных устройств;
- надёжность, мобильность и гибкость системы и технологии осушения:
- создание условий для сохранения запасов и качественного состава подземных вод;
- исключение прорывов в горные выработки обводнённых песчано-глинистых пород и т.д.

Взаимный учёт требований обеих групп способствует получению оптимальных параметров дренажных систем при достижении цели осушения - обеспечения безопасных условий труда при высокопроизводительной работе горного оборудования и охране окружающей среды. Отметим, что требования специфического характера могут оказывать решающее влияние на выбор способа, технологии и технических средств защиты горных выработок от подземных вод. Переходя к общему анализу способов и технологических приёмов, используемых в технологии осушения, выполним их систематизацию и выделим предельные области по условиям практической применимости в зависимости от производительности системы осушения, величины понижения уровня подземных вод и проницаемости горных пород [8] (рис. 3.1).

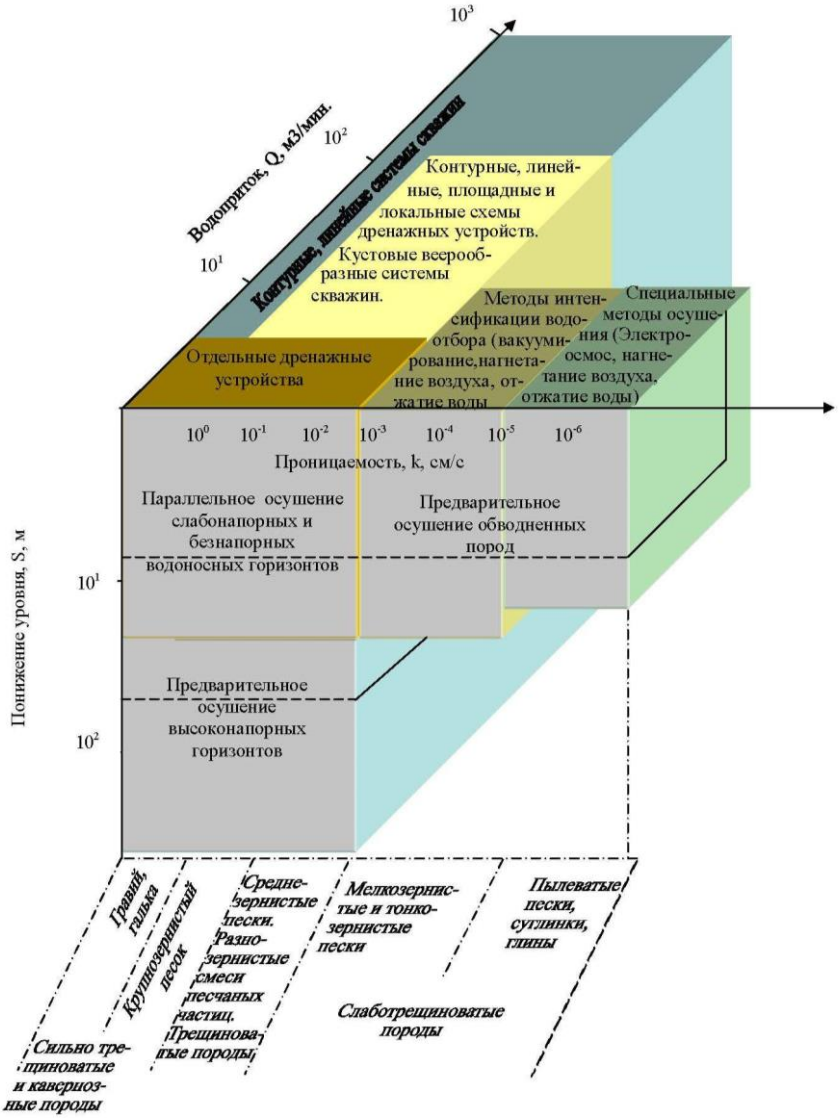


Рис. 3.1. Предельные области технологических приёмов осушения

Блок-схема свидетельствует, что в настоящее время разработан достаточно обширный комплекс приёмов и технических средств, которые позволяют формировать самые различные структуры систем осушения с заданными свойствами, способностью понижать уровень подземных вод и уменьшать водопритоки в горные выработки. При осушении высокопроницаемых пород эффективным оказывается применение достаточно простых систем водопонижающих скважин. В пределах изменения коэффициента фильтрации от 10° до 10^{-3} см/с технология осушения также основывается на использовании различных систем скважин, однако в структурном отношении они становятся сложнее. Появляются локальные подсистемы скважин, располагаемые на наиболее опасных участках или где их расположение наиболее целесообразно. Распространение получают восстающие, лучевые и горизонтальные скважины. Величины водопритоков могут значительно изменяться (до 10^4 $м^3/ч$).

При коэффициентах фильтрации от I0^{-3} до 10^{-5} см/с, что соответствует мелко- и тонкозернистым пескам или слаботрещиноватым породам, распространение получают методы интенсификации водоотбора, сводящиеся в основном к вакуумированию, нагнетанию воздуха, гидроразрыву, реагентной обработке, созданию водоприёмной части с повышенной водозахватной способностью (оборудование высокопроницаемыми фильтрами с контуром гравийной обсыпки до I м в диаметре, формирование водоприёмных каверн).

Методы интенсификации водоотбора используются в сочетании с системами самых различных дренажных устройств (водопонижающих, восстающих, горизонтальных скважин, сквозных и забивных фильтров); для повышения степени осушения на локальных участках применяются иглофильтровые и эжекторные иглофильтровые установки.

Дренирование пород, характеризующихся коэффициентами фильтрации в пределах 10^{-5} - 10^{-6} см/с осуществляют специальными методами, например, электроосмосом, отжатием воды воздухом, использованием геодрен и др. К числу более дешёвых, но менее производительных методов относится осушение слабопроницаемых пород с помощью скважин большого диаметра (1м) или шахтных колодцев, обсаженных пористыми бетонными кольцами с гравийной обсыпкой.

В зависимости от природных и технологических факторов может использоваться параллельное (т.е. одновременное с началом ведения горных работ), предварительное (опережающее на некоторый расчётный период начало горных работ) и эксплуатационное осушение (производится по мере развития горных работ в течение всего периода существования шахты или карьера). Границы между этими приёмами достаточно условны, и обычно они постепенно взаимозаменяются или дополняются.

Технология осушения должна содержать приёмы по охране окружающей среды. Известно, что отрицательное влияние осушения на окружающую среду заключается в уменьшении запасов подземных вод и ухудшении физико-химических показателей воды при попадании её в горные выработки. Кроме ущерба природной обстановке появляется необходимость сооружения дорогостоящих очистных сооружений. С этих позиций осушение должно захватывать минимальную площадь распространения водоносного горизонта, технология отбора воды рассчитывается на её минимальное загрязнение, или быть в комбинации с технологией утилизации путём возврата откачиваемой системой осушения воды в водоносные пласты. Перспективным является сооружение систем осушения - водозаборов.

С другой стороны, развитие технологии ведения горных работ направлено на возрастание уровня механизации и рост мощности используемой горной техники. На обводнённых месторождениях это связано с интенсификацией процесса осушения во времени и изысканием возможностей максимального удаления гравитационной воды на участках ведения горных работ. Разрешение противоречия между стремлением повысить степень осушения водоносного горизонта и сохранить запасы и качество подземных вод должно определять перспективы научно-технического прогресса в развитии технологии осушения на ближайшие годы. Целенаправленные действия могут развиваться по двум направлениям: изыскание резервов в существующих технологических решениях, приёмах и методах и разработка новых технико-технологических решений (например противофильтрационных завес) [9].

Большие перспективы в обеспечении охраны подземных вод имеет поверхностный способ осушения, технология которого практически во всех случаях минимизирует загрязнение подземных вод. Нормирование структуры системы осушения можно производить с учётом достижения требуемой степени снижения уровня для обеспечения устойчивости горных выработок и решения задач по рациональному использованию подземных вод в водоснабжении. Разработка рекомендаций по объединению технологии осушения и водоснабжения на примере Приоскольского железорудного месторождения свидетельствует об экономической эффективности такого подхода.

В структурном отношении расположение дренажных устройств в пределах постоянных бортов карьера должно производиться как можно ближе к кромке борта. Хорошие результаты даёт также сооружение дренажных скважин на уступах бортов карьера. Эксплуатация системы осушения при такой схеме позволяет перехватить максимальную долю водопритока в карьер при уменьшении размеров депрессионной воронки. Исключение загрязнения составляющих водного баланса подземных вод при

поверхностном способе осушения создаёт благоприятные возможности объединения его технологии с технологией восполнения запасов при дренировании многослойной толщи, содержащей несколько водоносных горизонтов. Возможны две схемы; по первой технология осушения основывается на закачке отбираемых вод в другой, гидравлически не связанный с первым и не влияющий на обводнение горных выработок водоносный слой. Такая технология была успешно опробована в 1973 г. на Южно-Белозерском месторождении, но в дальнейшем не получила развития, что связано в основном с изменением способа осушения.

Вторая схема основана на том, что истощение запасов осушаемого водоносного горизонта приводит одновременно к резкому увеличению его поглощающей способности. При наличии в разрезе нескольких водоносных горизонтов, подлежащих осушению, дренажные воды могут аккумулироваться в одном из них, из которого затем откачиваются системой осушения. За счёт восполнения запасов в этом водоносном горизонте не происходит сильного развития депрессионной воронки. Уменьшение радиуса развития воронки депрессии верхних водоносных горизонтов может быть выполнено путём искусственного их обводнения дренажными водами, подаваемыми в специально сооружённые инфильтрационные бассейны. Достигаемая локализация депрессии при восполнении запасов подземных вод в осушаемых горизонтах предполагает защиту подземных вод от истощения и рациональное использование откачиваемой воды.

Технология осушения при охране водных ресурсов должна учитывать все особенности геолого-гидрогеологического строения месторождения. Например, при осушении пласта-полосы откачиваемая из него вода может нагнетаться в пористые коллекторы, располагающиеся за непроницаемой границей.

При поверхностном способе осушения могут использоваться схемы, методы и средства, области применения которых указаны на рисунке 3.1., технология осушения в наибольшей мере соответствует технологии водоснабжения на базе подземных вод. В технологии осушения при этом способе заложены большие потенциальные возможности для осуществления автоматизации отдельных операций по сооружению дренажных устройств и управлению процессом водопонижения.

Технология осушения может быть основана на учёте водного баланса региона месторождения полезных ископаемых. Производительность системы осушения должна соответствовать допустимым потерям в составляющих водного баланса, не приводящих к существенному нарушению равновесия. Однако часть запасов твёрдого полезного ископаемого при такой технологии может оказаться неосушенной. Примеры расчёта систем осушения по такой методике имеются в Венгрии.

Технология осушения при подземном способе оказывает гораздо большее влияние на окружающую среду, так как здесь присутствуют оба негативных явления - загрязнение подземных вод и истощение их запасов. Загрязнение происходит при транзите вод по горным выработкам и накоплении их в водосборниках перед откачкой на поверхность за счёт попадания вредных компонентов при производственной деятельности или при смешении вод различной минерализации и химического состава. Так из 2000 $м^3$/ч, откачиваемых подземной дренажной системой на Южно-Белозёрском месторождении, около 80 % составляют пресные воды, которые смешиваются с минерализованными, в результате откачиваемая вода имеет минерализацию 5-7 г/л, что затрудняет её использование и отведение в открытые водоёмы. В технологии осушения необходимо решить вопрос по раздельному отбору пресных и минерализованных вод с недопущением их загрязнения перед откачкой на поверхность. Разработка мероприятий по предотвращению притока в горные выработки из водоносных горизонтов, не участвующих непосредственно в обводнении участков ведения горных работ, особенно при системах с закладкой выработанного пространства, весьма благоприятно влияет как на экономические показатели и промбезопасность горных работ, так и на охрану водных ресурсов.

Развитие технологии осушения может происходить при использовании структурированных дренажных систем, закладываемых в наиболее водообильных зонах, позволяющих добиваться снижения уровня подземных вод и водопритоков на отдельных участках. Использование такой технологии позволяет уменьшить размеры депрессионной воронки, однако требует детальной информации о геолого-гидрогеологическом строении месторождения.

Положительный эффект осушения усиливается при применении методов интенсификации водоотбора (например, нагнетание сжатого воздуха в водонасыщенный пласт успешно использовалось на угольных месторождениях в Венгрии и на марганцевых месторождениях в Украине). Большие возможности в совершенствовании подземного способа осушения заключаются в дополнении его методами закрепления грунтов. Закрепление грунтов эффективно при наличии дизьюктивных нарушений, трещиноватых и кавернозных пород. Тампонаж зон повышенной трещиноватости вблизи открытых водоёмов и водотоков приводит к сохранению запасов и качественного состава подземных и поверхностных вод и способствует уменьшению производительности систем осушения.

Практика свидетельствует, что подземный способ осушения рационален и эффективен, если он учитывает схему расположения горных выработок и технологию ведения горных работ. При открытой разработке руд подземная система осушения эффективна, если она создавалась до или

одновременно со строительством карьера. На Лебединском карьере система осушения состоит из более 10000 п.м. подземного дренажного штрека, нескольких шахт и более 200 восстающих скважин. На стадии эксплуатации карьера она перехватывает 50 % суммарного водопритока, а остальная часть принимается его бортами.

Разработка новых технико-технологических решений может быть основана на осушении части пород с последующим приданием границе контакта осушенных и водонасыщенных пород непроницаемых свойств или образованием защитных непроницаемых барьеров (например, путём закачки в осушенные породы веществ, которые под влиянием физико-химических реакций образуют непроницаемый контур). Компенсация отрицательных последствий осушения месторождений связана с мониторингом окружающей среды. Защита водных ресурсов в количественном и качественном отношениях имеет важнейшее значение для развития технологии осушения. Выявление недостатков и возможностей предлагаемых моделей на практике явится основанием для её дальнейшей корректировки.

3.2. Классификация месторождений твёрдых полезных ископаемых применительно к технологии осушения

Первой наиболее общей информацией, которую оценивает специалист при анализе обводнённости месторождения твёрдых полезных ископаемых, являются геолого-структурные, гидрогеологические и инженерно-геологические условия, выявленные на стадии его разведки. В наиболее обобщённом виде целесообразно отразить их в классификации и увязать выделенные таксоны с накопленным опытом разработки и эксплуатации систем осушения. Классификации месторождений полезных ископаемых, разработкой которых занимались многие авторы, всегда увязывались с достижениями геологических наук на определённый период времени.

В работе [10] представлена гидрогеологическая классификация месторождений полезных ископаемых, которая основана на выделении классов по особенностям залегания водоносных пластов (горизонтальное, наклонное и мульдообразное) и типов по количеству водоносных горизонтов (один или система). Данная классификация учитывает основы гидрогеологической схематизации природных условий при выборе расчётных схем для оценки водопритоков в горные выработки.

В классификации в монографии [11] выделяются группы (по геоструктурным особенностям месторождения и гидрогеологическим условиям), классы (по условиям питания водоносных горизонтов) и типы (по тектоническим условиям). Эта классификация разработана для железорудных месторождений и направлена на решение задач рудничной гидрогеологии.

В работе [12] месторождения классифицируются на группы по расположению их в зоне или вне зоны многолетней мерзлоты, подгруппы – по удалённости от водотоков и водоёмов, типы – по принадлежности к тектоническим структурам II порядка или по особенностям свойств вмещающих пород и полезного ископаемого (склонных к карстообразованию, легкорастворимых и т.д.). Классификация позволяет предварительно качественно оценить обводнённость месторождения полезных ископаемых.

Принципиально новый подход предложен в работе [13], в классификации основой выделения групп служит принадлежность месторождения к гидрогеологической структуре первого порядка. Такой подход позволяет оценить общие условия гидрогеологического строения месторождения и при детализации (выделение подгрупп, типов, подтипов и т.д.) охарактеризовать специфические черты, свойственные объекту. Однако данная классификация не затрагивает инженерно-геологических условий месторождений.

Сложность условий залегания и добычи полезных ископаемых обуславливает теоретический и практический интерес не только к различным аспектам регионального положения, присущих группам месторождений, но и ко всё большему числу связей, отражающих их гидрогеологическое и инженерно-геологическое строение. Последнее определяет перспективность использования системного подхода, с помощью которого возможно наиболее полно представить современные тенденции применения в горном деле основных достижений гидрогеологии и инженерной геологии при разработке классификаций месторождений полезных ископаемых [14].

В основе предлагаемой классификации лежит деление месторождений полезных ископаемых на типы, классы и группы (табл. 3.1). Более дробное деление целесообразно при дальнейшем совершенствовании классификации на базе фактического материала по причинно-следственным связям между гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями и интерпретации его, например, совместно с технологическими критериями по обеспечению защиты горных выработок от отрицательного влияния подземных вод и нежелательных последствий инженерно-геологических процессов и явлений.

Основным критерием отнесения месторождений полезных ископаемых к типам является резкое различие в региональном масштабе их гидрогеологических и инженерно-геологических условий. В результате изучения пространственной изменчивости гидрогеологических и инженерно-геологичесих условий месторождений полезных ископаемых предлагается выделить три типа принадлежности месторождений к гидрогеологической структуре первого порядка: гидрогеологическому массиву, артезианскому

Таблица 3.1 - Классификация месторождений по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям в увязке с технологическими приёмами защиты от обводнения горных выработок

Тип месторождения	Класс месторождения	Группа месторождения	Способы и технические устройства для защиты горных выработок от подземных вод	Примеры месторождений
1	2	3	4	5
ГМ. Приуроченные к гидрогеологическим массивам. В обводнении участвуют напорные и безнапорные трещинно-жильные, трещинно-пластовые воды	ГМ-I. Неглубокого залегания (до 50 м), приуроченные к терригенным рыхлым (Аллювиальным, делювиальным, флювиогляциальным, элювиальным и др.) породам; обводнены пластовыми поровыми водами	ГМ-I-а. В условиях испарительного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприятные. Развиты экзогенные процессы зоны недостаточного увлажнения ГМ-I-б. В условиях инфильтрационного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод благоприятные. Развиты экзогенные процессы зоны достаточного увлажнения	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих и водопоглощающих скважин, иглофильтровых установок. Противофильтрационные завесы. Карьерный водоотлив, фильтрующие пригрузки, мелиорация откосов. Узкотраншейные дрены, горизонтальные скважины	Вольфрама – в Северном Казахстане Золота – в Сибири, платины -на Урале, олова – в Приморском крае

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
		ГМ-I-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы		Золота, олова накеля – в Сибири и олова – на Чукотке
	ГМ-II. Неглубокого залегания (до 50 м), приуроченные к скальным и полускальным, терригенным, вулканоген-ным и карбонатным породам; обводнены трещинными водами	ГМ-II-а. В условиях испаритель-ного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприят-ные. Развиты экзогенные процессы зоны недостаточ-ного увлажнения ГМ-II-б. В условиях инфильтрации-онного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод благоприятные Развиты экзогенные процессы зоны достаточного увлажнения ГМ-II-в. В зоне многолетней мерзлоты.	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих скважин, карьерный водоотлив, горизонтальные и лучевые скважины	Меди – в Казахстане, на Урале Никеля – на Урале, в Кемпирсай-ском массиве, меди – на Урале Золота – на Чукотке

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
		Развиты криогенные процессы.		
	ГМ-III. Приуроченные к верхнему структурному ярусу фундамента, сложенного скальными и полускальными и вулканогенными, терригенными и карбонатными породами; обводнены трещинно-пластовыми водами	ГМ-III-а. Ниже зоны экзогенной трещиноватости. Условия питания подземных вод затруднены ГМ-III-б. В зоне экзогенной трещиноватости. Условия питания подземных вод благоприятные ГМ-III-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих и водопоглащающих скважин Подземные дренажные горные выработки с восстающими и опережающими скважинами. Карьерный и шахтный водоотлив. Методы закрепления: глинизация, цементация и др. Подземные дренажные горные выработки с восстающими и опережающими скважинами. Карьерный и шахтный водоотлив. Методы закрепления: глинизация, цементация и др.	Меди – в Казахстане, ртути – на Украине, золота – в Сибири Никеля – на Украине, Урале, свинца – в Казахстане, олова – на Балтийском щите Кобальта – в Верхояно-Чукотской зоне, свинца – в Забайкалье ,

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
	ГМ-IV. Приуроченные к нижнему структурному ярусу фундамента, сложенного скальными интрузивными, метаморфическими метаморфизованными породами; обводнены трещинно-жильными и трещинными водами	ГМ-IV-а. Ниже зоны экзогенной трещиноватости. Условия питания подземных вод неблагоприятные ГМ-IV-б. В зоне экзогенной трещиноватости. Условия питания подземных вод благоприятные ГМ-IV-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы		Германия – на Украине, никеля – на Кольском полуострове, платины на Балтийском и Алданском щитах, железа – в Кривбассе Заполярье; никеля, меди – на Урале, свинца – в Восточной Сибири, вольфрама– в Забайкалье
ВБ. Приуроченные к вулканогенным бассейнам. В обводнении месторождений участвуют напорные и безнапорные и трещинно-пластовые, трещинно-жильные и	ВБ-I. Неглубокого залегания (до 50 м), приуроченные к терригенным рыхлым (аллювиальным, делювиальным, флювиогляциальным, элювиальным и др.) породам;	ВБ-I-а. В условиях испарительного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприятные. Развиты экзогенные процессы зоны недостаточного увлажнения	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих и водопоглощающих скважин, иглофильтровых установок. Противофильтрационные завесы.	Золота – в Казахстане

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
порово-трещинные воды	обводнены поровыми пластовыми водами	ВБ-I-б. В условиях инфильтрационного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод благоприятные. Развиты экзогенные процессы зоны достаточного увлажнения ВБ-I-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	Карьерный водоотлив, фильтрующие пригрузки, мелиорация откосов. Узкотраншейные дрены, горизонтальные скважины	Золота – на Дальнем Востоке в Сибири, в Забайкалье Золота – на Чукотке
	ВБ- II. Месторождения неглубокого залегания (до 50м), приуроченные к скальным и полускальным вулканогенным трещиноватым породам; обводнены трещинными водами.	ВБ-II-а. В условиях испарительного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприятные. Развиты процессы зоны недостаточного увлажнения ВБ-II-б. В условиях инфильтрационного типа водообмена.	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих скважин. Карьерный водоотлив, горизонтальные скважины	Меди – в Казахстане Золота – в Сибири

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
		Условия питания грунтовых вод благоприят-ные. Развиты процессы зоны достаточного увлажнения ВБ-II-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы		Редких металлов – в Сибири
	ВБ-III. Приуроченные к верхнему структурному этажу, сложенными скальными и полускаль-ными вулкано-генными породами; обводнены трещинно-пластовыми и трещинными водами	ВБ-III-а. Расположен-ные в нижнем ярусе эффузивного тела. Условия питания под-земных вод не-благоприятные ВБ-III-б. Расположен-ные в верхнем ярусе эффузивного тела. Условия питания подземных вод благоприятные ВБ-III-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих скважин. Подземные дренажные выработки с восстающими скважинами. Карьерный или шахтный водоотлив. Методы закрепления пород: глинизация, цементация и др.	Кобальта – на Кавказе, свинца – на Алтае, меди – на Тянь-Шане, на Сибирской платформе, Кавказе, Урале. Ртути – в Карпатах, кобальта – на Кавказе, меди – в Казахстане, и др. Ртути – на

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
				Чукотке, Камчатке
	ВБ-IV. Приуроченные к нижнему структурному этажу, сложенному скальными и полускальными терригенно-карбонатными, терригенными, метаморфическими породами; обводнены порово-трещинными водами	ВБ-IV-а. В зоне катагенеза, метагенеза и метаморфизма. Условия питания подземных вод неблагоприятные ВБ-IV-б. В зоне экзогенной трещиноватости. Условия питания подземных вод благоприятные ВБ-IV-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	Подземные дренажные горные выработки с восстающими и опережающими скважинами. Водопонижающие скважины. Методы закрепления пород: глинизация, цементация и др.	Свинца – на Дальнем Востоке, в Казахстане, Восточном Забайкалье, на Кавказе, вольфрама – в Средней Азии Свинца – в Прибайкалье, Забайкалье
АБ. Приуроченные к артезианским бассейнам. В обводнении месторождений участвуют порово-пластовые и трещинные напорные воды	АБ-I. Неглубокого залегания (до 50 м) приуроченные к терригенным рыхлым (аллювиальным, делювиальным, флювиогляциальным,	АБ-I-а. В условиях испарительного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприятные. Развиты процесссы зоны недостаточ-	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих скважин, иглофильтровых установок. Противофильтрационные завесы. Карьерный водоотлив,	Золота – в Средней Азии

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
	элювиальным и др.) породам; обводнены пластовыми поровыми водами	ного увлажнения АБ-I-б. В условиях инфильтрационного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод благоприятные. Развиты процессы зоны достаточного увлажнения АБ-I-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	фильтрующие пригрузки, мелиорация откосов. Узкотраншейные дрены, горизонтальные скважины	Золота, редких металлов – на Дальнем Востоке Золота – в Восточной Сибири Урана
	АБ-II. Неглубокого залегания (до 50 м), приуроченные к скальным и полускальным метаморфическим породам; обводнены трещинными водами	АБ-II- а. В условиях испарительного типа водообмена. Условия питания грунтовых вод неблагоприятные. Развиты процессы зоны недостаточного увлажнения АБ-II-б. В условиях инфильтрационного типа водообмена.	Поверхностный способ осушения с использованием водопонижающих и водопоглощающих скважин. Карьерный водоотлив. Горизонтальные и лучевые скважины. Противофильтрационные завесы	Меди – на Урале Золота – в Восточной Сибири Ртути – на Украине

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
		Условия питания грунтовых вод благоприятные АБ-II-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы		Урана, ванадия
	АБ-III. Приуроченные к верхнему структурному этажу, сложенному рыхлыми и полускальным и осадочными породами; обводнены порово-пластовыми водами	АБ-III-а. В зоне затруднённого и весьма затруднённого водообмена. Условия питания подземных вод неблагоприят-ные АБ-III-б. В зоне свободного водообмена. Условия питания подземных вод благоприятные АБ-III-в. В зоне многолетней мерзлоты. Развиты криогенные процессы	Поверхностный способ с использованием водопонижающих и водопоглощающих скважин. Карьерный водоотлив, горизонтальные и лучевые скважины. Иглофильтровые установки. Противофильтра-ционные завесы	Золота – в Сибири Никеля, железа – на Восточно-Европейс-кой платформе, меди, урана, железа – в Казахстане, Средней Азии Золота – в Восточной Сибири

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
	АБ-IV. Приуроченные к скальным метаморфи-ческим породам фундамента артезианского бассейна; обводнены трещинно-пластовыми и поровыми водами	АБ-IV-а. В зоне весьма затруднённого водообмена. Условия питания подземных вод неблагоприят-ные АБ-IV-б. В зоне свободного водообмена. Условия питания подземных вод благоприятные АБ-IV-в. В зоне многолетней мерзлоты	Подземные дренажные горные выработки с восстающими скважинами. Шахтный водоотлив. Методы закрепления пород: глинизация, цементация и др. Водопонижающие скважины	Железа, бокситов в Европейс-кой части. Золото, никель в Сибири.

бассейну и вулканогенному бассейну. Отнесение месторождений к определённому типу позволяет характеризовать его целым комплексом физико-географических, геолого-структурных, геологических, гидрогеологических, геоморфологических, гидрологических, инженерно-геологических и народнохозяйственных факторов. Это – расчленённость рельефа, возраст и тип геологической структуры, литолого-фациальные и стратиграфические особенности, тектонический режим, особенности стока поверхностных и подземных вод, режим подземных вод, значение водоносных горизонтов в народном хозяйстве, требования к охране водных ресурсов и другие. Соответственно выделяется три типа месторождений полезных ископаемых, приуроченных к гидрогеологическим массивам (ГМ), к вулканогенным бассейнам (ВБ) и артезианским бассейнам (АБ). В пределах этих типов выделяются подтипы, что позволяет конкретизировать геолого-структурные условия месторождения (например, подтип гидрогеологический интермассив – ГИМ или артезианский бассейн платформенного типа – $АБ_п$ и так далее).

В каждом типе выделены классы, принадлежность к тому или иному классу отражает распространение определённых геологических формаций и инженерно-геологических групп пород (скальные, полускальные, рыхлые, крупнообломочные, связные, несвязные и так далее). В гидрогеологическом отношении конкретизируется характер скопления подземных вод, особенности гидродинамической структуры в районе месторождения, условия питания и разгрузки подземных вод. В характеристике класса в общем виде отмечаются закономерности изменения прочности, трещиноватости, пористости, текстуры и структуры горных пород, являющихся вмещающими для полезного ископаемого.

Классы подразделяются на группы. Критерии для выделения групп основаны на преимущественном развитии процессов гипергенеза и метаморфизации, интенсивности и динамичности геологических и инженерно-геологических процессов, пространственных закономерностях питания подземных вод.

Имеющийся геологический, инженерно-геологический и гидрогеологический материал позволяет выделить зоны аэрации, распространения грунтовых и артезианских вод, развития процессов экзогенной и эндогенной трещиноватости, протекания процессов катагенеза, метагенеза и метаморфизма. Принадлежность к определённой группе отражает условия восполнения запасов подземных вод, изменение проницаемости водовмещающих пород, взаимосвязи с поверхностными водами и климатическими условиями, гидрохимическую и гидродинамическую зональность подземных вод. Выделение в группы учитывает также протекание инженерно-геологических процессов и их влияние на обводнённость пород.

В самостоятельную группу для всех классов выделены месторождения в зоне распространения многолетнемёрзлых пород. Криогенные процессы, преобладающие в этой зоне, обусловливают специфические условия распространения подземных вод. При глубоком промерзании изменяются ёмкости гидрогеологических структурных единиц, вода может существовать в твёрдом виде, поле гидродинамических напоров характеризуется резкими флуктуациями параметров, появляются криогенные водоупоры и воды с отрицательной температурой. В зоне многолетней мерзлоты распространены породы с льдистой кристаллизационной структурной связью, развит определённый комплекс экзогенных процессов. Особенностью многолетнемёрзлых пород является тесная зависимость их инженерно-геологических свойств от температурного режима окружающей среды.

Предлагаемая классификация позволяет анализировать гидрогеологические и инженерно-геологические условия месторождения полезных ископаемых, давать прогнозные оценки вероятности

возникновения различных гидрогеологических осложнений и инженерно-геологических процессов и явлений, например, при ведении горных работ. В случае проектирования систем защиты от подземных вод она даёт возможность более целенаправленно использовать метод аналогий. Разработанная классификация может служить для решения различных практических задач. Детальность разработанной классификации позволяет увязать её с технологиями осушения месторождений полезных ископаемых. В пределах каждого класса рекомендованы технологические схемы, методы и различные виды дренажных устройств (см. табл. 3.1).

Прикладное значение разработанной классификации отражено также в табл. 3.2, где представлен комплекс гидрогеологических и инженерно-геологических наблюдений при подземном и открытом способах разработки месторождений. Выделенный комплекс наблюдений по классам месторождений позволяет качественно намечать методы мониторинга для обеспечения максимальной информативности получаемых данных.

Значение рассмотренного подхода к обоснованию совокупностей месторождений полезных ископаемых и предлагаемой классификации не исчерпывается описанными примерами: в целом она применима для решения многих задач практического и теоретического характера, требующего предварительного обобщения и анализа гидрогеологической и инженерно-геологической информации по месторождениям-аналогам.

Таблица 3.2 - Комплекс гидрогеологических и инженерно-геологических наблюдений по предлагаемой типизации

Вид наблюдений	Проведение наблюдений на месторождениях разных классов							
	ГМ-I, ВБ-I, АБ-I,	ГМ-II, ВБ-II, АБ-II	ГМ-III	ГМ-IV	ВБ-III	ВБ-IV	АБ-III	АБ-IV
1	2	3	4	5	6	7	8	9
При подземном способе разработки месторождений								
Гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения в пределах горного отвода	Эпизодически (Э)	+	+	+	+	+	+	+
Гидрогеологическая съемка	Э	Э	+	Э	Э	Э	+	Э
Наблюдения за водопритоками в горные выработки и шахтным водоотливом	Э	+	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 3.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Наблюдения за сооружением и эксплуатацией дренажных устройств	Э	+	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за химическим составом подземных и шахтных вод	+	+	+	+	+	+	+	+
Наблюдением за бурением разведочных, опережающих и дренажных скважин	-	-	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за деформациями подземных горных выработок	-	-	+	+	+	+	+	+
Уточнение физико-механических свойств пород и руд	-	-	Э	Э	Э	Э	+	Э
Наблюдения за режимом поверхностных вод в пределах горного отвода	+	+	Э	+	Э	Э	+	Э
Наблюдения за режимом подземных вод в пределах горного отвода	-	-	Э	+	Э	Э	+	Э
Наблюдения за режимом подземных вод в районе промплощадок	+	+	Э	Э	Э	Э	+	+
Специальные гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения	-	-	+	+	+	+	+	+
Геокриологические наблюдения	+	+	Э	+	Э	+	+	-
При открытом способе разработке месторождений								
Гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения в пределах горного отвода	Э	+	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 3.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Гидрогеологическая съёмка карьера	-	-	Э	-	-	-	Э	-
Наблюдения за водопритоками	Э	Э	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за сооружением и эксплуатацией дренажных устройств	Э	Э	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за химическим составом подземных и дренажных вод	+	+	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за устойчивостью и деформациями горных выработок (бортов карьера)	+	+	Э	+	Э	+	+	Э
Уточнение физико-механических свойств пород и руд	-	-	+	+	+	+	+	Э
Наблюдения за режимом поверхностных и подземных вод в пределах горного отвода	+	+	+	+	+	+	+	+
Наблюдения за режимом подземных вод в районе промплощадок	+	+	+	+	+	+	+	+
Специальные гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения	+	+	+	+	+	+	+	+
Геокриологические наблюдения	+	+	+	+	+	+	+	-

Примечание. При эпизодических наблюдениях частота их может уменьшаться в 2 раза по сравнению с принятой. Геокриологический мониторинг проводится на месторождениях, распространённых в зоне многолетней мерзлоты (группа «в»); (+) наблюдения рекомендуется проводить, (-) при наличии обоснования наблюдения могут не проводиться.

3.3. Технико-экономическая оценка развития технологии осушения месторождений

Технология осушения месторождений полезных ископаемых интенсивно совершенствуется в течение последних лет. Освоен ряд новых технологических приёмов (отжатие воды воздухом, внедрение опережающего осушения на локальных участках, использование водопонижающих скважин диаметром до 1,5 м, горизонтальных и восстающих скважин), применение которых в большинстве случаев имело целью повышение степени осушения обводнённых пород и в конечном итоге улучшение технико-экономических показателей деятельности предприятия в целом.

Изменение технико-экономических показателей деятельности горнодобывающего предприятия, т.е. изменение уровня развития производства, происходит под воздействием трёх основных факторов: научно-технического прогресса, организации производства и природных условий. При анализе данных показателей важно установить, в какой мере итоги достигнуты за счёт изменения организационного и природного факторов, а в какой - за счёт научно-технического прогресса. Системный подход требует также, чтобы оценка отдельного технологического процесса (например, технологии осушения) была увязана с общей оценкой уровня развития производства.

Решение поставленной задачи выполняется с использованием разработок академика В. А. Трапезникова по оценке технического уровня производства и темпов технического прогресса [15].

Технический уровень производства $У$ (руб/чел.) определяется по следующей формуле:

$$У=B^2/L\Phi_{ос}, \qquad (3.1)$$

где B — объём валовой (товарной) продукции, руб.;
L — численность трудящихся, чел;
$\Phi_{ос}$ — стоимость основных фондов, руб.

Темп технического прогресса T (%) рассчитывается по формуле:

$$T=(\frac{У_1}{У_б} -1)100, \qquad (3.2)$$

где $У_1$, $У_б$ — оценки технического уровня соответственно по сравниваемому и базовому предприятиям, руб/чел.

Экономический анализ зависимости (3.1) применительно к условиям горнодобывающего производства показал, что определяемый показатель $У$

будет характеризовать не только технический уровень производства, но и его общий уровень, поскольку существует влияние природного фактора (стоимость произведенной продукции включает в себя и стоимость продукта, полученного за счёт наличия дифференциальной ренты). Введение в уравнение (3.1) коэффициента, характеризующего природные условия производства[16], также не позволит учитывать в показателе *У* эффективность использования предмета труда.

Успешное функционирование производственного процесса, как известно, возможно при тесном взаимодействии и органическом единстве трёх его составляющих: предмета труда, средств труда и самого труда. Кроме того, изменение качественно-количественной характеристики, физико-химических и других свойств предмета труда (материалов, сырья, топлива, энергии) самым непосредственным образом сказывается на темпах роста научно-технического прогресса. Значимость учёта материальных ресурсов при определении уровня развития производства вызвана также ограниченностью запасов некоторых видов полезных ископаемых, их различными природными качествами. Объективная оценка уровня развития производства осуществляется только при учёте эффективности использования материальных, финансовых и трудовых ресурсов. На основе изложенных теоретических предложений получена следующая зависимость для оценки общего уровня развития горного производства $У_г$:

$$У_г = (\sum_{i=1}^{m} T_i Ц_i)^3 / A; \qquad (3.3)$$

$$A = (LF_ф P + E_м K)Ф_{ос} \sum_{i=1}^{m} T_i \sum_{j=1}^{n} q_{ij} Ц_{мij}, \qquad (3.4)$$

где T_i — объём произведённой продукции i-го наименования, натуральные ед.;

$Ц_i$ — цена единицы продукции i-го наименования, руб.;

$F_ф$ — фактически отработано часов, ч;

P — стоимость затраченного необходимого труда 1 чел.-ч, руб/чел.-ч;

$E_м$ — минимально допустимый коэффициент эффективности капитальных вложений без учёта дополнительного рентного дохода (в 1984 г. $E_м$=0,88);

K — капитальные вложения, руб.;

q_{ij} — расход j-го вида материала на производство единицы i-го наименования продукта;

$Ц_{мij}$ — цена единицы j-го вида материала, руб.;

m, n — количество наименований соответственно произведенной продукции и материалов.

Предложенная формула (3.3) представляет интегральный показатель,

учитывающий отдачу затраченного живого (необходимого и прибавочного) труда

$$\sum_{i=1}^{m} T_i Ц_i / (LF_ф P + E_м K)$$ и овеществлённого труда (3.5)

$$\sum_{i=1}^{m} T_i Ц_i / Ф_{ос}$$ (фондоотдачу) и

$$\sum_{i=1}^{m} T_i Ц_i / (\sum_{i=1}^{m} T_i \sum_{j=1}^{n} q_{ij} Ц_{мij})$$ (материалоотдачу). (3.6)

Рассчитанная по формуле (3.3) величина $У_г$ характеризует общий, достигнутый как за счёт природного, так и технического, технологического и организационного факторов, уровень развития производства, а не только технический, поскольку масса произведенной продукции включает в себя и количество продукта, полученного за счёт существования дифференциальной ренты в горнодобывающей отрасли промышленности.

Оценка уровня развития любого *k*-го технологического процесса горнодобывающего производства с использованием зависимости (3.3) выполняется при учёте доли общественного продукта, приходящегося на данный процесс.

Исходя из этого, общий уровень развития технологии осушения $У_о$ определяется по формуле [17]:

$$У_о = (З_{ос} / З_{об})^3 (\sum_{i-1}^{m} T_i Ц_i)^3 / A, \quad (3.7)$$

где $З_{ос}$ и $З_{об}$ — соответственно полные, научно обоснованные затраты на осушение и суммарные — на получение конечной продукции, руб.

Оценка влияния природного фактора на уровень развития технологии осушения выполняется в соответствии с предлагаемым подходом с учётом рентного дохода предприятия. Улучшение природных условий осуществления отдельного процесса приводит к росту рентного дохода, ухудшение — к его снижению. Исходя из этого, можно получить следующую зависимость:

$$У_{по} = (З_{ос}/З_{об})^3 R^3/A, \quad (3.8)$$

Где, $У_{по}$ — показатель оценки уровня природного фактора в развитии технологии осушения;

R — дополнительный чистый доход, получаемый при наличии дифференциальной ренты, руб.

Для характеристики (оценки) технического уровня производства необходимо из всей произведенной продукции выделить часть её, получаемую за счёт влияния природного фактора, т.е. исключить из неё

стоимость продукта, произведенного в результате наличия дифференциальной ренты (дополнительного чистого дохода). Оценка технического уровня технологии осушения может быть выполнена с помощью следующего уравнения:

$$У_{то}=(З_{ос}/З_{об})^3(\sum_{i=1}^{m} T_i Ц_i - R)^3 / A, \qquad (3.9)$$

где $У_{то}$ — показатель оценки технического уровня технологии осушения.

Темп технического прогресса в технологии осушения T_o (%) определяется по формуле:

$$T_o=(\frac{У_{ТО}}{У_{ТОБ}} -1)100, \qquad (3.10)$$

где, $У_{то}$ и $У_{тоб}$ — оценки технического уровня технологии осушения соответственно на сравниваемом и базовом предприятиях.

По разработанной методике была проведена технико-экономическая оценка уровня и темпов развития технологии осушения при разработке Лебединского, Стойленского, Михайловского и Ковдорского месторождений полезных ископаемых.

Разработка данных месторождений осуществляется открытым способом. Основные требования к их осушению следующие: исключение оползневых деформаций уступов бортов, обеспечение допустимого уровня развития суффозионных процессов, создание безопасных условий для эффективного ведения горных работ по обводнённым песчано-глинистым породам и добычных работ по руде, снижение влажности руды до нормативной.

При проектировании осушения на Лебединском и Стойленском карьерах учитывали геологическое и гидрогеологическое строение, систему ведения горных работ, техническое оснащение, экономику. В настоящее время на этих карьерах применяется комбинированный способ осушения. На Лебединском карьере система осушения включала на анализируемый период внешний и внутренний дренажные контуры. Внешний контур располагается по периметру карьера на расстоянии до 200 м от бровки бортов. Состоит он из подземного дренажного штрека со сквозными фильтрами и восстающими скважинами и водопонижающих скважин. Внутренний контур включает открытые и закрытые дренажные канавы, горизонтальные скважины (здесь используются также фильтрующие пригрузки, расположенные внутри карьера на обводнённых уступах). В последние годы на Лебединском карьере произошло перераспределение водопритоков между внутренним и внешним дренажными контурами, которое при практически неизменном суммарном водопритоке привело к увеличению объёма воды, принимаемого внутренним

контуром, т.е. к росту водопритока в зону ведения горнотранспортных и добычных работ.

На Стойленском карьере технология осушения незначительно отличается от применяемой на Лебединском, и система осушения имеет аналогичную структуру. Характерной особенностью является то, что приток воды во внешний дренажный контур на Стойленском карьере в анализируемый период почти в 2 раза превышал водоприток во внутренний контур, что в целом является положительным моментом.

Суммарный водоприток в карьеры изменялся в пределах 3000-6000 $м^3$/час. За последние годы коренных изменений в технологии осушения обоих карьеров не наблюдается, её развитие происходит в основном с использованием подземного способа осушения за счёт повышения эффективности применения восстающих и горизонтальных скважин.

Расчёты по предложенной методике показали, что в 1980—1984 гг. общий уровень развития технологии осушения на Лебединском карьере изменялся незначительно и в среднем близок к величине 2,8. Технический уровень не возрос и оставался равным 1,5. Показатель уровня природных условий в 1981 и 1982 гг. уменьшился почти в 2 раза по отношению к 1980 г., но к концу анализируемого периода восстановился до первоначального значения. Эксплуатационные затраты на осушение снизились с 4003 (в 1980 г.) до 3900 тыс. руб. (в 1984 г.).

На Стойленском карьере общий уровень развития технологии осушения в рассматриваемый период имеет тенденцию к снижению (от 3,07 до 2,03), уровень технического развития несколько возрос (от 1,77 до 1,92), показатель уровня природных условий значительно снизился (до $0,012*10^{-3}$). Эксплуатационные затраты на осушение возросли с 2779 (в 1980 г.) до 3091 тыс. руб. (в 1984 г.). Такие данные по обоим предприятиям свидетельствуют о том, что развитие технологии осушения не обеспечивает необходимую интенсивность повышения технико-экономических показателей процесса осушения.

Повышение технического уровня развития системы осушения отмечается только на Стойленском карьере, что объясняется внедрением таких технических средств, как горизонтальные и восстающие скважины. Вместе с тем на Стойленском карьере отмечается ухудшение природных условий, что уже само по себе требует совершенствования технологии осушения и проведения мероприятий, обеспечивающих повышение её общего уровня развития. Для выявления основных направлений дальнейшего развития технологии осушения на карьерах был выполнен детальный анализ показателей эксплуатации дренажных систем. Фильтрационное поле вблизи системы осушения было разбито на характерные ленты тока, в пределах которых оценивалась технология ведения горных работ на уступах рыхлых

пород и выявлялись инженерно-геологические процессы, протекающие на обводнённых уступах бортов. Полученные данные показали, что на Лебединском карьере суффозионные явления отмечаются на участках сосредоточенных выходов подземных вод с дебитом, превышающим 0,16 $м^3$/ч на 1 м протяжённости откоса, оползни происходят при водопритоках больше 0,5 $м^3$/ч. Имеет место некоторое снижение интенсивности инженерно-геологических процессов на обводнённых уступах при примерном равенстве водопритоков во внешний и внутренний дренажные контуры на выделенном участке.

На Стойленском карьере в пределах обводнённых уступов северного, северо-восточного, юго-западного и южного бортов выявлено около 20 мест развития суффозии, 10 - оплывания и 2 - оползней. Со стороны юго-западного борта отмечается подпор подземных вод вследствие инфильтрации воды их хвостохранилища.

Перераспределение водопритока между дренажными контурами в сторону увеличения его доли, приходящейся на внутренний контур, ведёт к загрязнению всё большей части подземных вод, что не отвечает требованиям охраны окружающей среды. Применяемая на обоих карьерах технология осушения не обеспечивает снижения обводнённости буровзрывных скважин.

Все это свидетельствует о том, что выполненная оценка уровня развития технологии осушения на обоих карьерах подтверждает необходимость её совершенствования. Следует учесть имеющиеся тенденции развития технологии осушения за рубежом [18], а также инновационные разработки по внедрению отечественных приёмов, при реконструкции систем осушения в пределах рабочих и нерабочих бортов на внешнем дренажном контуре и на уступах внутри карьера.

Оперативные мероприятия по совершенствованию технологии осушения на действующих дренажных системах карьеров заключаются в усилении внешнего дренажного контура на участках, где он принимает менее 50 % суммарного водопритока, а также в усилении внутреннего контура за счёт сооружения горизонтальных скважин на участках, где водоприток превышает допустимый удельный водоприток на 1 м протяжённости борта карьера, и на участках распространения обводненных юрских песчано-глинистых пород.

Технология осушения Лебединского и Стойленского карьеров должна учитывать постоянное увеличение их глубины, необходимость повышения эффективности буровзрывных и вскрышных работ и использование новой высокопроизводительной горнодобывающей техники. Обоснование принимаемых оперативных решений следует выполнять на единой для обоих карьеров имитационной модели.

Предложенная методика оценки уровня и темпов развития технологии

осушения позволяет объективно оценивать необходимость её совершенствования на конкретных предприятиях с учётом изменения природных условий под влиянием геотехногенного воздействия (строительство водохранилищ, хвостохранилищ, гидроотвалов, изменение проницаемости пород под влиянием массовых взрывов и т.д.) и общего уровня развития горнодобывающего производства.

3.4. Инновационные технологии и проектирование систем осушения при освоении месторождений полезных ископаемых

При разработке и эксплуатации дренажных систем ставится цель: обеспечение безопасных условий труда при высокопроизводительной работе горного оборудования. Одной из основных задач является постоянный поиск и разработка технологических приёмов и технических средств, обеспечивающих снижение затрат на осушение. На сильно обводнённых месторождениях затраты на осушение в России достигают 10-20 % от общих затрат на добычу руды. По имеющимся данным на карьерах США затраты на осушение изменяются от 5 до 37 долларов на тонну полезного ископаемого [19].

Схемы, методы и приёмы, используемые в технологии осушения наряду с технологией ведения горных работ, в значительной мере определяются величиной водопритока к горным выработкам, проницаемостью дренируемых пород и требуемой величиной понижения уровня подземных вод.

Обширный комплекс технологических приёмов и технических средств позволяет обосновывать системы осушения с наперёд заданными свойствами в самых различных природных условиях с учётом технологии ведения горных работ как при открытом, так и при подземном способах отработки месторождений.

Основными требованиями к осушению при открытом способе отработки месторождения в период эксплуатации карьера являются исключение оползневых деформаций уступов на рыхлой вскрыше, обеспечение допустимого уровня суффозионных процессов, исключение проскока дренажных вод на добычные уступы, создание благоприятных условий для работы горно-транспортного оборудования.

При открытой разработке месторождений за рубежом в основном применяется поверхностных способ осушения; в России и странах СНГ - подземный. При подземной добыче полезного ископаемого за рубежом, в России и странах СНГ используют подземный способ осушения, реже - комбинированный.

При поверхностном способе осушения применяют дренажные устройства, которые сооружают с поверхности земли, уступов или забоя карьера. Подземный способ предполагает сооружение дренажных устройств из подземных горных выработок.

Технология защиты от подземных вод должна учитывать особенности рабочего борта и борта на предельном контуре. На рабочем борту по мере продвижения фронта горных работ изменяется величина водопритока, положение депрессионной кривой на откосе уступа борта карьера, подрабатываются со временем защитные дренажные устройства. Технология защиты рабочего борта предусматривает перемещение дренажных устройств как внутри карьера, так и за его пределами.

Для защиты постоянного борта от отрицательного влияния подземных вод используют комбинации различных дренажных устройств в сочетании с противофильтрационными завесами и фильтрующими пригрузками откосов рыхлых пород.

Применяют локальные подсистемы на участках наиболее опасных по развитию деформаций в рыхлых породах, а также в пределах обнажения сильно раздробленных трещиноватых зон. Распространение получают восстающие, лучевые и горизонтальные скважины, могут применяться дренажные щели и трубчатые дрены.

Осушение обводнённых пород может быть активным или пассивным. Технология пассивного осушения предполагает, что поток подземных вод выходит на откос уступа борта карьера или в подземную выработку и затем отводится по водоотводящим дренам за пределы зоны ведения горных работ. Критерием применения пассивного осушения является условие $q_c < q_{доп.}$ (q_c - величина водопритока на 1 п.м. длины выработки или откоса; $q_{доп.}$ - допустимый водоприток). Технология активного осушения основана на перехвате потока подземных вод до его выхода на откос уступа борта карьера или в подземную горную выработку. Показателем эффективности технологии активного осушения является величина $\frac{q_c - q_a}{q_c - q_{доп.}} \geq 1,$ где q_a - водоприток на 1 м длины откоса при активном осушении.

Величина $q_{доп.}$, как правило, определяется исходя из ограничений по развитию фильтрационных деформаций или из условий обеспечения устойчивости откоса борта карьера и создания нормальных условий для высокопроизводительной работы горного и транспортного оборудования.

При пассивном осушении используют открытые (на рабочем уступе) и закрытые (на борту в предельном положении) прибортовые дрены. Открытая прибортовая дрена представляет собой канаву, пройденную вдоль обводнённого откоса. Закрытая прибортовая дрена отличается тем, что в канаву укладывают дренажные трубы, которые засыпают специально

подобранной обсыпкой. Подземная вода из прибортовых дрен собирается в открытые или подземные водосборники и затем откачивается на поверхность.

При активном осушении используют водопонижающие, водопоглощающие, горизонтальные и лучевые скважины. Водопонижающими скважинами вскрывают на всю мощность один или два водоносных пласта, оборудуют их фильтрами и водоподъёмными устройствами для откачки воды. Критерием эффективности применения водопонижающих скважин являются соотношения $K \geq 3$ м/сут и $h_e \geq S + h_н + h_ф$ (где К - коэффициент фильтрации пород; h_e – напор водоносного горизонта от его подошвы; S – понижение уровня подземных вод; $h_н$ – максимальная глубина погружения низа насоса под динамический уровень в скважине; $h_ф$ – потери напора на фильтре скважины).

Водопоглощающие скважины сооружают, как правило, на два водоносных пласта и оборудуют фильтрами. Подземная вода по скважине из одного водоносного пласта (дренируемого) самотёком поступает во второй пласт (поглощающий). Критериями использования водопоглощающих скважин являются соотношения $k_1m_1 \geq k_2m_2$ и $H_2 > H_1$ (где k_1m_1 – водопроводимость поглощающего пласта, k_2m_2 – водопроводимость дренируемого пласта; H_1и H_2 – напоры в поглощающем и дренируемом пластах, соответственно).

Горизонтальные скважины сооружают с бермы уступа в обводнённый пласт и вскрывают его по простиранию. Скважину оборудуют фильтровой колонной, длина которой может составлять десятки метров. Вода самотёком по горизонтальной скважине поступает в водоотводящую систему (например, водосборник), и удаляется за пределы ведения горных работ. Критериями эффективного применения горизонтальных скважин являются соотношения $K \geq 0.5$ м/сут. и $H > h_к$ (где Н – напор над горизонтальной скважиной до её сооружения, $h_к$ – высота капиллярного поднятия в осушаемых породах).

Лучевые скважины сооружают из специально пройденного шахтного ствола, вскрывают водоносный пласт по простиранию и располагают скважины по радиусам к стволу. Лучевые скважины оборудуют фильтровыми колоннами различной длины. Подземная вода самотёком по лучевой скважине поступает в шахтный колодец, из которого перепускается на нижние горизонты или в соседние колодцы или удаляется водоподъёмными устройствами за пределы участка ведения горных работ. Критерием применения лучевых скважин является $K \geq 0.5$ м/сут и $H > h_к$.

При подземном способе осушения применяют дренажные штреки с восстающими скважинами и сквозными фильтрами. Сквозные фильтры сооружают с поверхности земли, вскрывают на всю мощность один или несколько водоносных пластов и оборудуют фильтрами на каждый

водоносный пласт. Забой сквозного фильтра подсекает подземную горную выработку. Подземная вода самотёком по сквозному фильтру поступает в подземную выработку, из которой откачивается на поверхносгь. Критерием применения сквозных фильтров является К $\geq$ 1 м/сут.

Восстающие скважины сооружают из подземной горной выработки вертикально вверх или под наклоном, вскрывают водоносный пласт на мощность 2-5 м от подошвы и оборудуют фильтрами. Подземная вода через восстающую скважину поступает в подземную выработку и затем откачивается на поверхносгь. Критерием использования восстающих скважин является условие К $\geq$ 1 м/сут. Для перехвата потока подземных вод в зонах понижения рельефа подошвы водоносного пласта целесообразно сооружать пучки наклонно-восстающих скважин. Критерием для расположения скважин в пучке исходя из условий их взаимодействия является выражение: $\alpha = arctg\frac{m}{M\sin\varphi/2}$, где α – угол наклона скважины к горизонту, град.; m –радиус зоны резкой деформации потока подземных вод, м; M – расстояние по вертикали от устья скважины до нижней кромки фильтра, м; φ – угол между проекциями осей скважин на горизонтальную плоскость, град.

Выбор и обоснование структуры системы осушения является наиболее ответственной задачей. Могут применяться контурные, линейные, локальные схемы с равномерным или неравномерным расположением дренажных устройств. Методы математического моделирования, которые позволяют учесть влияние как природных, так и техногенных факторов на структуры системы осушения и технологию, представлены в разделе 11.

Планирование развития системы осушения тесно связано с длительным периодом эксплуатации горного предприятия (более 50 лет) при постоянно изменяющейся горно-технической обстановке. На основе данных режимных наблюдений, диагностического обследования с помощью тепловизора и гидрогеологической съёмки откосов уступов бортов карьера, экспресс-обследования дренажных скважин, использовании ГИС-технологий создают базы данных технико-экономических показателей работы системы осушения. На выделенных лентах тока к характерным участкам горных выработок наносят деформации прибортовых массивов горных пород, определяют первоочередные участки усиления системы осушения, количество и тип дренажных устройств. Управляющие решения по развитию системы осушения опробывают на её математической модели, используя методы имитационного моделирования многовариантного решения технологических задач.

Проектирование систем осушения при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых развивается длительное время как за

рубежом, так и в Российской Федерации. Достаточно сказать, что в РФ разработаны и реализованы проекты дренажно-осушительных комплексов на Лебединском, Стойленском и Михайловском карьерах (КМА), Северо-Уральских бокситовых рудниках, объектах АЛРОСы, Ковдорском и Коршуновском карьерах; Запорожском железорудном комбинате, обьектах Полтавского ГОКа (Украина); карьерах Соколовско-Сарбайского ПГО (Казахстан) и др. На этих предприятиях запроектированы и сооружены мощные подземные дренажные комплексы, поверхностные системы осушения, созданы и локальные схемы дренажа на особо обводнённых участках ведения горных работ. Системы осушения разработаны для месторождений, на которых горные работы ведутся открытым способом с применением цикличной и поточной технологий, а также для месторождений, отрабатываемых подземным способом с использованием технологий как с обрушением вмещающих пород, так и с сохранением их целостности. Многие дренажные сооружения функционируют не одно десятилетие, обеспечивая безопасное ведение горных работ в сложных гидрогеологических условиях. Выполняются проектные работы по осушению ряда новых, предназначенных к освоению месторождений в России и странах дальнего зарубежья: Вьетнам, Гвинея, Южная Америка. В целом эффективность систем осушения определяется детальностью информации и проработки многочисленных факторов как природного, так и технико-экономического характера (табл. 3.3).

Надёжность проектов осушения опирается, прежде всего, на расчётную гидрогеологическую базу, которая в свою очередь зависит от глубины обработки исходной информации. В предыдущие годы гидрогеологические расчёты систем осушения проводились с применением инструментов, обладающих низкой разрешающей способностью, в связи с чем при расчётах вводился, как правило, завышенный «резерв» по водопритокам и времени достижения нормативного осушения пород. Это требовало привлечения больших капиталовложений и людских ресурсов. В условиях высокой неопределённости исходной информации такие издержки были допустимы, и, как показал многолетний опыт работ, себя оправдывали.

В настоящее время горнодобывающим предприятиям потребовалось применение более эффективных, менее затратных, экономичных систем осушения, которые бы сооружались в минимальные сроки. Эти требования вызвали необходимость использования инновационных технологий уже на стадии разработки проектно-сметной документации для резкого сокращения сроков проектирования, использования оперативных методов гидрогеологических расчётов, выполнения имитационного моделирования, совершенствования самих систем и методов осушения. Расширение международных связей открыло доступ к новейшим мировым достижениям

Таблица 3.3 - Обоснование защиты горнодобывающих предприятий от обводнения

в области геоинформационных технологий, в том числе к компьютерным программам численного моделирования процессов геофильтрации, геомиграции, охраны и рационального использования водных ресурсов (смотри раздел 11).

Имеющийся программный комплекс GMS позволяет быстро и с высокой степенью точности решать трёхмерные задачи по проектированию систем осушения практически для любых гидрогеологических и горнотехнических условий отработки месторождения. Как правило, вначале строится региональная модель, охватывающая все объекты, попадающие в зону влияния осушения и могущие оказать то или иное воздействие на процесс осушения (замедлять или ускорять снижение уровней подземных вод, увеличивать или уменьшать водопритоки и др.), и изменения качества дренажных вод (загрязнять или очищать). Затем, используя принцип телескопичности, строятся локальные, более подробные модели, которые позволяют рассчитывать (прогнозировать) на любой отрезок времени качественные и количественные показатели элементов системы осушения с учётом всех возмущающих факторов, заложенных в региональной модели и детализированных в локальной, и изменений горнотехнических условий на участке горной выработки. При моделировании проводится обработка первичной исходной информации, что существенно повышает надёжность информации, закладываемой в гидрогеологические расчёты. В результате использования компьютерных технологий и современных суперкомпьютеров для горных предприятий создаются постоянно действующие модели систем осушения, на которых в режиме on-lain осуществляется прогнозирование и расчёт технологических параметров при изменении технологии ведения горных работ и природной обстановки.

В настоящее время геофильтрационные, геомиграционные и физико-химические расчёты предусматриваются во всех проектных работах. Это даёт возможность быстро прорабатывать многие десятки вариантов параметров структуры системы осушения, отдельных участков горных выработок и дренажных устройств, их размещения и плотности, а также определять количество и качество дренажных вод, и, в конечном счёте, выбирать оптимальный и наиболее эффективный вариант защиты горных выработок от обводнения.

Указанный подход был применён к решению проблем защиты горных объектов от подземных вод в работах «…Система осушения карьера при разработке месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова», «…Расширение 3-й очереди дренажной системы Лебединского карьера…», «…Осушение рудника «Железный» Ковдорского ГОКа, «…Защита от подземных вод при освоении Приоскольского месторождения железных руд», «Защита от подземных вод карьера Тха-Кхе», (Вьетнам), и др.

Выполнялись также прогнозы качества дренажных вод, изменения солёности вод в осушаемых пластах, развитие ореолов загрязнения. Компьютерные технологии обеспечили разработку эффективных проектных решений для мокрой консервации рудников, в частности, Золотушинского, что в Алтайском крае, и шахт Таврического ГОКа (Украина). Длительные наблюдения позволили установить практически полное совпадение прогнозных и фактических изменений гидрогеологической обстановки в процессе затопления горных выработок.

К числу актуальных проблем осушения карьеров относится охрана подземных вод и рациональное использование откачиваемых дренажных вод [21].

В проекте системы при строительстве карьера Ломоносовского ГОКА ОАО «Севералмаз» реализована экономичная технология утилизации дренажных вод; разработан комплекс мероприятий по использованию дренажных вод подземной системы осушения Лебединского карьера в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения, для чего ВИОГЕМом был выполнен подсчёт запасов подземных вод (утверждены запасы в количестве около 200000 $м^3$/сут), а затем разработан проект водозабора, совмещённого с системой осушения, производительностью 19000 $м^3$/ч; на Коршуновском карьере были разработаны технические и технологические решения по снижению количества хлоридных рассолов, поступающих в дренажную систему, и технологический регламент по обессоливанию дренажных вод и утилизации твёрдого осадка; по Ковдорскому ГОКу разработан технологический регламент на очистку дренажных вод в количестве 1500 $м^3$/ч до норм рыбо-хозяйственного значения.

К инновационным проектным разработкам следует отнести энергосберегающую технологию осушения карьеров и угольных разрезов с помощью горизонтальных дренажных скважин. Первые работы по бурению горизонтальных дренажных скважин проводились на Лебединском карьере в восьмидесятых годах прошлого столетия с целью снятия остаточных напоров в альб-сеноманских песках, выходящих в борт карьера [21]. Бурение осуществлялось станком УЛБ-130 конструкции ВИОГЕМ, при этом использовалась совершенно новая технология проходки и обустройства горизонтальных скважин в обводнённых рыхлых породах (см. раздел 6.7). Горизонтальные скважины обеспечили более 80 % перехвата подземного потока на локальных участках, что послужило основанием для дальнейшего их применения при обеспечении устойчивости уступов и участков бортов Лебединского карьера.

3.4.1. Система осушения из горизонтальных скважин

Полная замена подземной системы осушения на поверхностную с применением горизонтальных дренажных скважин была выполнена в 2000 году для угольного разреза «Восточный» (Экибастузский угольный бассейн, Республика Казахстан) совместно специалистами ВИОГЕМа и разреза «Восточный» [22,23].

Разрезом "Восточный" отрабатывается восточная часть Экибастузского угольного бассейна, представляющего собой мульду размером в плане около 120 км^2 и глубиной в центре мульды до 1000 м.

Обводнение месторождения связано с трещинным водоносным комплексом, развитым в углях средне-нижнекарбонового возраста. Суммарная мощность обводнённой толщи составляет около 600 м, породы залегают с пологим (до 20^o) падением от флангов к центру мульды и представляют собой пёстрое переслаивание маломощных (0,5–2 м) слоёв трещиноватых углей и слабопроницаемых прослоев алевролитов. Значение коэффициента фильтрации обводнённой толщи составляет 1–4 м/сут в верхней части углей, уменьшаясь с глубиной до 0,01-0,006 м/сут. При наличии гидравлической связи водоносный комплекс можно рассматривать как единый водоносный горизонт.

В естественных условиях питание водоносного комплекса происходило за счёт инфильтрации атмосферных осадков и перетекания из нижележащего напорного водоносного горизонта, приуроченного к карбонатным породам девона. Уровень воды залегал на абс. отм. 172 – 205 м (при абсолютных отметках поверхности земли 170–300 м). Подземный поток имел северо-восточное направление и разгружался в озеро Экибастуз, расположенное на северо-западном фланге мульды. По химическому составу подземные воды характеризовались как хлоридно-сульфатные, натриево-магниевые с минерализацией от 1,7 до 48,2 г/л.

Экибастузское месторождение каменного угля разрабатывается с шестидесятых годов прошлого столетия тремя угольными разрезами: "Восточным" – северо-восточная часть, "Богатырь" – южная и юго-восточная часть, и "Северным" – северная и северо-западная часть мульды. Отработка запасов на всех разрезах ведётся от флангов к центру, т.е. в направлении увеличения глубины залегания угольных пластов. В соответствии с такой схемой вскрытия постоянный борт формируется по краю мульды. Вскрышные работы ведутся по направлению к центру мульды.

До 2000 года система осушения всех разрезов была одинаковой: ниже добычных уступов проходились дренажные штреки, из которых бурились в обводнённую угольную толщу наклонно-восстающие дренажные скважины. Система обеспечивала понижение уровня воды ниже отметок ведения

очистных и подготовительных работ. Поступающая в дренажные штреки вода подавалась на очистные сооружения и сбрасывалась в гидрографическую сеть.

Угольные пласты в пределах разреза "Восточный" падают с востока на запад, поэтому вскрышные работы ведутся только в западном направлении по фронту 2,8 км. К 2000 году глубина горных работ достигла 150 м (отм. +50 м). Уступы нерабочего восточного борта сформировались до гор. +100 м в стационарное положение.

На вскрыше оборудованы железнодорожные выездные траншеи, добычные горизонты располагаются через 25 м на горизонтах +100, +75, и +50 м и вскрыты тремя угольными конвейерными подъёмниками. Разработка горной массы на вскрышных и добычных горизонтах ведётся ковшовыми и роторными экскаваторами с предварительным рыхлением горной массы буровзрывным способом. Средняя глубина буровзрывных скважин на вскрышных уступах 15 м, на добычных – 25 м. При проектной производительности разреза "Восточный" 20 млн.т угля в год среднее время отработки добычного горизонта (углубление нижнего уступа на 25 м) составляет три года.

Поле разреза "Восточный" осушалось подземным способом. Система осушения состояла из наклонных шахтных стволов с двумя дренажными штреками. Штреки были ориентированы в субмеридиональном направлении, от штреков ответвлялись орты с шагом 600 м. В штреках и ортах закладывались дренажные узлы, которые располагались на расстоянии от 200 до 480 м друг от друга. Из каждого узла было пробурено по 5-7 наклонно–восстающих дренажных скважин глубиной от 90 до 240 м каждая. Суммарный приток из всех скважин составлял около 40 $м^3$/ч. Указанная дренажная система обеспечивала в достаточной мере осушение пород до гор. +75 м. В результате ведения горно-осушительных работ в пределах разреза "Восточный" уровень воды в угольной толще снизился на величину от 10 до 100 м, а подземный поток изменил своё направление с северного на южный и из линейного преобразовался в радиальный с центром депрессии вблизи дренажных штреков разреза "Восточный". При этом озеро Экибастуз превратилось из области разгрузки подземных вод в область их питания и стало пополнять ресурсы водоносного комплекса угольной толщи высокоминерализованными водами.

Минимальные отметки уровня водоносного горизонта угольной толщи разреза "Восточный" к 2000 году составляли от +60 до +100 м (по трассе дренажных штреков), в то время как горные работы уже достигли отметки +50 м, в связи с чем в выемочных блоках появилось высачивание воды в бортах и началось скопление её на почве добычной траншеи. Высокие уровни воды приводили к негативным последствиям и на вскрышных

уступах. Все это привело к снижению производительности труда и возникновению отрицательных инженерно-геологических процессов (деформаций уступов, развитию оползней, смерзанию в зимний период замоченных углей и т.д.), а также вызвало необходимость применения дорогой водостойкой взрывчатки при ведении буровзрывных работ. В сложившейся ситуации потребовалось оперативное решение комплекса задач по развитию системы осушения. Сооружение нового дренажного штрека на отм. – 90 м требовало больших капитальных и эксплуатационных затрат (по проекту института "Казгипроцветмет" строительство штрека оценивалось в сумму от 32 до 50 млн.$ USA) и длительных сроков ввода его в эксплуатацию, поэтому Техсоветом разреза "Восточный" было принято решение о поисках другого, более экономичного и эффективного способа осушения поля разреза.

Анализ гидрогеологической и технологической обстановки показал, что в конкретных гидрогеологических и горнотехнических условиях может быть применён поверхностный способ осушения с использованием в качестве основных дренажных устройств протяжённых (до 300 м) горизонтальных дренажных скважин. Технология и технические средства для бурения и оборудования таких скважин были разработаны в ВИОГЕМЕ и успешно применены на горнорудных предприятиях КМА (Россия) и других объектах.

Структурно система осушения включала специальные котлованы, которые проходятся на свободном пространстве очистного блока, позади конвейера, с максимальным приближением к постоянному борту (рис.3.2).

Глубина котлованов около 15 м. Проходка котлованов осуществляется экскаватором-драглайном типа ЭКГ 3,2-30А. Глубина котлованов 15-20 м. Из каждого котлована станком УДБ-8-01 (рис.3.3.) бурится до 10 скважин глубиной 300 м в направлении как рабочего, так и постоянного бортов. Скважины закладываются на отметках, позволяющих снижать уровень воды водоносного горизонта примерно до 100 м. В котлованах оборудуются насосные станции, с помощью которых вода, поступающая из скважин, сбрасывается в систему водоотведения и очистки. В одном очистном блоке оборудуется три дренажных узла, всего по разрезу – 12 узлов. Такая система способна осушить добычной горизонт разреза на площади более 1 км^2.

Гидрогеологическое обоснование системы осушения и отдельных дренажных устройств, прогнозные водопритоки и изменение гидродинамической обстановки на разрезе и прилегающей территории в процессе осушения выполнялось с помощью моделирования на суперкомпьютере, объединённом с вычислительным кластером, на основе программы GMS (рис.3.4). В процессе строительства и эксплуатации защитных устройств в течение более 10 лет подтвердились результаты

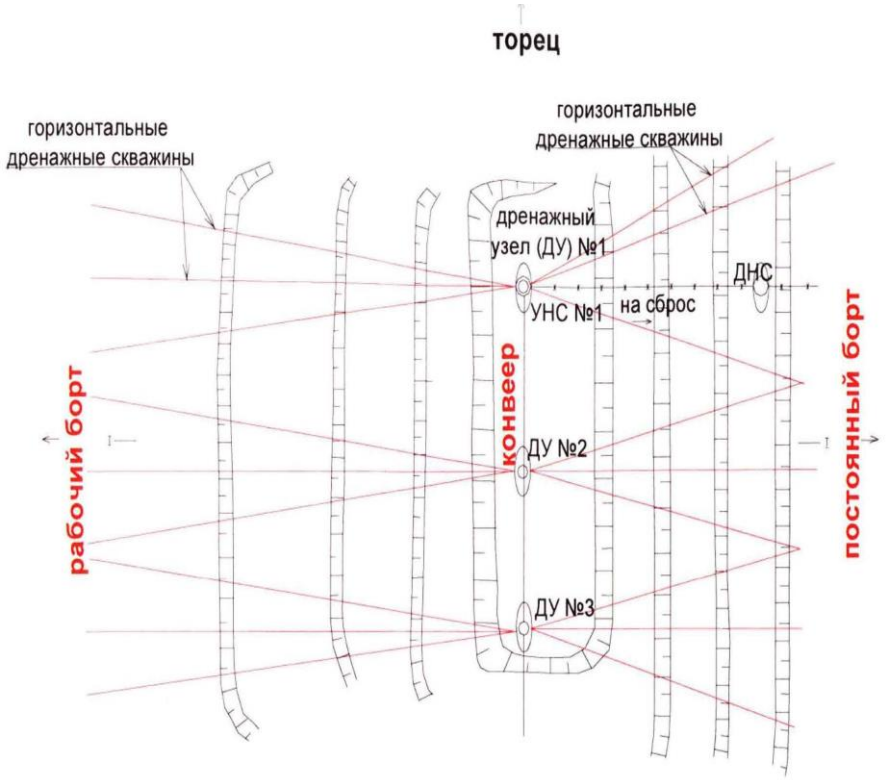
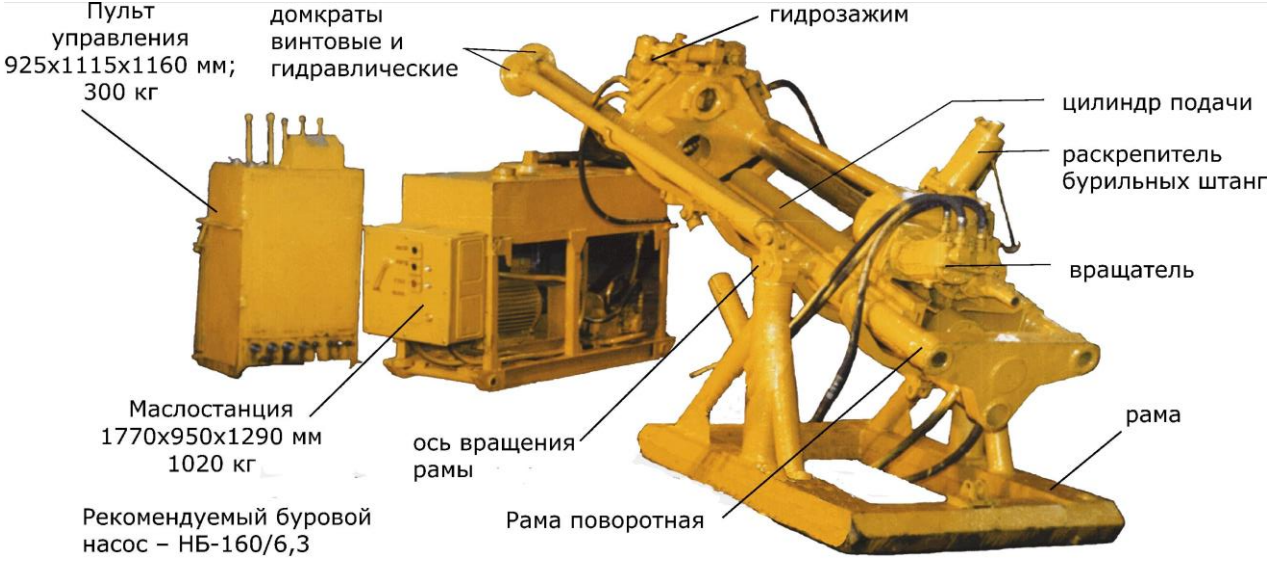


Рис. 3.2. Принципиальная схема расположения дренажных устройств при поверхностном способе осушения угольного разреза

гидрогеологических расчётов.

Технико-экономические показатели системы разработанного поверхностного и проектного подземного способов осушения разреза «Восточный» приведены в табл.3.4. Из таблицы видно, что поверхностный способ осушения является более экономичным, менее энергоёмким, и в меньшей степени воздействует на окружающую среду.

Энергосберегающая технология осушения разреза «Восточный» позволила в течение года осушить карьерное поле на площади 1-1,5 км^2, сэкономить до 20 % электроэнергии на откачку воды, сократить в 3-5 раза капитальные и эксплуатационные затраты.



Глубина бурения – 150-500 м; диаметр бурения – 59-150 мм; угол наклона – 0-180°; мощность от 30 до 50кВт

Буровой насос НБ4-160/6,3

Рис. 3.3. Буровая установка УДБ-8-01

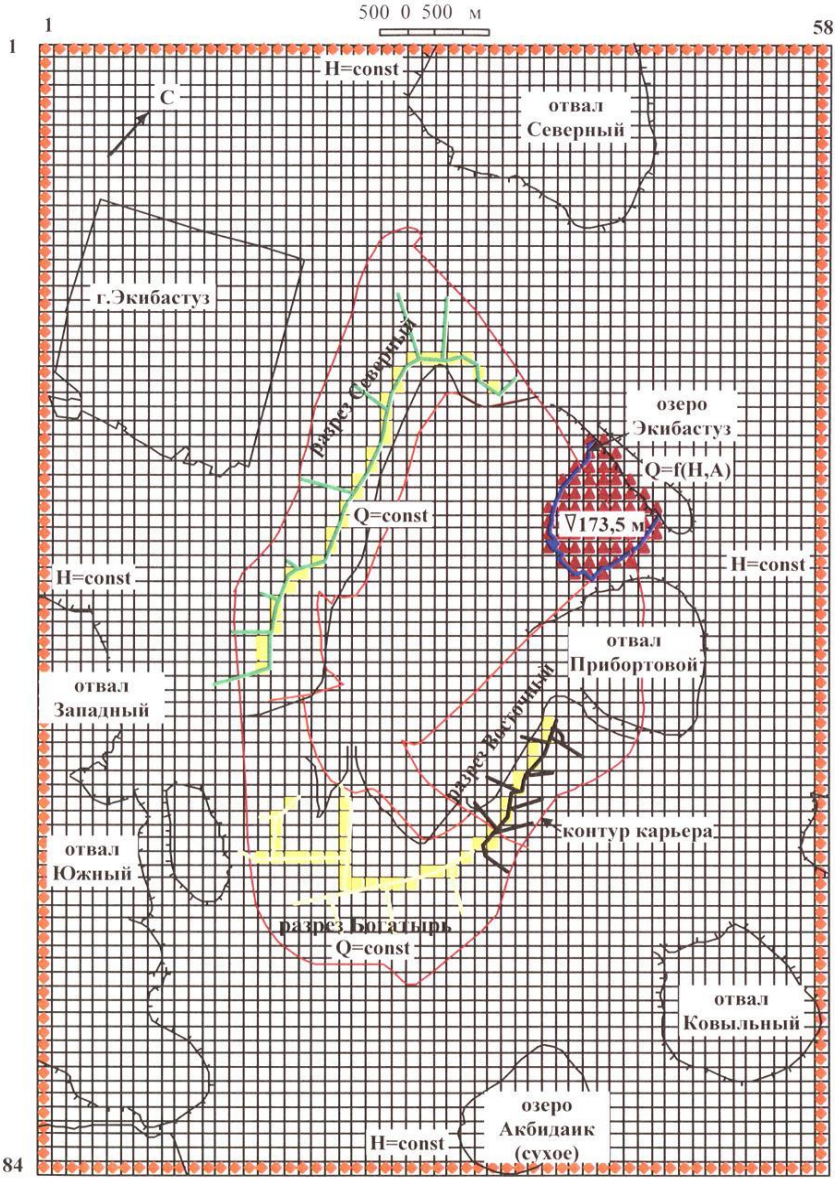


Рис. 3.4. Схема региональной геофильтрационной модели

Таблица 3.4 - Сравнительные технико-экономические показатели разработанного поверхностного и традиционного (подземного) способов осушения разреза

№№ пп	Наименование показателей	Подземный способ осушения	Поверхностный способ осушения
1	2	3	4
1	Стоимость строительства дренажной системы, млн. долларов США	32,0	5,4
2	Время сооружения дренажной системы, лет	3,0	1,0
3	Количество осушаемых добычных горизонтов, гор.	6	6
4	Время отработки добычных горизонтов (время осушения), лет	18	18
5	Количество откачиваемой воды за весь период осушения, млн.$м^3$	25,2	17,7
6	Средний дебит откачки, $м^3/ч$	160,0	112,2
7	Высота подачи воды, м	300	225
8	Расход эл.энергии на откачку воды, млн. квт.-ч	35,0	24,3

Подобная система осушения запроектирована, сооружена и успешно эксплуатируется на Бородинском угольном разрезе (Россия, Красноярский край) [24], а также для осушения нескольких карьеров строительных материалов, которые находятся в сложных гидрогеологических условиях. Применение систем осушения карьеров по технологии горизонтальных дренажных скважин имеет широкую перспективу практически на всех типах обводнённых месторождений без ограничения крепости водовмещающих пород по буримости, степени связности, обводнённости борта карьера, величины напоров подземных вод (табл. 3.5).

Таблица 3.5 - Основные показатели систем осушения с использованием горизонтальных дренажных скважин

Наименование объекта	Показатели						Примечание
	Обводненные породы	Категория пород по буримости	Глубина горизонтальных скважин м	Диаметр и конструкция скважины, мм	Дебит одной скважины, $м^3/ч$	Эффект осушения, %	
1	2	3	4	5	6	7	8
Лебединский карьер (КМА), Россия	Пески мелко- и средне-зернистые	II- IV	50	110, Фильтр с пластиковым покрытием	30,5	80	Сооружено более 20 узлов горизонтальных дренажных скважин при постоянной работе подземного дренажного комплекса
Угольный разрез «Восточный», Казахстан	Пересла-ивание углей и аргеллитов	V-VI	300	112, без фильтра	1,0	95 (по факту)	В 2001г. подземный дренажный комплекс полностью заменён системой горизонтальных дренажных скважин. Время сооружения новой системы 1 год, стоимость 1 млн. $USA

Продолжение таблицы 3.5.

1	2	3	4	5	6	7	8
Карьер «Восточный», Красноярский край, Россия	Трещинова-тые слюдисто-кварцевые углеро-дистые сланцы.	IX - X	95-250	112 без фильтра	1,3- 10	90 (по данным расчё-тов)	Система горизонтальных скважин.
Ковдорский карьер, Мурманская обл., Россия	Трещинова-тый массив скальных пород (финиты, сланцы и др.)	IX - X	60,160	112 без фильтра	100, 200	80 по факти-ческим резуль-татам	Бурился 1 куст горизонтальных скважин в дренажную щель, 2 – для осушения РДКК
Бородинский угольный разрез, Красноярский край, Россия	Бурые угли, суглинки.	IV-V	150-300	112 без фильтра	5-15	85 (по данным расчё-тов)	Система горизонтальных дренажных скважин эксплуатируется

Для целенаправленного и эффективного использования горизонтальных скважин на объектах КМА предварительно выполнялось геофильтрационное моделирование. Используя принцип телескопичности, из региональной модели последовательно выделяют, постоянно модернизируя, крупномасштабные локальные модели отдельных объектов (карьеров) вплоть до конкретных участков бортов или уступов карьера (рис.3.5).

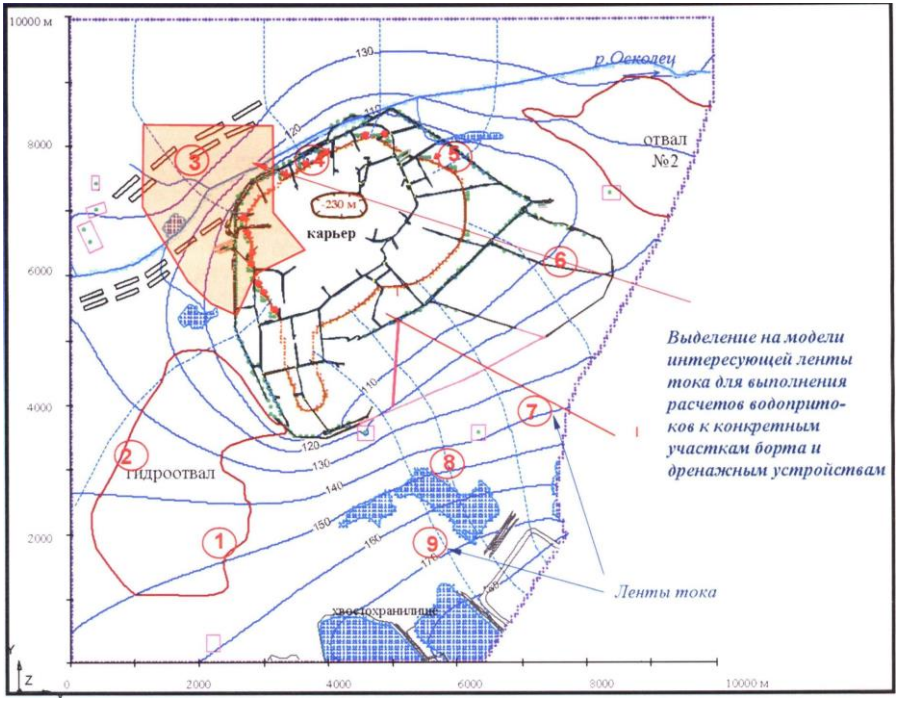


Рис.3.5. Выделение характерных лент тока к участкам бортов карьера

По выделенной ленте тока подземных вод рассчитывается на модели величина прогнозного водопритока к участку борта карьера. Прогнозный водоприток на единицу длины борта карьера $q_п$ сравнивается с допустимым $q_{доп}$. Допустимый водоприток рассчитывают, исходя из ограничения влияния фильтрационных деформаций на устойчивость борта или уступа карьера и обеспечения высокопроизводительной работы горного оборудования. При $q_п > q_{доп}$ на модели выполняют имитационное моделирование различных вариантов систем осушения (рис.3.6).

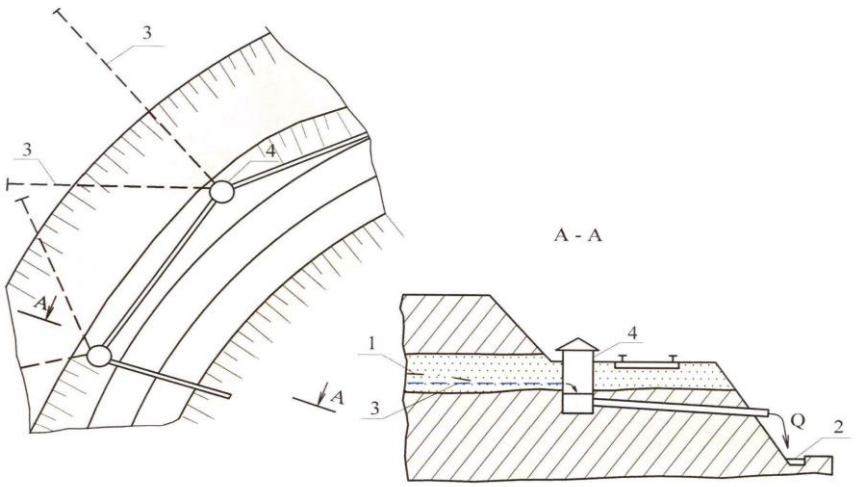


Рис. 3.6. Вариант осушения участка борта карьера лучевыми скважинами: 1 - депрессионная кривая; 2 - водосборник; 3 - лучевые скважины; 4 - колодец

Критерием технической эффективности той или иной схемы системы осушения является показатель

$$\frac{q_n - q_c}{q_n - q_{доп}} \geq 1, \qquad (3.11)$$

где q_c – водоприток на 1 м длины борта карьера при работе системы осушения.

Горизонтальные скважины перехватывают воду в глубине массива до её выхода на откос (см.рис.3.6).

Существенным достоинством горизонтальных скважин является сохранение естественного качества подземных вод и исключение дополнительного загрязнения её в карьере.

В технологическом отношении различают технологию осушения нерабочих (постоянных) бортов карьера и рабочих. На постоянных бортах технология осушения рассчитывается на период постановки и формирования уступа и затем дальнейшего его поддержания в заданных геомеханических и геометрических параметрах. На рабочем борту технология осушения учитывает постоянное продвижение фронта горных работ. По мере перемещения фронта горных работ изменяется водоприток в карьер, положение депрессионной воронки на откосах уступов борта и

подрабатываются со временем дренажные устройства внешнего и внутреннего контуров системы осушения. Технология защиты рабочего борта предусматривает перемещение дренажных контуров как внутри карьера, так и за его пределами. В большинстве случаев наиболее подходящим конструктивным элементом системы осушения на внутреннем контуре рабочего борта железорудных карьеров является открытая прибортовая дрена.

На постоянных бортах целесообразно использование лучевых горизонтальных скважин [25]. Анализ применения горизонтальных скважин в системах осушения карьеров, расположенных в самых различных природных условиях, позволяет отметить следующие преимущества:

- низкая, не менее, чем на порядок, стоимость как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам, при одинаковой или более высокой степени эффекта осушения, что имеет решающее значение для рыночной экономики;

- короткие сроки строительства (система для заданного снижения уровня воды на площади от 1 до 3 км^2 может быть сооружена в течение одного года);

- уменьшенная на 30-50 % нагрузка на окружающую среду, так как уровни воды снижаются только в вертикальных границах, обусловленных ведением горных работ;

- существенное энергосбережение на откачку воды за счёт уменьшения дебита откачки и высоты подачи;

- мобильность.

Технические решения по использованию в системах осушения горизонтальных скважин для различных природных и горнотехнических условий расширяют перспективы их применения [26-29].

3.4.2. Технология осушения глубоких карьеров

Строительство глубоких карьеров требует от специалистов различного профиля использовать самые современные разработки и достижения в горном деле, ориентируясь при этом на всесторонний анализ природной и техногенной обстановки, сложившейся в ходе отработки месторождения [30-43].

С этих позиций весьма ценным является опыт разработки Ковдорского месторождения комплексных апатит-магнетитовых руд, на котором ведётся добыча открытым способом с 1962 г. карьером «Железный». Магнетитовые руды планируется отрабатывать до проектной отметки - 635 м, что соответствует глубине порядка 800 м. Проектная глубина отработки карьера «Железный» превышает «привычные» для отечественной практики

глубины ведения открытых горных работ на железорудных месторождениях. Уступы бортов карьера формируются в субвертикальном положении, что требует нетрадиционного подхода и новых технических решений для сохранения устойчивости прибортового горного массива.

Гидрогеологические условия ведения горных работ на карьере «Железный» таковы, что в него направлены потоки как подземных вод, так и атмосферных осадков с окружающей водосборной площади размерами около 90 км^2.

Влияние подземных вод на устойчивость прибортового массива карьера выражается в механическом воздействии, гидростатическом взвешивании и гидродинамическом давлении.

Механическое воздействие подземных вод, выходящих на уступы, сложенные скальными и полускальными породами, выражается в процессах их физического выветривания. Эти процессы особенно характерны для нерабочих бортов карьера. Они связаны с деятельностью вод, стекающих по поверхности уступов, при отсутствии организованного их перехвата и отвода. Это приводит в основном к образованию осыпей, потере устойчивости отдельных глыб пород и последующим вывалам.

Для карьера рудника «Железный» характерны процессы многократного периодического замораживания и оттаивания воды, содержащейся в трещинах приоткосного массива. Особенно это касается ослабленных трещиноватых зон, с взаимосвязанной и невзаимосвязанной системами трещин. Попеременное замораживание и оттаивание воды в этих зонах приводит к расширению трещин и снижению прочности пород непосредственно в приконтактной зоне откосов, что влечёт на начальном этапе образование осыпей и вывалов. Образующаяся талая вода обладает повышенной растворяющей способностью, что активизирует процессы химической денудации пород.

При постановке уступов карьера в положение, близкое к вертикальному, необходимо учитывать отрицательное воздействие наледей на устойчивость откосов. Интенсивное их образование наблюдается на северо-восточном, восточном и западном бортах, где прослеживаются наиболее значительные по расходам выходы подземных вод на поверхность и их свободное перетекание по уступам и откосам. Обледенение откосов по расчётам приводит к дополнительной нагрузке до 10 тонн на 1 погонный метр бровки уступа, а при сдвоенных уступах - до 20 тонн. На пологом откосе основная часть давления от наледи распространяется на плоскость откоса, создавая эффект дополнительной пригрузки, и повышает его устойчивость. На крутом и субвертикальном откосе наледь в своей средней и нижней частях может вообще не прилегать к плоскости откоса, а в верхней части большая часть давления от наледи действует на сдвиг и по бровке

уступа на отрыв. Влияние дополнительной нагрузки, связанной с переходом подземной воды в твёрдое состояние, значительно трансформируется при укручении углов откосов и увеличении высоты уступа.

Гидродинамическое давление, возникающее в результате сопротивления породы движению потока подземных вод, направлено вдоль линий тока и является объёмной силой, удельная величина которой (на единицу объёма) при свободном выходе потока на откос определяется по формуле:

$$P = J \gamma_0 = V / k \gamma_0 \qquad (3.12)$$

где: J – градиент напора доли ед.

γ_0 – объёмный вес воды, $Т_с/м^3$;

V – скорость фильтрационного потока, м/сут;

k – коэффициент фильтрации пород, м/сут.

Согласно фактическим данным, по структуре потока подземных вод в пределах карьерного поля рудника «Железный» наиболее существенные значения гидродинамического давления были получены на юго-восточном - южном бортах карьера, до 125-140 $кгс/м^3$. При движении подземных вод в трещиноватых породах прибортового массива возможна ситуация, когда вблизи откоса имеется зона слабопроницаемых или непроницаемых пород, тогда на этом участке уклон потока, а, следовательно, и гидродинамическое давление возрастает в несколько раз, а при отсутствии разгрузки в приконтурной зоне крутых откосов - на один – два порядка, что существенно повлияет на устойчивость уступа.

Гидростатическое взвешивание испытывают горные породы прибортового массива, залегающие ниже уровня подземных вод. Влияние сил взвешивания приводит к уменьшению угла внутреннего трения в рыхлых водовмещающих породах, а в скальных трещиноватых породах - к снижению сил трения вдоль потенциальной поверхности скольжения, тяготеющей к трещинам с углом падения внутрь карьера (трещины отрыва).

Влияние воды особенно сильно сказывается на устойчивости прибортового массива в периоды обильного выпадения дождей, ливней и снеготаяния, когда возрастает вертикальная составляющая скорости фильтрации воды и соответственно градиенты потока, а, следовательно, и гидродинамическое давление, происходит вымывание глинистого заполнителя из трещин и механическое разрушение пород.

Негативное влияние на устойчивость уступов оказывают и буровзрывные работы, результатом которых является образование дополнительных локальных зон повышенной трещиноватости и сейсмическое воздействие на массив. Зоны локальной трещиноватости

быстро заполняются водой, часть которой обводняет буровзрывные скважины, а часть разгружается на откос уступа.

Сохранение устойчивости уступов бортов карьера рудника «Железный» в этих условиях требует разработки технологии управления потоками подземных вод в прибортовом массиве, оптимизации системы управления этими потоками и выбора эффективного варианта защитных мероприятий.

Инструментом, позволяющим решить поставленные задачи, является разработанная совместно с Мурманской ГРЭ компьютерная математическая модель Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд и прилегающей территории. На модели рассмотрены более 50 вариантов комбинаций различных технических решений по управлению потоками подземных вод на отдельных участках бортов карьера и минимизации их влияния на устойчивость субвертикальных уступов. Математическая модель района рудника «Железный» выполнена на базе лицензионного программного комплекса GMS – Groundwater Modeling System (см. раздел 11).

Площадь компьютерной модели определена, исходя из размеров зоны водосбора вокруг действующего карьера, наличия техногенных источников и природных гидродинамических контуров, углубления карьера рудника «Железный» и его расширения за счёт вовлечения в отработку апатит-штаффелитового месторождения. Общая площадь модели составляет 127 км^2. Гидрогеологические условия Ковдорского железорудного месторождения характеризуются наличием гидравлически взаимосвязанного безнапорного водоносного комплекса в четвертичных отложениях, палеоген-неогеновой коре выветривания, в трещиноватой зоне коренных кристаллических пород и зоне глубинных тектонических разломов. Водоносный комплекс имеет общий уровень и идентичный химический состав подземных вод одинаковые условия питания и разгрузки. В целом гидрогеологические условия месторождения характеризуются как сложные, что связано с неравномерным чередованием сильно и слабообводнённых зон, интенсивным питанием подземных вод поверхностными водотоками, развитием на части площади вокруг карьера мощных подрусловых отложений обводнённостью пород и рудной толщи по всему разрезу.

Исходя из гидрогеологических условий и технологии отработки карьера рудника «Железный», расчётная схема модели представлена семью слоями. При создании модели были сформированы массивы моделирования: коэффициентов фильтрации, инфильтрационного питания, испарения абсолютных отметок кровли и подошвы водоносных слоёв, абсолютных отметок уровня подземных и поверхностных вод, абсолютных отметок поверхности земли, данных по водному балансу, а также параметров и

показателей техногенных объектов и систем. В ходе создания модели были проведены все этапы калибровки, при которой уточнялись фильтрационные и ёмкостные свойства водоносных горизонтов, их взаимосвязь, водопроводящие свойства тектонических нарушений, параметры техногенных и природных водоёмов и водотоков, показатели разгрузки потоков воды в карьер, балансовые составляющие подземных и поверхностных водотоков.

В результате разработана региональная геофильтрационная модель карьера рудника «Железный», которая адекватно отражает фактическую ситуацию. На созданной модели определены все основные зоны поступления и разгрузки воды на уступах бортов карьера. Оценена эффективность работы рядов водопонижающих скважин (ВП) внешнего дренажного контура, составляющая порядка 45 % (табл. 3.6).

Таблица 3.6 - Эффективность системы осушения карьера рудника «Железный»

Наименование	Расходы, $м^3$/час	
	Фактические (на 07 2009г)	Модельные
Внешний дренажный контур		
Северный ряд ВП скважин (116 м)	280	280
Западный ВП скважин (114 м, 122 м)	300	300
Восточный ряд ВП скважин (60 м, 96 м, 98 м, 100 м, 101 м, 97 м, 7 0м) +ПД+178 м	615	615
Всего	1195	1195
Карьерный водоотлив		
Осадки	385	385
Проскок на борта карьера	1455	1465
Всего	1840	1850
Эффективность системы осушения, %	45	44,9

Моделирование показало, что выходы подземных вод в верхних уступах западной части карьера связаны с подрусловым потоком реки Верхняя Ковдора и ручья Безымянный. Основные выходы воды, порядка 135 $м^3$/час, формируются в интервале гор. +190 - +204 м. Они локализуются на небольшом участке протяжённостью около ста метров в подошве палеоген-неогенового водоносного горизонта и в верхней части зоны дезинтеграции и интенсивной трещиноватости кристаллических пород. Часть

подземного потока, порядка 300 м^3/час, перехватывается западным рядом водопонижающих скважин, расположенных в 750 м от карьера. По данным моделирования, структура перехватываемого подземного потока включает фильтрацию со стороны ручья Безымянный, реки Верхняя Ковдора и обводного канала.

Северный ряд водопонижающих скважин расположен в долине ручья Железорудный, в непосредственной близости от неэкранированного участка обводного канала и водоёма, образованного на пересечении ручья и канала. Производительность водопонижающих скважин составляет порядка 280 - 300 м^3/час. На модели получено, что водопонижающие скважины частично перехватывают подрусловый поток ручья Железорудный, фильтрационные потери из водоёма и неэкранированного участка обводного канала. Остальная, не перехваченная часть подземного потока разгружается по старому руслу ручья Железорудный и по коре выветривания на верхних уступах карьера. Сосредоточенные выходы воды в количестве около 155 м^3/час наблюдаются на участке подработки карьером русла ручья Железорудный на горизонтах +154 - +166 м.

Восточный ряд водопонижающих скважин расположен между карьером и отстойником, образованном на части озера Ковдоро. Производительность скважин и прибортового дренажа гор. +178 м порядка 560-615 м^3/час. Структура потока на восточном борту такова, что более 85 % поступает со стороны озера, остальные 15 % – со стороны города Ковдор, обводного канала и промплощадки. Водопонижающие скважины перехватывают только часть фильтрационного потока, поэтому прибортовой массив между бровкой карьера и контуром скважин практически полностью обводнен за счёт подземного потока со стороны озера Ковдоро. На узком участке между скважинами и бортом карьера с абс. отм. +70 м суммарные выходы воды составляют около 285 м^3/час.

Значительные сосредоточенные выходы подземных вод на верхних уступах приурочены к трём участкам пересечения бывших водотоков - рек Нижняя, Верхняя Ковдора и ручья Железорудный с бортами карьера.

Для детализации структуры подземного потока на подходе к карьеру и разработки технических решений по управлению потоком и защите карьера от подземных вод построены в составе региональной модели локальные (крупномасштабные) модели западного, северного и восточного прибортовых массивов карьера (см.рис.11.16).

Анализ выявленных закономерностей формирования структуры гидродинамического потока подземных вод, полученных на моделях восточного борта карьера с учётом реализованных технических решений по его защите, показывают, что в прибортовом массиве на гор.118 - +178 м сложились стабильно высокие уровни подземных вод, выходящие в виде

источников на борта карьера. Высокое положение уровня подземных вод на гор.+142 м приводит к периодическому подтоплению заглубленной части рудо-дробильного комплекса (РДКК).

Формирование подземного потока, выходящего на борта карьера, происходит в том числе за счёт фильтрации воды из отстойника. Потери на фильтрацию образуются на всей площади отстойника. Максимальные - с ближнего участка в районе скважины 4^3, на котором отрыв уровня подземных вод от уровня воды в отстойнике составляет 7,0-7,5 м. Часть потерь фильтруется через дамбу, обводняя техногенные отложения на осушенной площади озера и поддерживая высокий уровень подземных вод между карьером и отстойником (рис.3.7).

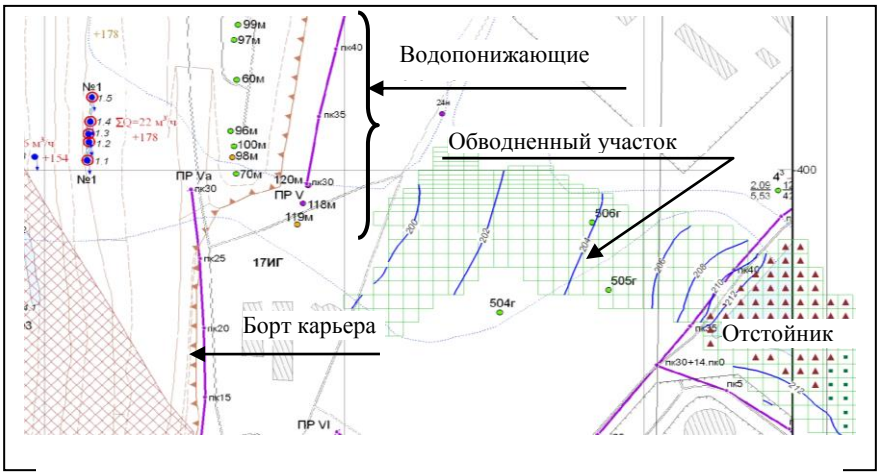


Рис.3.7. Обводненные техногенные отложения между отстойником и бортом карьера

Согласно расчётам, фильтрационные потери через дамбу и дно отстойника составляют порядка 330 $м^3$/час. Потери частично перехватываются водопонижающими скважинами восточного ряда, частично дренируются бортом карьера.

За последние годы производительность водопонижающих скважин восточного ряда уменьшилась более чем в 2 раза по отношению к максимальным значениям в 1983-2000 гг. Суммарный водоотбор скважинами в 2011 году составил порядка 425 $м^3$/час. Уменьшение водоотбора скважинами привело к перераспределению потока подземных вод в прибортовом массиве и увеличению доли притока, перехватываемого прибортовым дренажом (ПД+178 м), до 140 $м^3$/час и росту объёмов воды,

проскакивающей на уступы борта, расположенные ниже прибортового дренажа.

Результаты экспериментирования на модели показали, что увеличение производительности водопонижающих скважин не приводит к существенному понижению уровня подземных вод между скважинами, и условия формирования проскоков подземных вод в карьер сохраняются.

Результаты моделирования подтверждают, что существующая система осушения при помощи вертикальных водопонижающих скважин в значительной степени исчерпала свои возможности в условиях строительства глубокого карьера, и оптимизация гидрогеологических условий восточного борта карьера должна быть увязана с новыми техническими решениями.

Один из рассмотренных вариантов оптимизации защиты от водопритоков включает модернизацию существующего ряда водопонижающих скважин, бурение 2-х дополнительных скважин и прекращение сброса дренажных вод в отстойник. Одна дополнительная скважина закладывается севернее существующего контура водопонижения, тем самым увеличивая длину дренажного контура, другая - между контуром водопонижения и отстойником карьерных вод.

Как показали расчёты, переоснащение работающих и введение в строй новых водопонижающих скважин в совокупности с прекращением сброса дренажных вод в отстойник приводит к снижению уровня подземных вод: гор. +178 м - на 3,0-3,5 м; гор. +164 м - 2,50-3,2 м; гор. +142 м - 2,2–2,9 м. На площади расположения РДКК уровень подземных вод понижается на 1,9 – 2,4 м.

В результате проводимых мероприятий практически полностью прекращаются выходы подземных вод по восточному борту карьера за линией ВПС на горизонтах +178 м и выше. Однако сохраняются значительные, до 75 %, выходы подземных вод на горизонте +142 м. В целом на отрезке восточного борта карьера длиной 500 м в интервале гор. +118 – +190 м выходы подземных вод уменьшаются на 38 %.

Разработанный вариант оптимизации существенно снижает обводненность прибортового массива, уменьшает водопритоки на верхних откосах восточного борта карьера, что соответственно ведёт к повышению устойчивости уступов.

Из рассмотренных вариантов оптимизации гидрогеологических условий восточного борта карьера представляет интерес комбинация на внешнем контуре противофильтрационной завесы (ПФЗ) длиной 430 м и глубиной 20-30 м с модернизацией существующего ряда водопонижающих скважин и прекращением сброса дренажных вод в отстойник.

ПФЗ, сооружённая в непосредственной близости от карьера, полностью перекрывает пути фильтрации потоку подземных вод со стороны

озера Ковдоро, проходящего через четвертичные отложения – верхнюю дезинтегрированную толщу кристаллических пород. За линией заложения ПФЗ со стороны карьера происходит снижение уровня подземных вод в архей-палеозойском комплексе кристаллических пород до 22 метров и практически полное осушение четвертичных пород (см. рис.11.19).

На борту карьера снижение уровня составляет: гор. +178 - +190 м - на 11-22 м; гор. +166 м - +154 м - 10-21,5 м; гор.+142 м - 9-20,5 м; гор.+70м – 9-18 м. На площади расположения РДКК уровень подземных вод понижается на 11-15 м.

Снижение уровня подземных вод в прибортовом массиве происходит быстрыми темпами в течение первых месяцев. В результате перекрытия завесой путей фильтрации потока подземных вод полностью прекращаются выходы подземных вод на гор.+142-+178 м, фиксируемые в ходе обследования восточного борта карьера в настоящее время (табл.3.7).

Таблица 3.7 - Выходы подземной воды на восточном борту карьера

Горизонт, абс. отм. м	Точки наблюдения	Тип источника	Фактический дебит, $м^3$/час	Прогнозный дебит, $м^3$/час
+178	1.1-1.5	Родник нисходящий	45	0
+154	4.3	Родник нисходящий	3,6	0
+142	7.9, 7.10	Сток воды со склона	236	0
Общий дебит			285	0

По данному варианту сооружение ПФЗ, модернизация ряда водопонижающих скважин, прекращение сброса дренажных вод в отстойник значительно меняет структуру подземного потока на восточном борту карьера, что уменьшает водопритоки на уступы и резко снижает отрицательное влияние подземных вод на устойчивость откосов и создаёт предпосылки для укручения бортов.

Рассмотренные варианты основаны на использовании систем по управлению потоками подземных вод при размещении защитных устройств за пределами контура карьера. Одним из основных достоинств этих вариантов является практически полное отсутствие необходимости увязывания систем управления с технологией ведения горнодобычных работ.

Альтернативные конкурирующие варианты предполагают размещение элементов систем управления потоками подземных вод внутри карьера. В данном случае увязка с технологией ведения горных работ является приоритетной и должна учитываться как на стадии постановки задачи, так и при оптимизации системы управления.

В качестве альтернативного рассмотрен вариант развития

внутрикарьерных дренажных устройств на восточном борту карьера, связанный с сооружением горизонтальных дренажных скважин (ГДС). Горизонтальные дренажные скважины забуриваются с нижележащих уступов через монолитные породы в обводнённую зону природной или искусственной трещиноватости. При этом скважины перехватывают подземные воды внутри прибортового массива, предотвращая их неорганизованный выход на борт карьера, и снимают напор в прибортовом массиве, если зона трещиноватости не вскрыта бортом карьера.

Бортами карьера «Железный» вскрываются зоны природной трещиноватости (разломы и разрывные нарушения), часть которых связана с выходами подземных вод. На северо-восточном – восточном бортах карьера создана линейная искусственная зона трещиноватости – прибортовая дренажная щель длиной около 900 м. Расположена она вдоль постоянного борта карьера с гор. +154 до гор.+142 м. Представляет собой зону дробления в скальных породах глубиной от 14 до 22 м и шириной 3-5 м.

Для разгрузки дренажной щели и снятия напоров в прибортовом массиве с гор. +96 м и +118 м в неё пробурен веер горизонтальных дренажных скважины длиной от 50 до 140 м. Первые скважины ОАО ВИОГЕМ были пробурены в 2003 году, и расход ГДС составил от нескольких $м^3$ до 200 $м^3$/час. За короткое время после завершения буровых работ прекратились выходы воды на борта карьера по обе стороны от пробуренных высокодебитных скважин, и произошло осушение рудного склада карьера. По результатам обследования карьера в настоящее время дебит ГДС составляет более 135 $м^3$/ч. Отвод воды от скважин осуществляется организованно на нижележащие уступы и далее – в центральный водосборник.

Анализ работы ГДС и характер формирования водопроявлений в районе дренажной щели указывает на частичный её кольматаж и неравномерность искусственной трещиноватости скальных пород, что следует учитывать при сооружении скважин. Дренажная щель по месту расположения и большей части своих фильтрационных характеристик остаётся наиболее перспективной и предсказуемой для перехвата и аккумуляции подземного потока на верхних уступах карьера. Горизонтальные скважины, пробуренные на дренажную щель в силу простоты сооружения-эксплуатации и эффективности работы, могут рассматриваться как элемент внутрикарьерной оптимизации системы управления потоком подземных вод на восточном борту карьера.

Методом математического моделирования рассмотрены варианты внутрикарьерной оптимизации гидрогеологических условий, связанные с заложением новых ГДС №2 и №3. Обе скважины (№2 и №3) на протяжении длительного времени стабильно обеспечены расходом от 22 $м^3$/час (скв. .№2)

до 47 $м^3$/час (скв.№3). Радиус влияния скважины №2 составляет 40-50 м. На гор. +154 м, то есть на 60 м выше заложения горизонтальной скважины №3, фиксируется ручей с расходом порядка 170 $м^3$/час, который стекает по уклону и участвует в обводнении восточного борта карьера. Наличие водопроявления на участках, расположенных на небольшом расстоянии от эффективно работающих ГДС, указывает на возможность наращивания системы горизонтальных дренажных скважин. Сооружение дополнительных горизонтальных скважин позволит снизить уровень подземных вод на борту карьера и использовать уже имеющиеся организованные выпуски дренажных вод из скважин №2 и №3 в центральный водосборник.

Один из вариантов, рассмотренных на модели, предполагал сооружение куста ГДС на гор.+96 м. Расстояние между скважинами по линии дренажной щели 45 м. Второй куст ГДС закладывается с гор. +118 м. Расстояние между скважинами по линии дренажной щели составляет 45 и 55 м (рис. 3.8).

Как показали расчёты, куст ГДС, сооружённый с гор. +96 м, при квазистационарном режиме фильтрации имеет суммарный дебит около 135 $м^3$/час. При этом расход существующей скважины № 3 уменьшается на 15 % и составляет около 40 $м^3$/час. Это позволит снизить уровень воды в дренажной щели по месту расположения скважин как минимум на 6-7 м и отодвинуть депрессионную воронку вглубь прибортового массива, что уменьшит неорганизованные выходы подземных вод на борт карьера (рис.3.9).

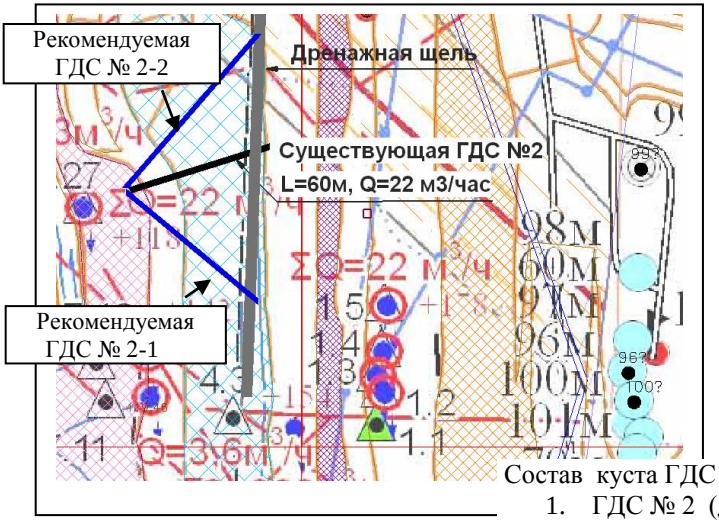
Куст ГДС, сооружённый с гор. +118 м, перехватывает порядка 75 $м^3$/час подземного потока в районе дренажной щели. При этом расход существующей скважины № 2 снижается не более чем на 10 % и составляет около 20 $м^3$/час. В целом реализация настоящих дренажных мероприятий позволяет организованно отвести дополнительно 140 $м^3$/час подземных вод, являющихся потенциальными источниками обводнения уступов карьера и негативно влияющих на его устойчивость.

Теоретически на всех участках пересечения ГДС с дренажной щелью максимальная величина снижения уровня подземных вод может достигать мощности обводнённой части щели. Однако отсутствие фактических данных по уровню воды в большей части дренажной щели, степени и участкам её кольматации позволяет опираться только на фиксируемые расходы существующих горизонтальных скважин, что в некоторой степени при выполнении расчётов занижает потенциальную эффективность дренажных мероприятий.

Важно понимать, что горизонтальные дренажные скважины для разгрузки прибортового массива можно использовать на любом этапе и глубине отработки месторождения, и в этом случае их необходимо

Состав куста ГДС на гор.+96 м:

1. ГДС № 3 (длина 140 м)
2. ГДС № 3-1 (длина 150 м)
3. ГДС № 3-2 (длина 165 м)



Состав куста ГДС на гор. +118 м:

1. ГДС № 2 (длина 60 м)
2. ГДС № 2-1 (длина 65 м)
3. ГДС № 2-2 (длина 80 м)

Рис.3.8. Расположение кустов горизонтальных дренажных скважин

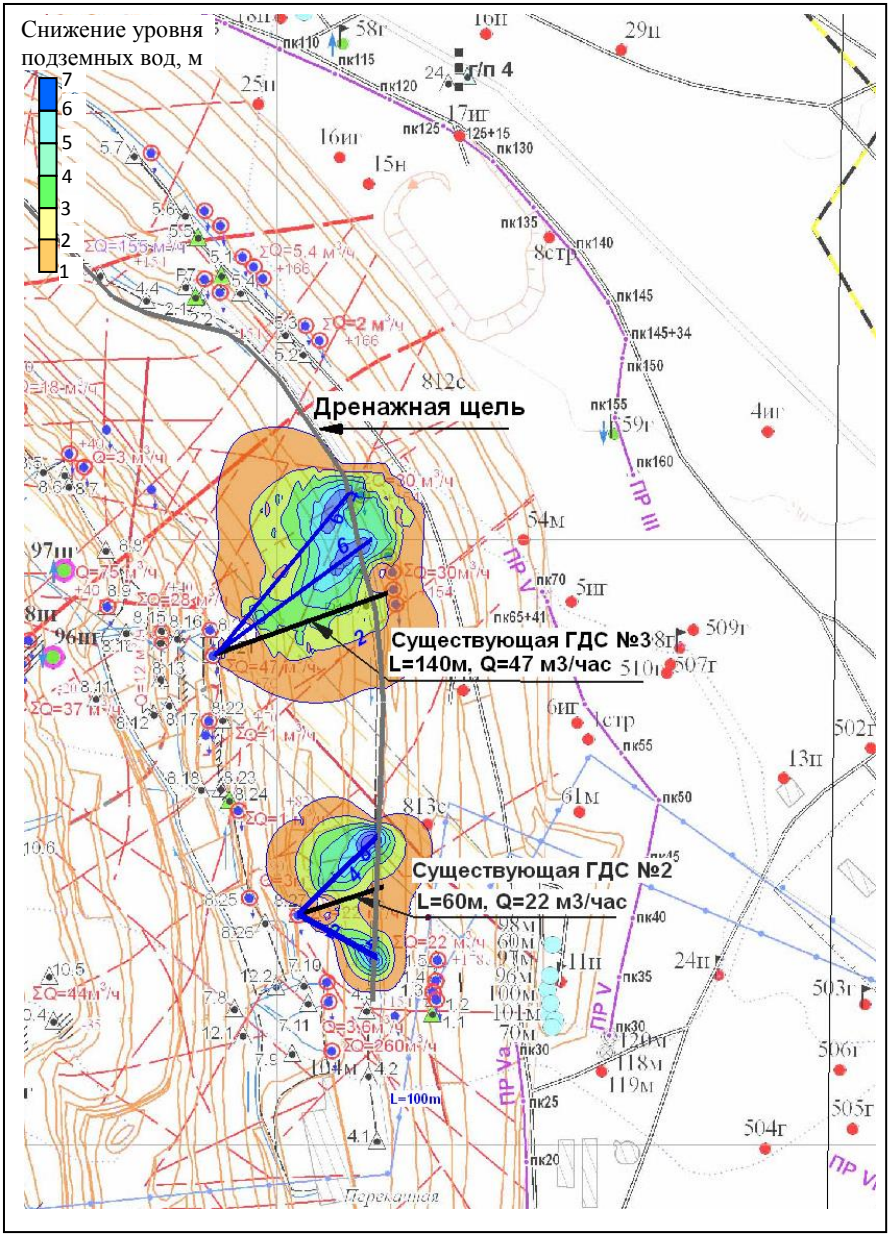


Рис.3.9. Управление потоками подземных вод при реализации внутрикарьерных мер защиты восточного борта карьера с помощью горизонтальных дренажных скважин

воспринимать как дренажный элемент оптимизации обводнённости конкретного участка борта карьера, время существования которого определяется технологическими особенностями ведения горных работ. В целом, для обеспечения устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров в сложных гидрогеологических условиях добиться оптимизации осушения возможно только при комбинированном использовании внутрикарьерных и прикарьерных дренажных устройств и минимизации влияния поверхностных водотоков и водоёмов на обводнение карьера.

3.4.3. Технология осушения глубоких горизонтов в карьерах

Основной объём гидрогеологической информации, полученной при проведении геологоразведочных работ на стадиях разведки и разработки большинства месторождений, эксплуатируемых открытым способом, относится в основном к рыхлым песчано-глинистым отложениям. Изучению фильтрационных свойств водоносных горизонтов скальных пород не уделялось достаточно внимания, при этом имеющиеся данные о фильтрационных параметрах в основном характеризуют верхнюю зону трещиноватых скальных пород или распространения тектонических нарушений. Более детальную характеристику фильтрационных свойств скальных трещиноватых пород можно получить при проведении пакерных испытаний в опытных скважинах. По полученным данным мощность площадной зоны повышенной трещиноватости скальных пород, например, для месторождений КМА в среднем составляла 20-50 м. По мере отработки рудных горизонтов скальных пород предполагалось, что в связи с уменьшением с глубиной трещиноватости обводнённость залежи будет снижаться. Опыт отработки глубоких горизонтов карьеров показал, что на трещиноватость и обводнённость скальных пород помимо природных факторов влияют технологические [44].

Обзорная оценка информации по обводнённости глубоких горизонтов карьеров указывала на то, что с увеличением глубины расположения отрабатываемого горизонта увеличивается и его обводнённость [44]. Подтверждение имеющимся разрозненным фактам было получено при рассмотрении изменения таких показателей, как средний столб воды по буровзрывным скважинам взрываемых блоков и средняя обводнённость скважин блоков, средневзвешенный столб воды по отдельному блоку и средневзвешенная обводнённость блока, средний столб воды по буровзрывным скважинам горизонта и средняя обводнённость по буровзрывным скважинам горизонта (3.13 - 3.18).

$$h_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + ... + h_n}{h}; \qquad (3.13)$$

$$h_{ср.в} = \frac{h_1 l_1 + h_2 l_2 + ... + h_n l_n}{l_1 + l_2 + ... + l_n}; \quad (3.14)$$

$$h_{ср.г.} = \frac{h_{1ср.} n_1 + h_{2ср} n_2 + ... + h_{iср} n_i}{n_1 + n_2 + ... n_i}; \quad (3.15)$$

$$W = \frac{h}{l}; \qquad W_{ср} = \frac{W_1 + W_2 + ... W_n}{n}; \quad (3.16)$$

$$W_{ср.в} = \frac{W_1 l_1 + W_2 l_2 + ... + W_n l_n}{l_1 + l_2 + ... + l_n}; \quad (3.17)$$

$$W_{ср.г} = \frac{W_{1ср} n_1 + W_{2ср} n_2 + ... + W_{iср} n_i}{n_1 + n_2 + ... + n_i}; \quad (3.18)$$

где $h_{ср}$ – средний столб воды по буровзрывным скважинам блока, м;

h_1, $h_{2,...}$ h_n – столб воды в первой, второй и *n*-ной скважине блока, м;

l_1, l_2,...l_n – длина первой, второй и *n*-ной скважины блока, м;

$h_{ср.в}$ – средневзвешенный столб воды по блоку, м;

$h_{ср.г}$ – средний столб воды по буровзрывным скважинам горизонта, м;

$h_{1ср}$, $h_{2ср,...}h_{iср}$ – средние столбы воды по буровзрывным скважинам первого, второго и i-того блока, м;

n_1, n_2,...n_i – количество скважин в первом, втором и i-том блоке, шт.;

W – обводнённость скважины блока, %;

$W_{ср}$ – средняя обводнённость по буровзрывным скважинам блока, %;

W_1, W_2,...W_n – обводнённость первой, второй и *n*-ной скважины блока, %;

$W_{ср.в}$ – средневзвешенная обводнённость по буровзрывным скважинам блока, %;

$W_{1ср}$,$W_{2ср,...}W_{iср}$ – средние обводнённости по буровзрывным скважинам первого, второго и i-того блока, %.

Показатель обводнённости W выражает по своей сущности ту часть длины скважины, которая в процентном выражении является обводнённой. При полностью обводнённой скважине он равен 100 %.

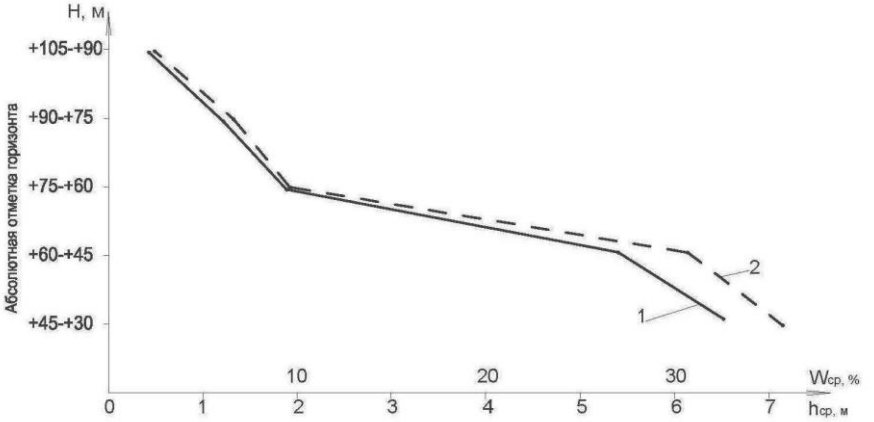
Собранные данные и выполненные расчёты с использованием (3.13-3.18) по Михайловскому карьеру показывают, что с увеличением глубины ведения буровзрывных работ на 60 м средние столбы воды в буровзрывных скважинах увеличиваются в 5-7 раз. Средневзвешенный столб воды на горизонте +90 - +75 м составлял около 1,0 м, при переходе на горизонт +45 - +30 м он увеличился до 5-7 м на западном, восточном и южном бортах карьера. В последующие годы эта тенденция сохраняется при мало

изменяющихся количественных значениях средневзвешенных столбов воды. Показатель средней обводнённости буровзрывных скважин в 1986 году также с углублением горных работ в целом увеличивался. На западном борту карьера обводнённость скважин возросла примерно на 6-7 % при переходе с горизонта +105 - +90 м на +90 - +75 и +75 - +60 м. Затем она немного уменьшалась на горизонте +60 - +45 м и резко росла на 25 % на горизонте +45 - +30 м. На самом нижнем горизонте в среднем более 30 % длины каждой буровзрывной скважины является обводнённой, соответственно средний столб воды составляет 5 м. На восточном и южном бортах карьера рост обводнённости несколько опережает аналогичные показатели по западному борту. И уже на горизонте +6 - +45 м до 40 % длины буровзрывных скважин является обводнённой, соответствующие средние столбы воды достигают 7,0 м. В последующие годы обводнённость буровзрывных скважин на восточном борту карьера была примерно в 3 раза выше, чем на западном.

Изменение средних столбов воды в буровзрывных скважинах и их средней обводнённости в целом по карьеру приведено на рис.3.10. Из графиков видно, что по всему карьеру происходит увеличение средних показателей обводнённости скважин. Средние столбы воды в буровзрывных скважинах на нижних горизонтах достигают 4-7 м, что по длине скважин составляет 25-40 %. Увеличение обводнённости буровзрывных скважин происходит в ряде случаев достаточно монотонно. Распределение уровней подземных вод в буровзрывных скважинах свидетельствует о том, что детальный анализ становится невозможным при рассмотрении только региональных особенностей обводнения и отработки рудного тела. Необходимо выделение элементарных объектов (блоков) и изучение достаточно большого количества информации по каждому объекту. В силу сложности процессов, приводящих к формированию элементарных объектов (блоков), они не являются абсолютно одинаковыми и обладают значительным разнообразием даже на одном уровне введенных ограничений из взаимосвязи (например, один горизонт).

Разнообразие свойств взрываемых блоков обусловлено тем, что каждый из них претерпевает воздействие технологических процессов добычи руды, которые осуществляются в условиях ранее протекавших сложных геолого-тектонических процессов. Свойства каждого блока зависят также от условий взаимодействия с другими блоками, существовавшими в предшествующий период времени. Из всего многообразия взаимодействий необходимо выделить такие, которые привели к изменению свойств блока, обуславливающих его обводнённость. С этих позиций рассматриваемый блок является всегда источником информации о других блоках, взаимодействующих с исследуемым. Сложность проводимого анализа заключается не только в выделении полезной информации из всей

совокупности данных, но и в формировании показателей, наиболее тесно увязанных с возможными техническими решениями. При этом значения отдельных полезных показателей должны быть получены на фоне превосходящей по интенсивности информации о фиксируемых на производство параметрах ведения буровзрывных работ.



Ри.3.10. Изменение обводнённости карьера МГОКа по горизонтам ведения взрывных работ в 1986 г.:

1 – график изменения средних столбов воды в скважинах;

2 – график изменения средней обводнённости скважин

Для выделения факторов и обоснования показателей обводнённости глубоких горизонтов карьеров было выполнено полевое обследование условий ведения горных работ на рудных уступах на карьерах КМА. Наиболее полное и всеохватывающее обследование выполнялось по маршрутам на рудных горизонтах Михайловского карьера.

Характерные закономерности, которые были выявлены в период обследования, позволяют на основе собранного фактического материала выявить особенности обводнения кристаллических пород на рудных горизонтах.

На восточном борту карьера, кроме общей оценки обводнённости блоков и буровзрывных скважин на различных горизонтах, характерным было обследование уступов кристаллических пород. Особенности структурного строения уступа и характер образований трещин после взрыва чётко проявился на откосе уступа (рис.3.11).

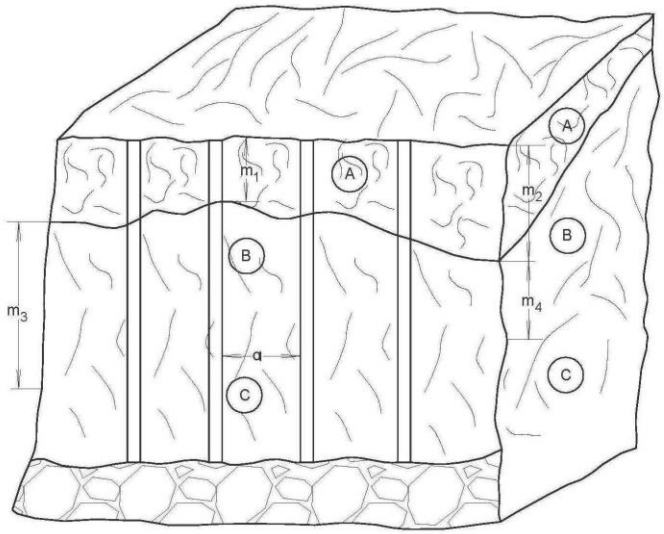


Рис.3.11. Схема трещиноватости откоса в кристаллических породах после ведения взрывных работ

Буровзрывные скважины располагались на расстоянии 3 м друг от друга. Визуальное обследование уступа показало, что можно выделить три зоны *A, B* и *C*. В зоне *A* чётко прослеживается пространственно взаимосвязанная система трещин. Мощность этой зоны на откосе изменялась от m_1 = 2 до m_2 = 5 м, уменьшение мощности происходило между скважинами. Размеры структурного блока не превышали 0,5 × 0,5 м. В зоне *B* фиксировались трещины, взаимосвязь которых между собой визуально не устанавливалась. Размеры блоков породы, разделённых трещинами, превышали 1×1 м. Мощность зоны *B* (m_3, m_4) составляла в разных местах откоса 6-10 м. Ниже зоны *B* расположена зона *C*, которая визуально имела монолитное строение. Признаков обводнённости ни на одной из зон на откосе не отмечалось.

На западном борту характерным является обследование блока, в обводнении которого участвовали подземные воды вышележащих рыхлых вскрышных пород. Блок рудного горизонта примыкал к рыхлым обводнённым породам. Уровень подземных вод в рыхлых породах отмечался на высоте 3-4 м от поверхности оплывин, которые имели различную форму и на некоторых участках достигали блока буровзрывных скважин. На оплывинах появлялись выходы подземных вод в виде ручейков, на поверхности блока создавали скопления воды, что свидетельствует о наличии непроницаемых участков на поверхности блока.

Часть воды поглощалась трещинами в кристаллических породах и обводняла блок. Участок со столбами воды во взрывных скважинах, не превышавшими 2 м, располагался вдоль забоя по добыче руды и вдоль дороги, то есть со стороны открытых частей блока.

Второй характерный блок был встречен на западном борту карьера на одном из нижних горизонтов. Блок также был открыт с двух сторон. На откосе блока весьма чётко прослеживалось воздействие на породы энергии взрыва. Блок располагался в сложной тектонической зоне, и на откосах выделялось два участка. На одном небольшом по размерам участке кристаллические породы вскрывались вкрест простирания, на втором – по простиранию. При вскрытии пород вкрест простирания чётко выявлялись отдельные пласты мощностью 0,5-1,0 м, которые отделялись друг от друга трещинами напластования, раскрывшимися в результате воздействия взрывной волны. Обследование откоса, вскрытого по простиранию, показало, что породы образовывали на откосе ровную поверхность, которая только в верхней части была разбита трещинами на крупные блоки. Максимальная мощность зоны блочного строения составляла 5,0-7,0 м от поверхности уступа. Обнаружить выходы воды ни на одном откосе блока не удалось. При наличии такой системы трещин блок оказался практически необводнённым. Средний столб воды в буровзрывных скважинах не превышал 0,5 м.

Пласты кристаллических пород, вскрываемые буровзрывными работами относительно длинных сторон блока, могут помимо описанных выше двух вариантов по простиранию и вкрест простирания располагаться и вдоль диагоналей блока под углом к его откосу. Зоны контактов пластов кристаллических пород вследствие воздействия взрывной волны и раскрытия трещин напластования, очевидно, имеют более повышенную проводимость по сравнению с окружающими породами и должны являться зонами разгрузки и движения подземных вод.

Наиболее обводнёнными из всех обследованных блоков был блок, расположенный на забое карьера. Блок был открыт с южной стороны фронта ведения горных работ. И только с этой стороны два ряда буровзрывных скважин были относительно слабообводнёнными, во всех остальных скважинах (около 40) обводнённая мощность превышала 2/3 их длины (столб воды в отдельных скважинах достигал 14,5 м). Имевшийся небольшой по высоте откос со стороны западного борта не влиял на снижение обводнённости блока. Высота откоса составляла 2-3 м.

Выполненный анализ показателей обводнённости глубоких горизонтов и обследование конкретных блоков в карьерах свидетельствует, что совокупность факторов, которые влияют на обводнённость, является чрезвычайно обширной. Это обстоятельство резко снижает эффективность анализа, выполненного без исследования взаимосвязей между этими

факторами. Количественной характеристике обводнённости глубоких горизонтов должен предшествовать физический анализ, позволяющий установить связь между различными параметрами, поддающимися оперативному контролю при выполнении добычных работ. Для дальнейшего анализа было выделено 8 групп основных факторов, по которым осуществлялась подробная оценка качественных и количественных взаимосвязей с обводнённостью глубоких горизонтов карьера. Обводнённость глубоких горизонтов карьера оценивалась в зависимости от:

1. Региональных гидрогеологических условий месторождения полезных ископаемых.
2. Технологии осушения карьера.
3. Количества выпадающих атмосферных осадков.
4. Техногенного воздействия на рудный массив пород:

- пространственного расположения отработанных блоков на выше- и нижележащих рудных горизонтах;
- трещиноватости пород блока и глубины буровзрывных скважин;
- открытости блока (наличие откосов по периметру блока);
- размеров отрабатываемого блока;
- расположения блока на разных по глубине рудных горизонтах.

5. Временного фактора.

Детальный анализ трещиноватости и обводнённости, связанных с естественными условиями залегания кристаллических пород, становится невозможным при рассмотрении только региональных особенностей отработки рудного тела. Вследствие воздействия технологических процессов добычи руды, в том числе и взрывов в карьере, на массивы кристаллических пород, формировавшихся ранее в сложных геолого-тектонических условиях, создаются локальные участки трещиноватости и обводнённости, изменяющиеся при очередных технологических взрывах.

Детальные исследования, проводимые на карьерах по изучению трещинообразования в результате действия взрывов непосредственно в приконтурной зоне отрабатываемого горизонта, показали, что в области остаточных деформаций прослеживается несколько систем трещин, и можно выделить три зоны трещинообразования.

Первая зона больших заколов с шириной трещин более 3 мм, в этой зоне породы разбиты радиальными трещинами. Вторая зона мелких трещин образуется на расстоянии 10—15 м от линии разрушения, и породы в ней разбиты отдельными радиальными мелкими трещинами шириной 2—3 мм. Третья зона мелких трещин образуется на расстоянии 15—25 м от линии разрушения. Максимальная степень трещинообразавания наблюдается в пределах 0—10 м от бровки уступа.

По данным исследований зон трещинообразования с использованием

сейсмоакустических методов в условиях Михайловского карьера при последовательной отработке уступов под воздействием энергии взрывов на отрабатываемых блоках по мощности также выделяют три зоны трещинообразования. Первая (верхняя) зона нарушенного слоя, глубина которого от поверхности блока и его откоса вглубь массива составляет для окисленных 2-5 м и 5-7 м для неокисленных кварцитов, характеризуется раздробленностью и нарушенностью массива, где трещины имеют гидравлическую связь (см. рис. 3.11). Во второй зоне со слабонарушенным массивом пород мощностью 5-8 м в окисленных и 3-5 м в неокисленных кварцитах наблюдаются раскрытые трещины по плоскостям структурных блоков. Трещины в основном гидравлически не связаны, и отсутствует в нижней части связь с трещиноватостью откоса блока. Третья (нижняя) зона с естественной структурой и трещиноватостью скальных пород является практически водонепроницаемой.

Механизм фильтрации воды в трещиноватом массиве предполагается следующий. Вода, поступающая во взрывные скважины буровзрывных блоков через верхнюю зону при выпадении атмосферных осадков и за счёт проскока подземных вод в карьер, заполняет их по тупиковым трещинам до водопроницаемой зоны. При дальнейшем поступлении воды она растекается по водопроницаемой зоне и поднимается до тех пор, пока уровень воды не станет больше отметки второй промежуточной зоны с гидравлически несвязанными трещинами и стекает в сторону откоса блока. Во второй зоне вода содержится в трещинах, но через эту зону не происходит фильтрация из-за отсутствия гидравлической связи между трещинами. Вертикальная фильтрация также не происходит, так как породы ниже второй зоны являются практически водоупорными. Вода в буровзрывных скважинах стоит как в «стакане», и только в верхней части имеется некоторое движение, скорость которого зависит от количества выпадающих атмосферных осадков, расхода подземных вод, поступающих в скальные породы за счёт проскока с верхних водоносных горизонтов в карьер, и перетока подземных вод с верхних горизонтов скальных пород на нижние при производстве на них взрывных работ.

Эти теоретические предпосылки подтверждаются исследованиями, проведенными на Михайловском карьере при определении проницаемости кварцитов на буровзрывных блоках индикаторным методом.

На южном борту карьера на горизонте 90-75 м замеры производились в центральных частях столбов воды буровзрывных скважин. Скорость фильтрации в скважинах в первом ряду от бровки откоса блока незначительная и составляла 0,007 м/сут, во втором ряду от бровки на расстоянии 30 м скорость составляла 0,017 м/сут, а в скважине следующего ряда фильтрация практически отсутствовала. Столбы воды в буровзрывных

скважинах с удалением от бровки откоса блока также возрастали и изменялись от 1 м у бровки до 7,2 м на расстоянии 40 м от бровки откоса блока, что могло бы свидетельствовать о наличии градиента потока подземных вод. Однако при отсутствии связанной трещиноватости фильтрация воды на этих глубинах в блоке не происходила. Данные по скорости фильтрации подземных вод в верхней части блока позволили оценить коэффициент фильтрации, который изменялся от 0,02 до 0 01 м/сут. Опыты показали наличие в массиве кварцитов взаимосвязанной системы трещин, по которым происходит сток подземных вод в сторону откоса, и в то же время на расстоянии 30 м от бровки блока фильтрация подземных вод не была обнаружена. Для оценки фильтрации подземных вод в скальных породах и выявлении её механизма аналогичные работы производились на горизонте 90-75 м на западном борту карьера. При этом была изменена методика определения скорости фильтрации подземных вод в массиве кварцитов. Предварительно в скважину запускался индикатор (соль) и производились замеры скорости фильтрации по всей длине столба воды в скважинах. Было установлено, что максимальная скорость фильтрации наблюдалась не глубже 0,1 м от поверхности воды в скважине, а ниже концентрация соли не менялась и скорость фильтрации была близка к нулю. Замеры скорости фильтрации подземных вод в приповерхностной зоне столбов воды в скважинах показали, что скорость фильтрации у бровки откоса незначительная и возрастает с удалением от бровки с 0,002 до 0,007 м/сут соответственно на расстоянии 25 и 50-55 м. При этом столбы воды в буровзрывных скважинах изменялись от 1,9 до 7 м и увеличивались также с удалением от бровки откоса вглубь массива пород. Наибольшие скорости фильтрации наблюдались по третьему створу и изменялись от 0,06 м/сут в 10 м от бровки откоса блока до 0,37 м/сут на расстоянии 46 м. Коэффициент фильтрации проницаемой зоны составил от 0,01 до 0,5 м/сут.

Блоки обладают значительным разнообразием изменения трещиноватости и обводнённости кварцитов, Изменение уровней воды в буровзрывных скважинах на одном из блоков колеблется от 0 до 10 м от подошвы блока. Это указывает на то, что в пределах одного блока формируются разнообразные локальные условия обводнения. Опыт отработки глубоких горизонтов карьеров подтвердил гипотезу, что на обводненность пород в блоках оказывают влияние природные и технологические факторы и формирование локальных условий обводнения в карьерах происходит за счёт сочетания разнообразных параметров их трещиноватости.

Для изучения особенностей формирования подземных вод в кристаллических породах были проанализированы водопритоки к дренажным узлам Михайловского карьера. Обследование дренажных узлов и

анализ собранных материалов по их производительности позволяют оценить происхождение подземных вод. Приток к дренажным узлам слагается из части водопритоков, связанных с атмосферными осадками, за счёт перетекания и проскока из бат-келловейского водоносного горизонта, проскока из рудно-кристаллического и надкелловейского водоносного комплекса, а также за счёт перетекания подземных вод в процессе производства взрывов в карьере с вышележащих горизонтов. Резкое увеличение производительности дренажных узлов связано со взрывами блоков, находящихся в радиусе влияния этих узлов. В среднем за год за счёт взрыва блоков, расположенных в радиусе влияния дренажных узлов, приток к западному штреку № 6 составил около 2 $м^3$/ч, для южного штрека № 6 - 18 $м^3$/ч, для южного центрального штрека - 1 $м^3$/ч. Радиус влияния дренажных узлов невелик, и водоприток к ним весьма хорошо коррелируется с атмосферными осадками. Приток в дренажные узлы в основном формируется из атмосферных осадков и подземных вод, аккумулируемых в верхних горизонтах, перетекающих при взрывах в карьере по взорванным и трещиноватым породам. В среднем этот приток к дренажным узлам западного штрека № 6 составил около 30 $м^3$/ч, для южного центрального штрека - около 15 $м^3$/ч, южного штрека № 6 - около 17 $м^3$/ч. Если считать, что в период отсутствия атмосферных осадков основную часть водопритока составляют подземные воды рудно-кристаллического и бат-келловейского водоносных горизонтов, то дренажный узел западного штрека № 6 принимал около 10 $м^3$/ч, южного штрека № 6 - около 20 $м^3$/ч и южного центрального штрека - около 5 $м^3$/ч, что соответственно составляет примерно 20,35 и 25 % от общих водопритоков к дренажным узлам.

В целом анализ трещиноватости, обводнённости и проницаемости скальных пород свидетельствует о следующих особенностях режима подземных вод:

1. В пределах различных горизонтов скальных пород формируются локальные условия обводнения.

2. В пределах массивов скальных пород выделяют техногенную верхнюю взаимосвязанную и нижнюю невзаимосвязанную систему трещин.

3. Вода в буровзрывных скважинах на значительной части их мощности находится как в «стакане» и движение подземных вод наблюдается только в приповерхностной области уровня воды.

4. Формирование локальных условий обводнения скальных пород происходит за счёт сочетания разнообразных параметров их трещиноватости и условий питания подземных вод.

5. Основным источником обводнения скальных пород на глубоких горизонтах являются атмосферные осадки и перетоки из вышележащих водоносных горизонтов.

Общая оценка технико-экономических показателей горнодобывающего производства свидетельствует, что необходим планомерный и интенсивный поиск технических решений по снижению отрицательного влияния обводнённости на отдельные технические операции ведения добычных работ на глубоких горизонтах карьеров. Сложность технологических процессов, их взаимодействие с природными условиями, информация о которых всегда является вероятностной, ставит серьёзные трудности в однозначном определении количественных связей, необходимых для выбора наилучшего варианта осушения. Рассмотрим влияние обводнённости на эффективность буровзрывных работ.

Буровзрывные работы в общей технологической цепочке добычи руды и разработки скальных и полускальных пород имеют целью качественную и количественную подготовку объёма горной массы из целостного массива горных пород. Одинаковое качество подготовки горной массы при различных физико-механических свойствах пород достигается изменением технологических схем и различных параметров буровзрывных работ (табл. 3.8). Ретроспективный анализ свидетельствует, что изменение параметров буровзрывных работ и показателей обводнённости массива пород предпочтительнее ухудшения качества подготовки горной массы, так как это влечёт за собой дополнительный рост затрат на экскавацию, дробление негабарита, транспортировку, складирование и крупное дробление руды.

Вывод о целесообразности варьирования затратами на буровзрывные работы может быть получен на основе оптимизации экономически и технологически обоснованных показателей качества подготовки горной массы. Оптимизационные расчёты будут выполнены только при известных взаимосвязях между расходом взрывчатых веществ (ВВ), объёмом буровых работ и выходом дроблёного продукта, средним размером дробления породы, высотой и площадью развала, высотой выступов, образующихся после взрыва на подошве уступа. Важно также ценить влияние этих взаимосвязей на технико-экономические показатели основных технических процессов добычи руды (экскавацию, дробление, транспортировку, складирование и т.д.). Для реальных условий горного производства это влияние будет обратно-пропорциональным, то есть с ростом затрат на буровзрывные работы (при прочих равных условиях) происходит снижение затрат на другие перечисленные виды работ.

Для количественной оценки влияния обводнённости на буровзрывные работы будем считать, что обводнённость горных пород ухудшает условия ведения буровзрывных работ. Рассмотрим однородный, изотропный массив горных пород. В осушенном состоянии для его взрывания необходимо соорудить n_0 скважин диаметром d_0. Расход ВВ для дробления породы составляет величину q_0.

Таблица 3.8 - Параметры и показатели взрывных работ
в осушенных и обводнённых породах

Показатели	Обозначения	Осушенный уступ борта карьера	Обводнённый уступ борта карьера	Подводный уступ борта карьера
Диаметр буровзрывных скважин, м	d	0,16	0,112	0,112
Глубина скважины, м	$b_{ск}$	10	8	6,5
Средняя высота столба воды в скважине, м	$h_{ск}$	0	8	6,5
Расстояние между скважинами в ряду и между рядами скважин, м	l	5,0	3,0	3,0
Удельный расход ВВ, кг/м^3	q	0,32	0,97	1,45
Выход горной массы с 1 м длины скважины, м^3/м	a	15,5	7,4	5,2

Примечание: Таблица составлена по данным, приводимым в статье [45].

Улучшение дробления массива пород при одинаковом удельном расходе ВВ может быть достигнуто уменьшением диаметра буровзрывных скважин. Учтём также, что при одинаковых условиях дробности расход ВВ с диаметром скважин связан зависимостью [46]:

$$q = q_0(\frac{d}{d_0})^m \quad , \qquad (3.19)$$

где q, q_0 – удельный расход ВВ соответственно при диаметре скважин d и d_0, кг/м^3;

d, d_0 – диаметры скважин, м;

m –степень поправочной функции для константы дробимости на изменение диаметра скважины, доли единицы. Согласно работе [47] значение m может быть принято для скважинных зарядов равным 0,5.

При уменьшении диаметра скважины для заряжения одинаковой массы ВВ потребуется пробурить больше скважин, что определяется формулой.

$$n = (\frac{d_0}{d})^2 n_0, \qquad (3.20)$$

где n, n_0 – количество скважин соответственно диаметра d и d_0, шт.

Составляя зависимости (3.19) и (3.20), получаем, что количество буровзрывных скважин при уменьшении их диаметра в обводнённом массиве для достижения одинаковых условий дробимости составит

$$n = n_0 (\frac{d}{d_0})^{m-2}, \qquad (3.21)$$

Переходя к изменению объёма бурения в обводнённом массиве в зависимости от изменения диаметра скважин и расхода ВВ, получим

$$V = \frac{(d / d_0)^{m-2}}{a}, \qquad (3.22)$$

где V – объём бурения в пересчёте на 1 м^3 выхода горной массы, м/м^3;

a – выход горной массы на 1 м скважины, м^3/м.

В качестве показателя обводнённости в однородном массиве пород принимаем отношение столба воды в скважине и над ней к её глубине

$$G = \frac{h_{вс} + h_{ву}}{h_{ск}}, \qquad (3.23)$$

где G – показатель обводнённости, доли ед.;

$h_{вс}$, $h_{ву}$, $h_{ск}$ – величина столба воды соответственно в скважине, над устьем скважины и глубина скважины, м.

В соответствии с предлагаемым подходом были обработаны данные табл. 3.8, которые после пересчёта приведены в табл. 3.9 и на рис. 3.12 и 3.13. Статистическая обработка данных позволяет аппроксимировать их зависимостями:

$$V=0{,}0266G+0{,}1096 \qquad (3.24)$$

$$q=0{,}435+0{,}634G–0{,}099G^2 \qquad (3.25)$$

d = 112 мм;

коэффициент крепости изменяется от 2 до 5.

Анализируя полученные статистические зависимости (3.24) и (3.25), следует отметить, что в рассмотренном интервале данных для указанных условий объём бурения возрастает пропорционально степени обводнённости, так, например, рост обводнённости на 1 % приводит к увеличению объёмов бурения при прочих равных условиях примерно на 0,00026 м на 1 м^3 горной массы. Расход ВВ от степени обводнённости описывается более сложной

зависимостью, с увеличением обводнённости горного массива будет стремиться к какому-то предельному значению.

Таблица 3.9 - Показатели буровзрывных работ

Показатели	Обозначения	Осушительный уступ	Обводнённый уступ	Подводный уступ
Объём бурения, м/м^3	V	0,1102	0,1351	0,1923
Расход ВВ, кг/м^3	q	0,435	0,97	1,45
Средний уровень воды над скважиной, м	$h_{ву}$	0	0	13,5
Показатель обводнённости, доли ед.	G	0	1,0	3,1

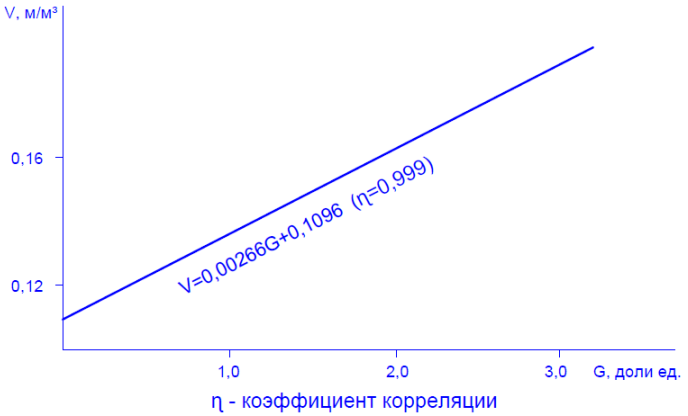


Рис. 3.12. Зависимость объёма бурения от степени обводнённости

В интервале изменения обводнённости от 0 до 100 %, рост обводнённости на 1 % увеличивает при прочих равных условиях расход ВВ примерно на 0,00053 кг на 1 м^3 горной массы.

Рассмотренные случаи не учитывают удорожания стоимости ВВ при взрывании обводнённого массива пород. Очевидно, что оно усугубляет негативное влияние подземных вод на эффективность буровзрывных работ.

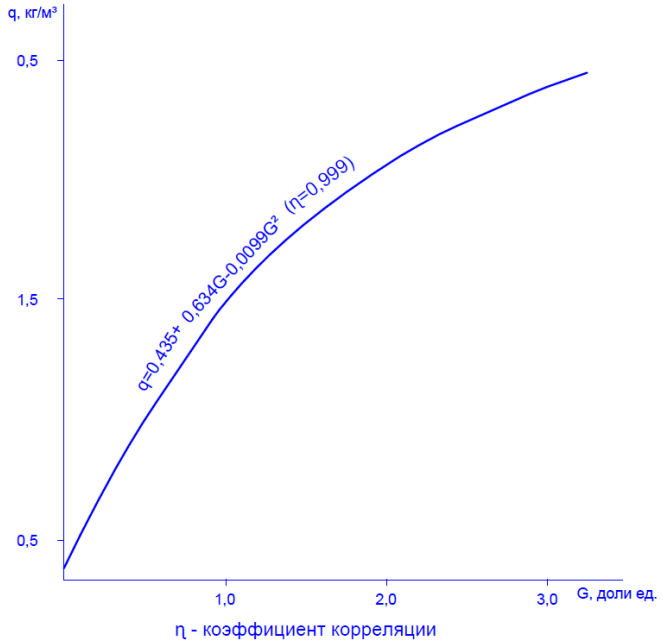


Рис. 3.13. Влияние степени обводнённости на расход взрывчатых веществ

Выполненная оценка свидетельствует, что в качестве подготовительной операции при проведении буровзрывных работ следует рассматривать варианты снижения обводнённости массива пород. Технические решения, которые целесообразно рассмотреть и разработать, должны в значительной мере учитывать особенности и возможности проявления энергии взрыва в скальном массиве пород. Выполненная оценка обводнённости буровзрывных блоков глубоких карьеров однозначно указывает на целесообразность разработки локальных схем для их осушения. Для осушения буровзрывных блоков предложены схемы, основанные на использовании дренажных щелей. Приведены параметры схем осушения для отдельных блоков [44].

Образование дренажных щелей возможно следующим образом. С поверхности отрабатываемого блока 1 (рис. 3.14), основными элементами которого являются откос 2, верхняя 3 и нижняя 4 бровки блока 1 и граница 5 с вышележащим уступом 6, определяют уровень подземных вод (рис. 3.15). Выделяют участки 8, 9, 10, 11 и 12 (см.рис.3.14) с различными 13 и 14

уровнями подземных вод от подошвы блока [48]. Устанавливают по высоте блока 1 зону с пространственно связанной трещиноватостью по характерным направлениям профилей, перпендикулярных к верхней 3 бровке блока 1 и к границе 5 с вышележащим уступом 6.

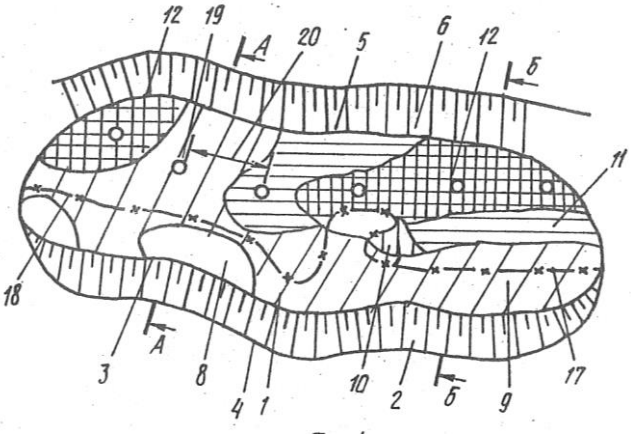


Рис. 3.14. Выделение на блоке зон с разной обводнённостью

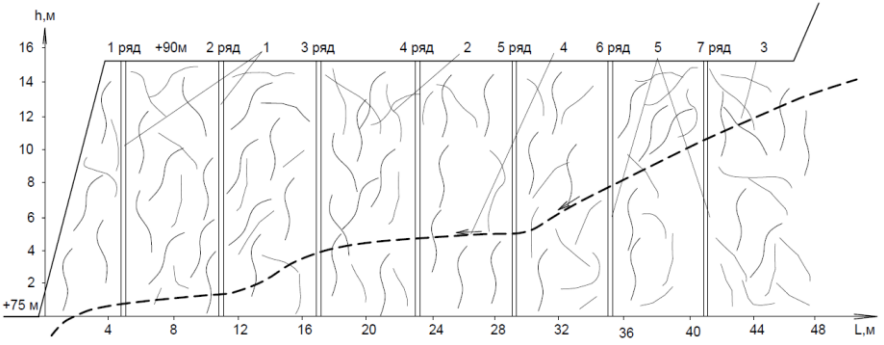


Рис.3.15. Уровень подземных вод на буровзрывном блоке:
1- буровзрывные скважины; 2-трещиноватость пород; 3-уровень подземных вод; 4- направление потока подземных вод; 5- часть ствола скважины в зоне невзаимосвязанных трещин

Основным критерием выделения зоны пород с пространственно связанной трещиноватостью является распределение уровней подземных вод по блоку 1, при котором вся вода, поступающая со стороны откоса

вышележащего уступа 6, стекает на откос 2 отрабатываемого блока 1 по гидравлически связанным между собой трещинам.

После выделения зоны пород с пространственно связанной трещиноватостью определяют со стороны откоса 2 блока 1 границу 17 зоны, по мощности равной уровню понижения $S_{тр}$ подземных вод.

Буровзрывные скважины 19 (см.рис. 3.14) будущих дренажных щелей располагают за пределами зоны, отмеченной границей 17 с учётом участков 8, 9, 10, 11 и 12 пород с различным уровнем подземных вод. Расстояние 20 между буровзрывными скважинами 19 дренажных щелей, глубина заложения и количество взрывчатых веществ рассчитывается исходя из минимального необходимого радиуса образования трещин, гидравлически связанных с зоной с пространственно связанной трещиноватостью, общей суммарной мощностью, равной уровню понижения $S_{тр}$ подземных вод по всему блоку 1.

Для рационального размещения буровзрывных скважин 19 дренажных щелей на блоке 1 дренажную щель сначала формируют между участками пород с наибольшей обводнённостью и откосом 2 блока 1. Так, например, породы участка 12 характеризуются обводнённостью в 10-15 м, которая является наибольшей на блоке 1. После взрывания буровзрывных скважин 19 создаётся дренажная щель и в породах образуются трещины, гидравлически связывающие обводнённые участки 9, 10, 11 и 12 с участками 8 и с откосом 2 блока 1. За счёт образованной гидравлической связи на обводнённых участках 9, 10, 11 и 12 происходит снижение уровня 7 подземных вод и осушение всего блока 1 за счёт перетекания воды в породы участков 8 с меньшей обводнённостью и на откос 2 блока 1 и, таким образом, к снижению уровня 7 до уровня понижения $S_{тр}$ на всём блоке 1. При большой ширине обводнённых участков блока буровзрывные скважины 19 выполняются в два и более рядов. Взрывание этих рядов скважин производят последовательно от границы зоны пород с пространственной связанной трещиноватостью в направлении горного массива в сторону откоса 2 блока 1.

Создание связанной трещиноватости в обводнённых породах осуществляется с последовательным взрыванием, начиная с первого, ближнего к верхней 3 бровке блока 1, ряда скважин и заканчивая последним рядом, ближайшим к границе 5 с вышележащим уступом 6, с интервалом времени между взрывами, равным времени осушения участка невзорванных пород каждого последующего ряда. Причём вода при взрыве каждого следующего ряда буровзрывных скважин 19 отжимается в зону пород с пространственной связанной трещиноватостью, созданной взрывом предыдущего ряда буровзрывных скважин 19 за счёт проникновения газообразных продуктов детонации в трещины массива.

Выполненная оценка обводнённости буровзрывных блоков глубоких карьеров однозначно указывает на целесообразность разработки локальных

схем для их осушения. Разработка рекомендаций и технических решений по осушению добычных горизонтов глубоких карьеров осуществлялась с учётом результатов многофакторного анализа природных и техногенных факторов, обусловливающих обводнённость рудных тел [44,48].

Выявленные закономерности позволяют предложить ряд вариантов систем локального осушения глубоких горизонтов карьеров. Из имеющегося набора дренажных устройств в локальных схемах целесообразно использовать дренажные щели, сооружаемые буровзрывным способом, чтобы при их сооружении достигалось создание единой трещиноватой зоны на всю высоту отрабатываемого уступа. С учётом ширины и конфигурации взрываемого блока дренажную щель образуют по всей длине блока или только на наиболее обводнённой его части (см.рис.3.14).

Представленные системы осушения наиболее целесообразны для использования на глубоких горизонтах карьеров, они могут быть дополнены с учётом конкретного изменения трещиноватости и фильтрационных параметров массива горных пород. Расстояние от откоса взрываемого блока до дренажной щели составляет 40-45 м, на участках блока шириной около 30 м дренажная щель может не сооружаться. При ширине блока более 60 м на нём сооружаются дренажные щели, усиленные диагональными рядами скважин, с расстоянием между ними около 30 м. Скважины в рядах по отношению друг к другу для улучшения условий дренирования трещиноватого массива могут располагаться со смещением.

При незначительной открытости блока (до 10-15%) и небольшой его ширине до 25 м дренажную щель располагают перпендикулярно открытой стороне блока и сооружают её с учётом наиболее обводнённых участков блока. При открытости блока 40-45 % дренажную щель сооружают параллельно длинной открытой стороне, сместив её к внутренней бровке блока, располагая скважины дренажной щели на расстоянии около 20-30 м от открытой стороны блока. Однако для таких блоков снижения обводнённости можно достичь, используя эффект увеличения мощности трещиноватой зоны за счёт перебура скважин на взрываемом вышележащем блоке. Перебур скважин на верхнем блоке на участке расположения дренажной щели нижнего блока должен составлять более 2-3 м. При сложной конфигурации блока и изменяющейся его ширине от 15 до 60 м дренажная щель сооружается параллельно внешней бровке блока и усиливается диагональными щелями на наиболее широких обводнённых участках. Для блоков шириной более 60 м, открытых с одной стороны, и при величине открытости до 30-35 % система осушения состоит из комбинации диагональных и продольной дренажной щелей.

Рассмотрим в качестве примера систему осушения блока N14к-45 горизонта +60-+45 м на Михайловском карьере. Для осушения блока

воспользуемся рекомендациями по сооружению дренажных щелей с помощью вертикальных скважин. По имеющимся фактическим данным на блоке выделены зоны с различной обводнённостью (рис.3.16). Зона с наименьшей обводнённостью (до 0,5 м) занимает в основном центральную часть блока, зона с наибольшей обводнённостью (5-10 м) примыкает к внутренней бровке блока. Между ними расположены промежуточные зоны с обводнённостью 0,5-3 м и 3-5 м. Площади части блока со столбами воды от 0,5 до 1,0 м от подошвы взрываемого уступа составляет 57 % от всей площади блока. Для создания активной трещиноватой зоны по подошве взрываемого блока определим расстояние между взрывными скважинами дренажной щели и между взрывными скважинами и границей зоны обводнённого массива пород с уровнем воды 0,5-1,0 м от подошвы уступа. Расчёт радиуса разрушения породы в плоскости подошвы уступа для гранулированного тротила производим по известной формуле [47].

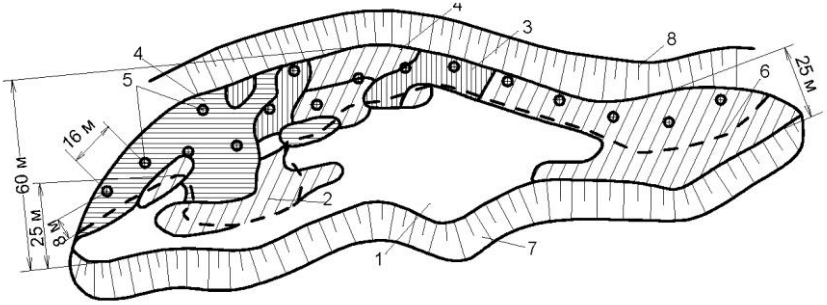


Рис.3.16. Система осушения блока №14к-45 горизонта +60-+45 м. Зоны обводнённости блока со столбами воды в буровзрывных скважинах: 1 – до 0,5 м; 2 – 0,5-3 м; 3 – 3-5 м; 4 – 5-10 м; 5 – взрывные скважины дренажной щели; 6 – граница зоны распространения взаимосвязанной трещиноватости до подошвы взрываемого массива с уровнем воды 0,5-1 м от подошвы; 7 – откос взрываемого блока; 8 – откос вышележащего горизонта

Расчёты показали, что радиус разрушения составляет 7,0-14,0 м. Расстояние между скважинами в ряду дренажной щели в соответствии с расчётом составит 16-18 м для конкретных условий блока. Основная дренажная щель проходит через весь блок и сооружается на расстоянии 8-9 м от границы зоны активной трещиноватости на всю мощность взрываемого уступа. Всего сооружают 14 скважин, длина скважин определяется мощностью уступа и величиной перебура и равна 18-20 м. Для усиления

дренажа зоны с обводнённостью 5-10 м у внутренней бровки блока сооружают ещё две скважины на расстоянии 8-9 м от основной щели.

Выбор рациональной системы осушения блока связан с оценкой схемы его обводнения. Выделение зон с различными уровнями подземных вод в настоящее время может быть достоверно получена только после сооружения на блоке буровзрывных скважин. При отсутствии скважин следует пользоваться установленными закономерностями и дать прогноз обводнённости блока. Точная оценка обводнённости блока до сооружения буровзрывных скважин возможна при использовании новых технических решений для фиксации подземных вод без сооружения скважин. Технические требования к приборам должны быть следующие:

- фиксация уровня грунтовых вод в трещиноватых железистых кварцитах до глубин 15-18 м от поверхности блока;
- масса переносной части прибора до 3 кг;
- возможность использования малогабаритных источников питания, точность замера уровня подземных вод $\pm$ 0,5 м.

Внедрение приборов в практику оценки обводнённости глубоких горизонтов карьеров даёт качественно новый уровень определения обводнённости блоков и разработки соответствующих локальных систем осушения.

Оценивая в целом условия изменения обводнённости, отметим, что с увеличением глубины ведения добычных работ в карьерах происходит существенный её рост на глубоких горизонтах [49]. На Михайловском карьере увеличение глубины добычи руды на 60 м привело в среднем к возрастанию столбов воды в буровзрывных скважинах в 5-7 раз. На разных бортах карьера обводнённость изменяется неодинаково, так, например, на восточном борту карьера столбы воды в буровзрывных скважинах достигают 40 % их длины, на западном – примерно в 3 раза меньше.

В региональном плане существенное влияние на обводнение глубоких горизонтов карьера оказывает гидравлическая взаимосвязь между водоносными горизонтами в рыхлых породах вскрыши и в трещиноватых породах, вмещающих рудное тело. На Михайловском месторождении общая площадь неосушенных участков с прямой гидравлической связью составляет около 1,4 км^2. По фронту ведения горных и буровзрывных работ длина границы участков с непосредственной гидравлической связью между батским и рудно-кристаллическим водоносными горизонтами изменяется от 870 до 2400 м на различных участках борта карьера.

Оценка влияния техногенных факторов на обводнённость глубоких горизонтов показала, что

а) обводнённость нижних горизонтов карьера зависит от образования при взрыве взаимосвязанной системы трещин. Мощность невзаимосвязанной

системы трещин изменяется в различных условиях и может составлять около 80-90 % высоты взрываемого уступа;

б) обводнённость блоков нижних горизонтов определяется наличием на блоках открытых откосов. Блоки, имеющие открытость менее 10 %, характеризуются 100 % обводнённостью. При открытости блоков более 40 % обводнённость блока резко снижается, и максимальные уровни воды в буровзрывных скважинах не превышают 3,0 м. Выполненные опытные работы по оценке скорости фильтрации свидетельствовали о том, что на расстоянии от бровки откоса, равном 0-3 м, отмечается движение потока воды, при расстояниях более 30 м скорость фильтрации равна 0;

в) отмечается взаимосвязь обводнённости блока от его размеров и конфигурации. На участках блоков шириной до 20 м от внешней бровки уступа обводнённость буровзрывных скважин не превышает в основном 15 % их длины. При ширине блока более 20 м обводнённость скважин в этой зоне резко возрастает и достигает максимальных значений в скважинах, располагаемых у внутренней бровки блока;

г) одним из источников обводнения глубоких горизонтов карьеров являются атмосферные осадки. На Михайловском карьере КМА по сравнению с 1984 годом площадь водосбора для нижних горизонтов увеличилась от 1,5 до 4,1 раза;

д) технология осушения глубоких карьеров при осуществлении запроектированных систем добычи руды базируется на следующих положениях:

- развитие системы осушения за пределами зоны ведения горных работ на участках непосредственного контактирования обводнённых осадочных отложений с кристаллическим массивом пород;

- развитие системы осушения в пределах зоны ведения вскрышных работ с перехватки потока подземных вод до его выхода на откос борта карьера;

- создание в карьере системы водоотведения, исключающей переток дренажных вод на горизонты ведения буровзрывных работ;

- создание локальных схем осушения в зоне ведения горных работ на добычных горизонтах;

- локальные схемы осушения добычных горизонтов увязываются с технологией ведения буровзрывных работ и техногенным воздействием на массив горных пород при рассеивании в нём энергии взрыва.

3.4.4. Технология осушения сжатым воздухом

При разработке пластовых месторождений для осушения выемочных участков широко используют подземные системы осушения [50]. Особенностями освоения этих месторождений в настоящее время являются: наличие в кровле полезного ископаемого водоносных горизонтов с низкой водоотдачей, повышенные требования к осушению добычных участков в связи с применением высокопроизводительного выемочного оборудования, рост параметров выемочных столбов, дефицит времени на осушение при используемых системах с отработкой обратным ходом.

Из методов интенсификации осушения обводнённых пород может быть в данных условиях использовано вакуумирование или нагнетание в пласт сжатого воздуха [51, 52].

Нагнетание воздуха в обводнённый пласт осуществляется по разным схемам. Для систем осушения при всех схемах общим является наличие воздухонагнетательных и дренажных (разгрузочных) скважин (рис.3.17). Через воздухонагнетательные скважины под давлением, превышающим напор воды в осушаемом пласте, нагнетают воздух до достижения постоянного давления в прифильтровой зоне. Пластовая вода под воздействием избыточного давления воздуха оттесняется из массива осушаемых пород и интенсивно разгружается в горизонтальные выработки через дренажные скважины. По достижении необходимых остаточных напоров в осушаемом пласте воздухонагнетательные скважины переключаются для дренирования.

Нагнетание сжатого воздуха в систему осушения осуществляется из шахтных магистралей. Это является одним из преимуществ данной технологии. В обвязке воздухонагнетательных скважин применяют стандартные устройства и манометры по пропуску воздуха и измерению его давления и расхода.

Обобщение технологических приёмов опытно-промышленного нагнетания сжатого воздуха в водоносный пласт позволило разработать основные операции технологии интенсификации процесса осушения при подготовке и отработке выемочных столбов. Технологическая схема использования сжатого воздуха для осушения надрудного водоносного пласта включает шесть основных этапов (табл.3.10).

Работы первого этапа направлены на получение обоснованной информации, необходимой для расчёта технологических параметров систем осушения с применением нагнетания сжатого воздуха в водоносный пласт. В состав необходимой информации входят: строение и литологический состав надрудной толщи пород, мощность надрудных глин и водоносных пластов, попадающих в зоны обрушения при ведении очистных работ; распределение

в плане уровней подземных вод в подрабатываемых водоносных пластах, фильтрационные характеристики подрабатываемых водоносных пластов, естественные и техногенные границы водоносных пластов, технология отработки и мощность вынимаемого пласта руды, план горных работ осушаемого участка, характеристика крепи горных выработок, схема осушения водоносных пластов, конструкция дренажных (разгрузочных) скважин, характеристика системы водоотлива на осушаемом участке, расход дренажных вод действующей системы осушения.

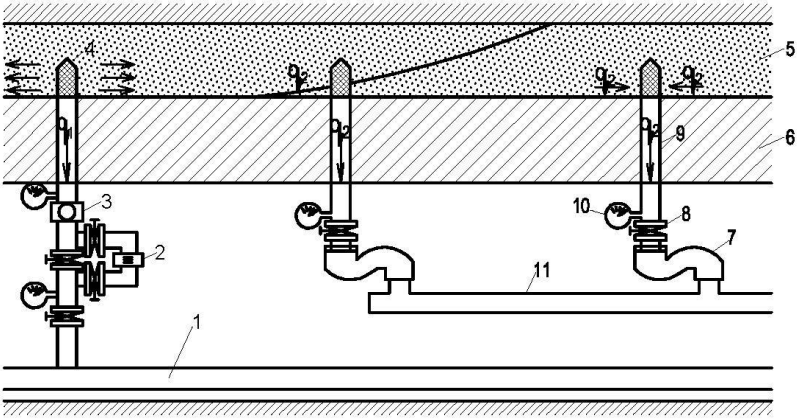


Рисунок. 3.17. Схема интенсификации процесса осушения сжатым воздухом:
1 – шахтный воздухопровод; 2 – расходомер; 3 – обратный пневмоклапан; 4 – фильтрационная колонна; 5 – осушаемый водоносный пласт; 6 – разделяющий водоупорный пласт; 7 – рукав; 8 – вентиль; 9 – поток воды; 10 – манометр; 11 – водоотводящий коллектор

Для повышения достоверности исходной информации опытно-информационные работы целесообразно проводить в пределах участка осушения. Опытные работы можно проводить на действующей системе осушения, состоящей из любого числа восстающих разгрузочных скважин, расположенных как произвольно в плане, так и вдоль парных нарезных штреков.

Таблица 3.10 - Технология применения метода интенсификации процесса осушения сжатым воздухом

Работы	Этап работы	Продолжительность этапа, сут.	Технологические операции	
			основные	сопутствующие
1	2	3	4	5
Подготовительные	Анализ горно-геологических, гидрогеологических и горно-технических условий участка осушения	5	Получение и обработка исходных материалов. Разработка технологического регламента на нагнетание сжатого воздуха	Замеры уровня и напора пластовых вод. Замеры расхода воды из разгрузочных скважин.
	Разработка проекта осушения	5	Расчёт технологических параметров системы осушения	Разработка системы и методики контроля за технологическими параметрами в процессе осушения
	Подготовка участка осушения	5-10	Ревизия технологического состояния дренажных устройств и средств водоотлива на осушаемом участке Подключение воздухонагнетательных скважин к внутришахтному водоотливу	Ремонтные работы по восстановлению технологического состояния дренажных устройств и средств водоотлива Подключение к шахтной электросети режиморегулируемых устройств и контрольно-измерительной аппаратуры
Основные	Нагнетание воздуха в осушаемый пласт	20-50	Пуск сжатого воздуха в осушаемый пласт. Обеспечение расчётных режимных	Включение в работу дополнительных средств водоотлива. Контроль за расходом сжатого воздуха, поступающего в

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4	5
Основные			параметров. Управление процессом осушения	пласт.Контроль за поступлением сжатого воздуха из разгрузочных скважин. Контроль за напряженно-деформированным состоянием крепи горной выработки
	Прекращение нагнетания воздуха в осушаемый водоносный пласт	1	Отключение воздухонагнета-тельных скважин от внутришахтного воздуховода Переоборудование воздухонагнета-тельных скважин в дренажные	Отключение от шахтной электро-сети режиморегули-рующей и контрольно-измерительной аппаратуры. Открытие задвижек на разгрузочных скважинах
Режимные	Контроль за уровнями подземных вод	150	Проведение наблюдений по сети режимных скважин	Замеры уровней подземных вод в осушаемых водоносных пластах

Учитывая наличие в горных выработках шахтных воздуховодов, для получения фильтрационных характеристик можно рекомендовать метод пневмозакачек. В основу его положена следующая зависимость:

$$Q = \frac{4\pi k m P_0}{\eta \ln \dfrac{2{,}25at}{r_0^2}} + Q_в \exp\left(\frac{\gamma}{4a}\right) \frac{\left[-Ei\left(\dfrac{x_0^2}{\quad}\right)\right]}{\ln \dfrac{2{,}25at}{r_0^2}}, \qquad (3.13)$$

где Q — расход воды из разгрузочной скважины, м^3/сут;

$\gamma = \dfrac{Q_b}{\pi m n}$; k — коэффициент проницаемости, м^2;

m — мощность водоносного пласта, м;

P_o — начальное пластовое давление, МПа;

η — динамическая вязкость воды, МПа×сут;

a — коэффициент пьезопроводности, м^2/сут;

t — время от начала нагнетания, сут;

r_0 — радиус дренажной скважины;

Q_B — расход воздуха в воздухонагнетательной скважине, м^3/сут;

n — свободная пористость водовмещающих пород;

x_o — расстояние от нагнетательной до разгрузочной скважины с расходом воды Q, м.

При реализации этого метода одна из разгрузочных скважин переоборудуется в воздухонагнетательную, а устья всех остальных, за исключением одной, перекрываются. Методика обработки материалов опытно-фильтрационных работ по пневмозакачке содержит элементы подбора значений величин, входящих в трансцендентные уравнения, и для облегчения расчётов выполнена в виде программного обеспечения для ЭВМ.

На основании анализа полученной информации производится оценка возможности использования интенсификации осушения с помощью сжатого воздуха.

В результате обобщения накопленного опыта по интенсификации процесса осушения на шахтах Марганецкого и Таврического ГОКов установлены следующие критерии: проницаемость осушаемого пласта должна соответствовать интервалу от 0,5 до 5,0 м/сут; в кровле и подошве осушаемого пласта необходимы выдержанные водоупоры; осушаемый пласт должен быть относительно однородным по строению; мощность осушаемого пласта не должна превышать 10 м; гидростатические напоры воды над подошвой осушаемого пласта не должны превышать 50 м; крепь горных выработок должна иметь достаточный запас прочности, чтобы выдерживать дополнительную нагрузку от 0,06 до 0,11 МПа.

При анализе исходной информации и приведенных критериев оценивают режимные параметры закачки воздуха в осушаемый пласт. Они должны удовлетворять неравенству:

$$\frac{Q_в}{2\pi k_ф m^2} \geq 5, \qquad (3.14)$$

где $k_ф$ - коэффициент фильтрации, м/сут.

При выполнении условия (3.14) интенсификация процесса осушения характеризуется «поршневой» схемой вытеснения воды воздухом. Такая схематизация применяется в гидрогеологических расчётах технологических параметров систем осушения, включающих метод интенсификации процесса водоотбора сжатым воздухом [53].

Гидрогеологические расчёты - основа для проектирования рассматриваемых систем осушения и предназначены для определения избыточного давления воздуха в забое воздухонагнетательных скважин, времени интенсивного осушения, среднего расхода дренажной восстающей скважины, числа дренажных скважин и высоты столба воды в осушенной зоне.

На марганцево-рудных шахтах Украины, Подмосковного угольного бассейна и Боровичского комбината огнеупорных глин системы осушения кровли выемочных столбов состоят из линейных, параллельных рядов восстающих скважин (забивных фильтров), закладываемых через 10-40 м в кровлю нарезных штреков по мере их проходки. Протяженность выемочных столбов составляет 200-800 м, ширина - 50-70 м. При такой схеме дренажа целесообразно применять чередующиеся ряды воздухонагнетательных и разгрузочных скважин, что обеспечивает в процессе интенсификации высокий темп осушения без превышения предельных нагрузок на крепь. Расчёты плоскопараллельного вытеснения воды воздухом выполняются на основании аналитических решений с использованием программ для ЭВМ [53].

В состав проекта входят также система и методика контроля для управления процессом осушения.

Измерения выполняются по стандартным методикам, а места и частота измерений определяются с учётом конкретных горнотехнических условий участка осушения.

В подготовительный этап производят ревизию технического состояния дренажных устройств и средств водоотлива на осушаемом участке. В ходе ревизии обращается внимание на оборудование устьевой части восстающих дренажных скважин. Проверяется надёжность герметизации затрубного пространства скважины в кровле крепи горной выработки. Устанавливается наличие резьбы и переходников на фильтровых колоннах. Определяется возможность переоборудования отдельных скважин в воздухонагнетательные или пьезометрические.

Опыт применения технологии осушения сжатым воздухом свидетельствует о необходимости проведения аудита средств водоотлива с целью оценки их надёжности, работоспособности и соответствия производительности ожидаемым водопритокам.

Нагнетание сжатого воздуха в пласт осуществляется одновременно по всем воздухонагнетательным скважинам. Темп подачи воздуха должен быть максимально возможным для формирования в прифильтровой зоне пласта вертикальной границы фронта «воздух - вода», соответствующей «поршневой» схеме вытеснения. При достижении на забое воздухонагнетательной скважины требуемого расчётного давления темп

закачки воздуха следует регулировать таким образом, чтобы давление, достигнутое в пласте, оставалось постоянным. Выполнению этих операций сопутствует постоянный контроль с помощью средств измерения, установленных на технических обвязках воздухонагнетательных скважин и ближайших пьезометрах.

В период нагнетания воздуха в пласт управление процессом осушения производится на основании оперативного анализа результатов регулярных замеров следующих величин: уровня и напора пластовых вод, расхода воздуха в воздухонагнетательных скважинах, расхода воды из разгрузочных скважин, расхода воздуха из разгрузочных скважин и нагрузки на крепь горной выработки.

На основании анализа результатов замеров осуществляется перекрытие устьев разгрузочных скважин, попадающих в зону полного вытеснения воды из пласта и характеризующихся в этот момент времени большим расходом сжатого воздуха.

В случае регистрации превышения допустимых значений нагрузки на крепь производится сброс давления сжатого воздуха в осушаемом пласте, после чего корректируется величина давления нагнетания.

Решение о прекращении подачи воздуха в пласт принимается на основании регистрации поступления сжатого воздуха из всех разгрузочных скважин параллельного нарезного штрека осушаемого выемочного столба.

Операции по прекращению подачи сжатого воздуха могут выполняться в следующем порядке. Вначале перекрываются задвижки на врезках в воздушную магистраль технологических обвязок воздухонагнетательных скважин. Параллельно с этим производится отключение контрольно-измерительной аппаратуры от шахтной электросети. Затем через отводящие патрубки осуществляется сброс давления воздуха в ставе труб воздухонагнетательных скважин, после этого выполняется демонтаж технологической обвязки. По завершении демонтажа воздухонагнетательные скважины переоборудуются в разгрузочные путём установления на их устьях переходников с резиновым рукавом, подключаемым к коллектору водоотлива.

Перекрытые в ходе нагнетания воздуха разгрузочные скважины открываются и тем самым переводятся в режим дренирования. Работы этого этапа являются завершающими в использовании технологии осушения водоносных пластов сжатым воздухом в кровле выемочного столба.

Рассмотренная технология осушения весьма перспективна для совершенствования защиты горных выработок от подземных вод при разработке пластовых месторождений. Она позволяет с меньшими затратами, без существенной модернизации имеющихся технических средств достигать высокой степени осушения водоносного пласта.

Результаты сооружения систем с использованием сжатого воздуха на разных месторождениях свидетельствуют о том, что наиболее сложные аспекты совершенствования технологии защиты горных выработок от подземных вод связаны с организацией производственного процесса. Предлагаемая технология наиболее успешно реализуется на практике при наличии специализированных структурных подразделений, обеспечивающих сдачу технологического процесса под «ключ» заказчику.

Имеющийся опыт интенсификации процесса осушения сжатым воздухом на месторождениях марганца Украины и на Боровичском комбинате огнеупорных глин дал положительные результаты [52, 57, 58, 59].

Применение на этих объектах метода нагнетания воздуха в водоносный пласт позволило сократить в 2-3 раза сроки осушения участков очистных работ.

Развитие технологии осушения водоносных пластов сжатым воздухом связано с изучением параметров его нагнетания и структуры системы осушения. Опытные работы показали, что перспективным направлением является использование импульсного режима подачи воздуха в пласт [54]. Принципиально данная технология реализуется следующим образом.

На рис. 3.18 – 3.21 показаны основные технологические приёмы:

- сооружение скважин для нагнетания в пласт воздуха;
- нагнетание воздуха в импульсном режиме и отвод воды;
- нагнетание воздуха в постоянном режиме с поддержанием контура осушения.

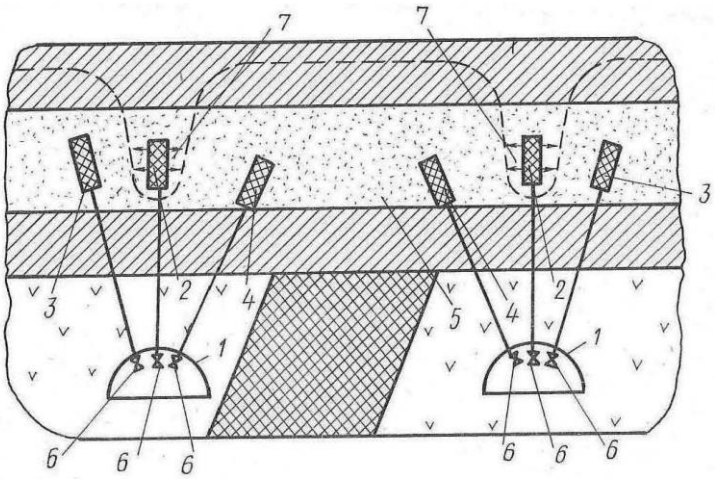


Рис. 3.18. Сооружение воздухонагнетательных и дренажных скважин

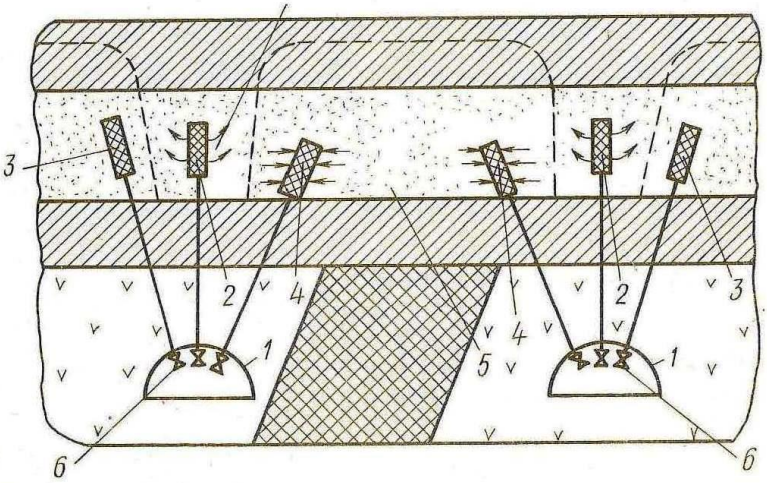


Рис. 3.19. Нагнетание сжатого воздуха в импульсном режиме и оттеснение воды к дренажным скважинам

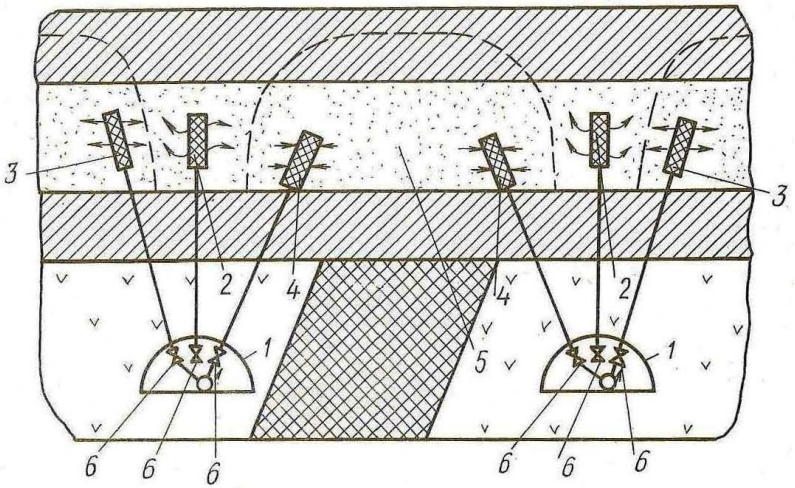


Рис. 3.20. Отвод воды за пределы участка ведения горных работ

Способ осушения водоносного пласта осуществляют следующим образом.

Из подземной горной выработки 1 сооружают восстающие нагнетательные скважины с фильтрами 2, наклонно-восстающие

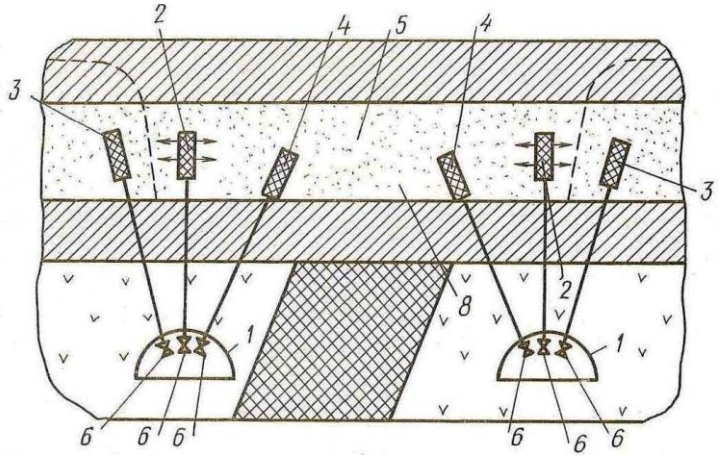


Рис. 3.21. Нагнетание воздуха в обычном режиме для поддержания осушенной зоны

нагнетательные скважины с фильтрами 3 и наклонно-восстающие водоотводящие скважины с фильтрами 4 с заглублением всех скважин в расположенный над выработкой 1 водоносный пласт 5. Все скважины оборудуют на устье задвижками 6. Через нагнетательные скважины 2 в пласт 5 ведут нагнетание воздуха под давлением, превышающим давление воды в пласте 5, до достижения постоянного давления в прифильтровых зонах 7. При этом задвижки 6 на скважинах 3 и 4 закрыты. После достижения заданного постоянного давления в прифильтровых зонах 7 открывают задвижки на водоотводящих скважинах 4, осуществляют отвод воды из пласта 5 и одновременно с этим ведут подачу воздуха в скважины 2 в импульсном режиме. Подачу воздуха в импульсном режиме ведут с помощью пульсаторов давления при давлениях в интервале от незначительно превышающего давления воды в пласте 5 на участке 8 осушения до величины, не создающей турбулентного движения воды в пласте 5, с частотой импульсов, определяемой зависимостью

$$n = \frac{a}{kr^2}, \qquad (3.15)$$

где n – частота импульсов, 1/с;

a – коэффициент пьезопроводности пласта 5, м^2/с;

r –радиус водоотводящей скважины 4, м;

k –экспериментально определяемый безразмерный коэффициент учёта нестационарного режима фильтрации воды в пласте 5, изменяющийся по

экспериментальным данным от 10^2 в слабонапорных пластах до 10^6 в высоконапорных пластах.

Отвод воды из скважин 4 можно осуществлять как путём откачки её на поверхность, так и путём подачи воды в пласт 5 за пределы участка 8 осушения.

После осушения участка 8 и оттеснения воды за его пределы закрывают задвижки 6 на скважинах 4 и подачу воздуха в скважины 2 ведут под постоянным давлением, равным давлению оттеснённой воды в пласте 5 за пределами участка 8 осушения, препятствуя этим поступлению воды к участку осушения.

Импульсный режим подачи воздуха интенсифицирует процесс оттеснения подземных вод на участке осушения пласта, повышает дебит водоотводящих скважин 4 и сокращает длительность осушения, при натурных испытаниях способа длительность осушения составила 5 сут, тогда как без импульсной подачи воздуха длительность осушения достигала 48 сут.

Для осушения сжатым воздухом водоносного пласта со свободной поверхностью подземных вод разработан вариант подачи на свободную поверхность воздуха с отрицательной температурой [55]. В результате на свободной поверхности создаётся непроницаемый экран 9, и затем в том или ином режиме в обводнённые породы нагнетается сжатый воздух с положительной температурой и происходит оттеснение воды в дренажные скважины (рис. 3.22, 3.23).

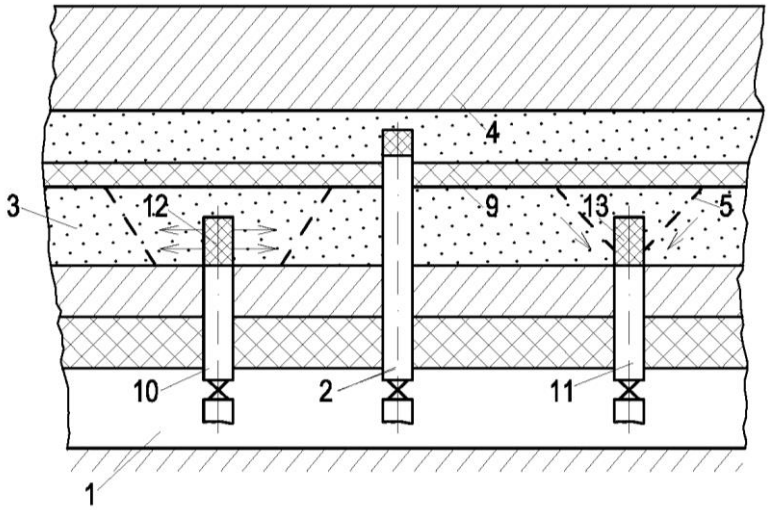


Рис. 3.22. Образование ледопородного экрана и нагнетание воздуха для осушения пласта

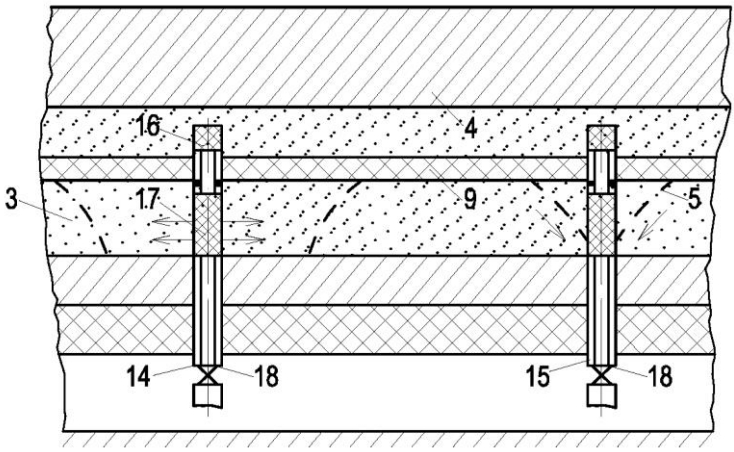


Рис. 3.23. Комбинированные скважины для образования ледопородного экрана и осушения пласта

Проработан также вариант защиты горной выработки от притоков подземных вод подачей воздуха с отрицательной температурой в зону контакта осушенных и водонасыщенных пород [56]. Предлагается сооружение ряда дренажных и 2-х рядов воздухонагнетательных скважин после осушения пород, прилегающих к защищаемой горной выработке, на поверхность депрессионной кривой подаётся хладоагент для образования ледопородного непроницаемого барьера (рис. 3.24 - 3.26).

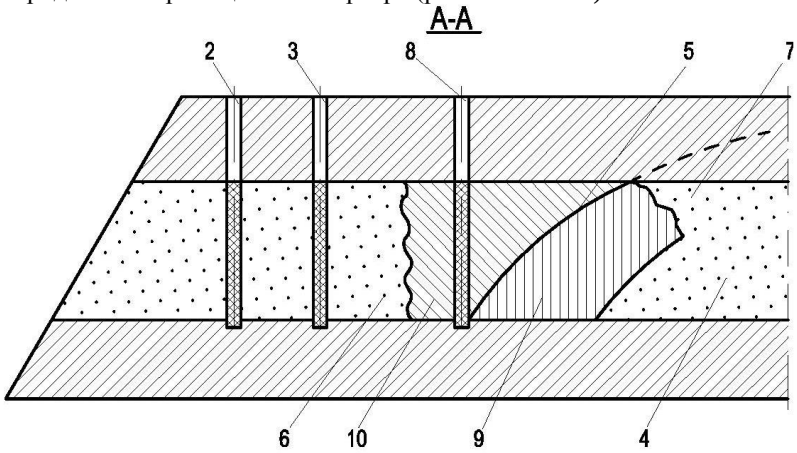


Рис. 3.24. Ледопородная завеса в разрезе

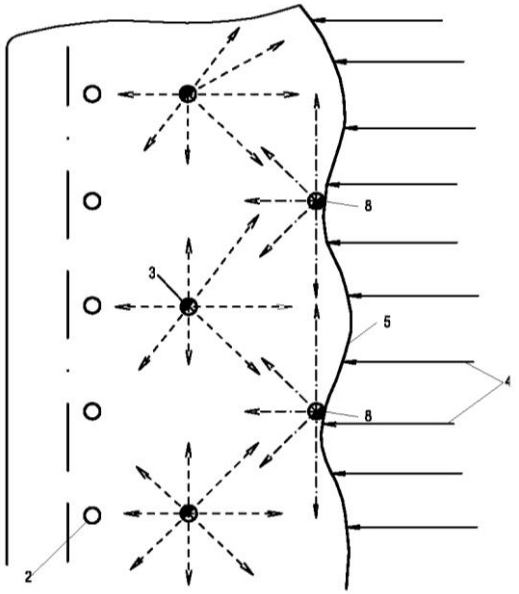


Рис. 3.25. Создание ледопородной завесы и осушение пласта

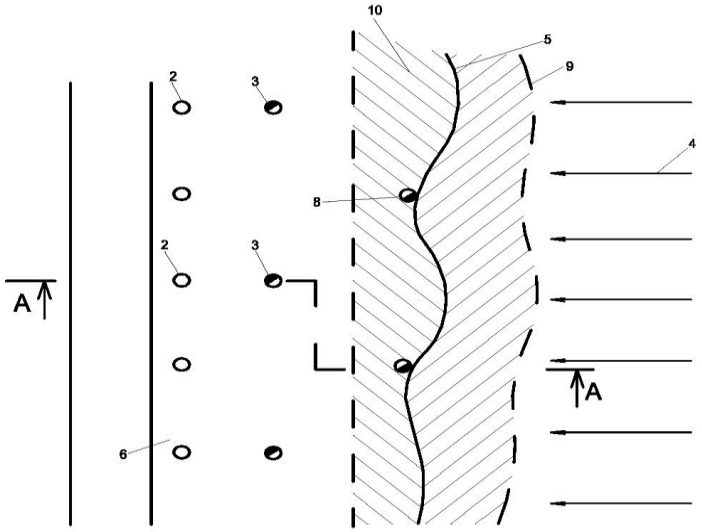


Рис. 3.26. Ледопородная завеса на контакте осушенных и обводнённых пород

3.4.5. Технология осушения – водоснабжения

Весьма заманчивой и технологически слабо проработанной является технология объединения системы осушения и водозабора подземных вод. Технология осушения в общем случае предполагает сооружение дренажной системы и снижение уровней подземных вод. Такая же технология используется и при водоснабжении (сооружение водозабора и снижение уровня подземных вод). Различие существует лишь в структуре системы осушения и водозабора, а также в определении основных критериев процессов. Структура системы осушения в конкретных гидрогеологических условиях предполагает существование внутреннего и внешнего дренажных контуров и првязана к горной выработке. Внутренний дренажный контур располагается на уступах борта карьера и предназначен для приёма подземных вод, попадающих непосредственно в зону ведения горных или транспортных работ. Внешний дренажный контур сооружается на некотором расстоянии от горной выработки, предназначается для перехвата основной доли водопритока (до 80—90 %) и состоит из дренажных скважин разного назначения (водопонизительных, поглощающих, восстающих и др.).

Водозаборы подземных вод в большинстве случаев по своей структуре аналогичны внешнему дренажному контуру системы осушения, поэтому водоприток к нему представляет наибольший интерес для решения задачи рационального использования подземных вод. Для целей водоснабжения оцениваются эксплуатационные запасы и технические условия откачки подземных вод. Они характеризуются системой критериальных условий и аналитических зависимостей [60].

$$Q_в \le Q_{max} \le Q_n,\ S \le S_д,\ t = T_p; \qquad (3.16)$$

$$F_в \le F_r,\ C_i \le C_{in},\ M \le M_д; \qquad (3.17)$$

$$Q_в = f(S, T, n, \sigma, d); \qquad (3.18)$$

$$S_д = f(H, m, \Delta h), \qquad (3.19)$$

где $Q_в$ — производительность водозабора;

Q_{max} — максимально возможная производительность, которая может быть гарантирована в течение расчётного времени T;

Q_n — заданная потребность в воде;

S и $S_д$ — наблюдаемое и допустимое понижения уровня на водозаборе;

t — время работы водозабора;

$F_в$ и F_r — существующая и отводимая площадь под водозабор;

C_i и C_{in} — наблюдаемая и предельно допустимая концентрация

отдельных компонентов в воде;

M *и* $M_д$ — наблюдаемая и допустимая минерализация подземных вод;

T — параметр пласта;

n — количество скважин в водозаборе;

σ— расстояние между скважинами;

d — диаметр скважин;

H, m — напор и мощность водоносного горизонта;

Δh — потери напора в скважине.

Осушение месторождения обеспечивает безопасную и производительную работу горно-транспортного оборудования, которая достигается за счёт ведения работ по осушенным породам и отсутствия деформаций на бортах карьера. Критерии процесса осушения представлены в работе [61]. Рассмотрение их совместно с описанными в формулах (3.16) - (3.19) условиями позволяет записать выражения

$$Q_в = Q_о,\ S \geq S_к; \tag{3.20}$$

$$q \leq q_д,\ t = t_э; \tag{3.21}$$

$$C_i \leq C_{in},\ M \leq M_д; \tag{3.22}$$

$$Q_о = f(S_к, T, n, \sigma, d); \tag{3.23}$$

$$S_к = f(H, m, L, \Delta h); \tag{3.24}$$

$$q_д = f(S_к, L, T), \tag{3.25}$$

где $Q_о$ — производительность внешнего дренажного контура системы осушения;

S и $S_к$ — наблюдаемое и требуемое понижение уровня подземных вод;

q и $q_д$ — наблюдаемый и допустимый водоприток на борт карьера;

$t_э$ — время эксплуатации системы осушения;

L — геометрические характеристики системы осушения и карьера.

Анализ зависимостей (3.20) - (3.25) показывает, что в общем случае производительность системы осушения не будет равна заданной потребности в воде ($Q_о \neq Q_П$). Допустимое понижение уровня также не равно требуемому ($S_д \neq S_к$). Поиск оптимального варианта выполняется за счёт варьирования различными параметрами дренажной системы ($S_к$ n, σ, d, $q_д$, L) при наиболее полном учёте гидрогеологических условий и технологической обстановки на карьере [62]. Если $Q_о < Q_П$, то может быть увеличено значение $S_к$, что логически не противоречит цели осушения и наиболее просто выполняется при неизменном положении в пространстве дренажного контура. Технически данный приём не всегда осуществим, и тогда следует рассмотреть вариант с перемещением дренажных устройств. В этом случае условие 5 автоматически

возрастает и при наличии близко расположенной области питания существенно повышается производительность дренажного контура. Возможны и другие варианты. Использование скважин с повышенной водозахватной способностью также приводит к росту водоотбора.

При условии $Q_o > Q_П$ необходим поиск решений, позволяющих уменьшить это неравенство. Оптимальный вариант, очевидно, будет рассчитан при получении излишков воды и их утилизации. В целом оптимизация задачи по расчёту системы осушения производится при несбалансированности, т. е. когда $(Q_o \neq Q_П)$, с учётом дефицита воды или её излишков при соответствующих мероприятиях по преодолению возникающих трудностей. При выборе оптимального варианта изменение параметров системы осушения следует увязывать с технологией ведения горных работ и общими гидрогеологическими условиями. Увеличение расстояния от контура расположения скважин до бровки карьера целесообразно выполнять на временных участках системы осушения (в пределах рабочего борта карьера) или между областью питания и карьером. На нерабочем борту, где дренажный контур закрепляется жёстко, перспективным является использование скважин с повышенной водозахватной способностью, а внутри карьера — горизонтальных скважин, позволяющих свести к минимуму загрязнение подземных вод.

Существенные изменения в технологию и схему осушения вносят требования выполнения критериев, связанных с обеспечением государственного стандарта по качеству вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Критерии такого рода при проектировании и сооружении систем осушения в настоящее время не применяются. Необходимость введения этих критериев заключается в совместном функционировании в пределах ограниченной территории мощного горнодобывающего и обогатительного производства и водозаборов подземных вод. Приложение физико-химических закономерностей гидродинамики к расчёту дренажных систем вносит новые аспекты в выбор технологии и схемы осушения. Должны быть исключены процессы смешения качественных и некачественных подземных вод, учтено появление источников загрязнения, рассчитаны величины миграции вредных компонентов, обоснованы зоны санитарной охраны.

Предлагаемый подход был реализован при разработке схемы и технологии осушения Приоскольского месторождения КМА. Для расчётов использовалась методика, изложенная в работе [63].

В водоносном пласте 1 за пределами контура 2 горной выработки 3 сооружают дренажные скважины 4, располагая их по контуру 5. 9 (рис. 3.27).

Скважины 4 оснащают средствами откачки, соединяют отводящим коллектором 6, проложенным к потребителю 7 и ведут откачку подземных

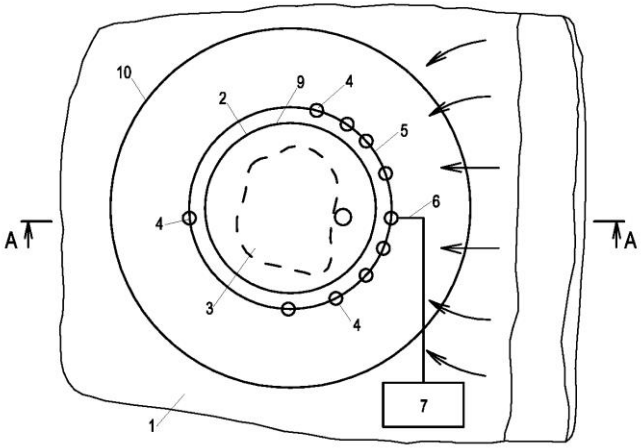


Рис.3.27. Схема системы осушения-водоснабжения

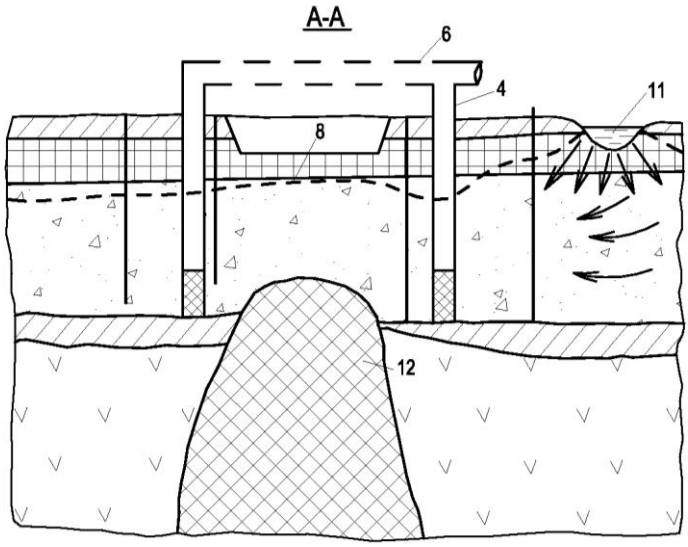


Рис 3.28. Схематичный разрез системы осушения-водозабора на период строительства карьера

вод из скважин 4 с понижением уровня 8 подземных вод (рис. 3.28). При проходке горной выработки 3 на полную глубину водоносного пласта 1 в выработку 3 поступает остаточный приток подземных вод, допустимую

величину которого определяют по условиям устойчивости бортов и уступов выработки 3 и условиям ведения горных работ. Остаточный приток подземных вод в выработку 3 обуславливает направление потока к выработке и предотвращает поступление к скважинам 4 воды, загрязняемой при проведении работ в выработке 3. Воду, откачиваемую из скважин 4, используют для водоснабжения потребителя 7, а воду, откачиваемую из выработки 3, направляют на сброс или очистку.

Контур 5, по которому размещают дренажные скважины 4, располагают между границами 9 и 10 зоны совмещения осушения и водоснабжения (см.рис. 3.27).

Для определения границ 9 и 10 рассчитывают фильтрационное сопротивление Φ_2 водоносного пласта 1 между контуром скважин 5 и контуром 2 выработки по зависимости

$$0{,}5[\Phi + \Phi_к - \sqrt{(\Phi - \Phi_к)^2 - 4\Phi_с(\Phi_п - \Phi)}\ ] \le \Phi_2 \le 0{,}5[\Phi + \Phi_к + \sqrt{(\Phi - \Phi_к)^2 - 4\Phi_с(\Phi_п - \Phi)}\ ], \quad (3.26)$$

где Φ - фильтрационное сопротивление водоносного пласта 1 между областью 11 его питания и контуром выработки 3;

$\Phi_п = \dfrac{H_п - H_к}{Q_о}$ - технологический параметр, характеризующий фильтрационное сопротивление между областью 11 питания и контуром выработки;

$\Phi_к = \dfrac{H_с - H_к}{Q_о}$ - технологический параметр, характеризующий фильтрационное сопротивление между контурами скважин 4 и выработки 3;

$\Phi_с$ – дополнительное фильтрационное сопротивление дренажных скважин 4 (рис. 3.29).

Расстояния r_i от контура 2 выработки 3 до границ 9 и 10 определяют, например, по зависимости

$$r_i = \Phi_2 Lkm \quad (3.27)$$

или другой известной формуле фильтрационного сопротивления.

Затем определяют расход воды Q, удовлетворяющий требованиям осушения и водоснабжения, по зависимости

$$Q = Q_0 \frac{\Phi_2\Phi_п - \Phi\Phi_к}{\Phi_2(\Phi - \Phi_2) + \Phi\Phi_с}, \quad (3.28)$$

где Q_0 – допустимый водоприток в выработку 3.

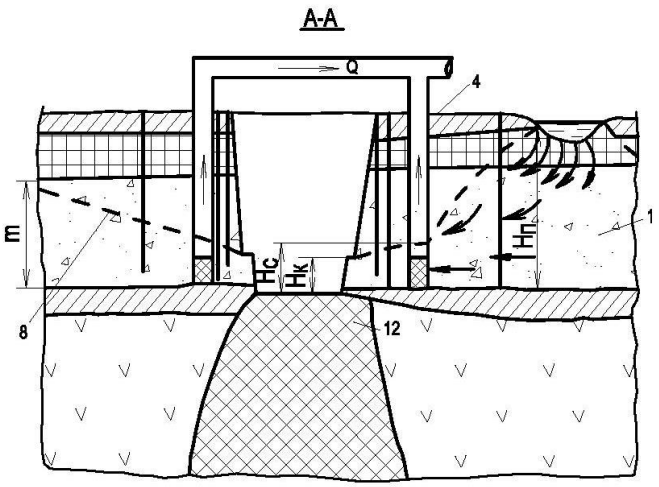


Рис.3.29. Схема системы осушения-водозабора на период эксплуатации карьера

Гидрогеологические условия Приоскольского месторождения являются типичными для КМА [64] и характеризуются наличием шести водоносных горизонтов [65,66], (рисунок 3.30, табл. 3.11). Все водоносные горизонты содержат воду хорошего качества и интенсивно используются для питьевого и хозяйственного водоснабжения района. Основное значение в обводнённости Приоскольского месторождения принадлежит коньяк-туронскому, альб-сеноманскому, девонскому и архей-протерозойскому водоносным горизонтам. Они обладают хорошими запасами подземных вод, имеют высокие фильтрационные свойства, находятся во взаимосвязи между собой и с поверхностными водами.

Активная гидравлическая связь отмечается между коньяк-туронским и альб-сеноманским водоносными горизонтами, образующими надъюрский водоносный комплекс, который гидравлически связан с р. Оскол. Река, являющаяся в настоящее время областью разгрузки, при водопонижении на Приоскольском месторождении превратится в источник питания водоносных горизонтов, что приведёт к увеличению водопритоков на 30-40 %. Следует указать также на отсутствие выдержанного водоупора между девонским и архей-протерозойским горизонтами, что сильно влияет на обводнённость рудной залежи. Менее изученным является характер фильтрации через слабопроницаемые юрские глины, которые выступают в качестве регионального водоупора. Имеющиеся данные свидетельствуют о возможности перетекания через них.

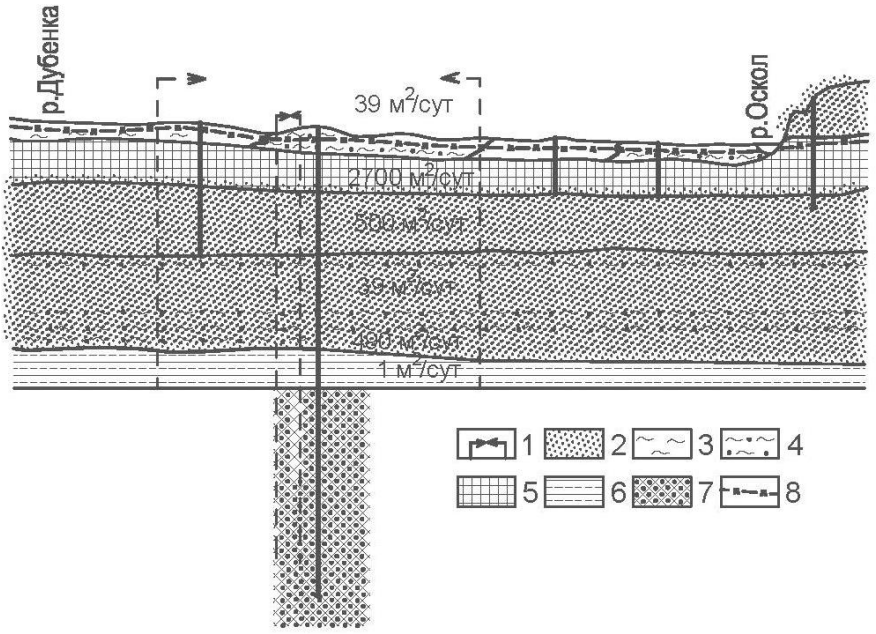


Рис.3.30. Схематический гидрогеологический разрез Приоскольского железорудного месторождения:

1 – контур карьера на уровне поверхности и дна; 2 – пески (K_1al-c); 3 – глины (Q); 4 – глины с прослоями песков (I_{2-3}); 5 – мел (K_2cn-t); 6 – сланцы (AR-PR); 7 – железистые кварциты; 8 – уровень подземных вод надъюрского водоносного комплекса

Рассматривались разные способы (табл. 3.12) и девять вариантов систем осушения. При всех способах система осушения состояла из внутреннего и внешнего дренажных контуров. Внутренний контур (одинаковый во всех вариантах) представлял собой комбинацию горизонтальных дрен и скважин, иглофильтровых установок, размещаемых на различных уступах бортов карьера. Внешний дренажный контур при поверхностном способе осушения месторождения состоял из кольцевой системы водопонижающих скважин, располагаемых по периметру карьера. При комбинированном способе осушения внешний контур был представлен сквозными фильтрами и восстающими скважинами с подземным дренажным штреком, сооружённым вокруг карьера. В рассмотренных вариантах изменения вносились только на внешнем дренажном контуре, расположенном на расстоянии 100—500 м от борта карьера и р. Оскол. Интервал между скважинами изменялся от 27 до 40

м на восточном борту карьера (со стороны р. Оскол) и от 40 до 53 м на северном, западном и южном бортах. Изучались также варианты, когда система осушения состояла из восстающих скважин с подземным дренажным штреком на восточном борту и из водопонижающих скважин на остальной части по периметру карьера.

Таблица 3.11 – Параметры водоносных горизонтов Приоскольского месторождения

Водоносный горизонт	Глубина залегания, м	Напор над подошвой, м	Водоупор и его мощность, м	Условия питания	Область разгрузки	Водопроводимость, $м^2$/сут.	Гравитационная водоотдача, доли ед.	Коэффициент уровнепроводности, $м^2$/сут	Распространение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Алювиальный	0	0-8	-	Атм.осадки, поверхностные воды	Р.Оскол, Руч. Дубянка	54	-	$1 \cdot 10^3$	Локальное
Коньяк-туронский	5,5-13,5	22-25	Пески с желвакам и фосфоритов, 2-9	Атм.осадки, паводковые воды	То же	До 4000	0,005	$4 \cdot 10^3$	Повсеместное
Альб-сеноманский	23-35	50-60	Юрские глины, 0-22	То же	»	До 500	0,015	$4 \cdot 10^3$	То же
Юрский	52-67	71-91	Юрские глины	Перетекание	Вышележащие вод. горизонты	39	-	-	Локальное
Девонский	91-97	109	Сланцы, граниты	То же	То же	490	-	-	То же
Архей-протерозойский	780114,5	-	-	“	“	До 55	-	-	Повсеместно

Таблица 3.12 – Варианты системы осушения Приоскольского карьера

Способ осушения	Схема системы осушения	Внешний дренажный контур	Внутренний дренажный контур на борту карьера	
			рабочем	нерабочем
Поверхностный	Двухконтурная	Водопонижающие скважины с увеличенным радиусом гравийной обсыпки; водопонижающие скважины большого диаметра с гравийной обсыпкой и антикоррозийным фильтром	Открытые прибортовые дрены; узкотраншейные дрены; горизонтальные скважины, игло-фильтры	Закрытые прибортовые дрены, горизонтальные скважины, фильтрующие пригрузки
Комбинированный	Та же	Водопонижающие скважины большого диаметра; дренажный штрек со сквозными фильтрами и восстающими скважинами	То же	То же

Система критериев, описанных формулами (3.20) - (3.25), была сформулирована на основании расчётов и опытных данных по разработке Лебединского и Стойленского месторождений. Заданная потребность в воде была определена в 9000 м^3/ч. Остаточный напор h_o на линии дренажного контура принимался равным 12-15 м, что являлось основанием для расчёта $S_к=H_c - h_o$ где H - статический уровень. Допустимый водоприток на единицу длины борта карьера составлял 0,2-0,3 м^3/ч без использования фильтрующей пригрузки и 0,5-0,8 м^3/ч при её наличии. Критерий, выраженный уравнением (3.22), оценивался по повышению концентрации условного компонента в откачиваемой воде в результате притока от потенциального источника загрязнения (хвостохранилища).

Выполненные расчёты показали, что из девяти вариантов критерию по формуле (3.20) не удовлетворяло три, критериям по формулам (3.21) и (3.22) - четыре. Из оставшихся вариантов с учётом надёжности системы осушения наиболее перспективной является схема (Q=9700 м^3/ч), когда на восточном борту карьера осушение производится восстающими скважинами (150 шт.) из подземного дренажного штрека, располагаемого на расстоянии 200 м от бровки карьера, а на остальной части - водопонижающими скважинами (150 шт.), сооружаемыми с поверхности. Водопонижающие скважины

располагаются по линии, максимальное удаление которой от карьера составляет 100 м. В целом дренажный контур представляет собой овал неправильной формы. В показатель надёжности системы осушения при таком подходе должны входить решения по санитарной охране подземных вод. Основные принципы организации зон санитарной охраны для систем осушения остаются такими же, как и для водозаборов подземных вод. Эти принципы выполнимы в конкретном примере осушения Приоскольского железорудного месторождения.

Оценочные технико-экономические расчёты показали, что предлагаемое направление развития технологии осушения экономически целесообразно за счёт создания безотходного производства и позволяет сделать вывод о возможности его использования на месторождениях твёрдых полезных ископаемых.

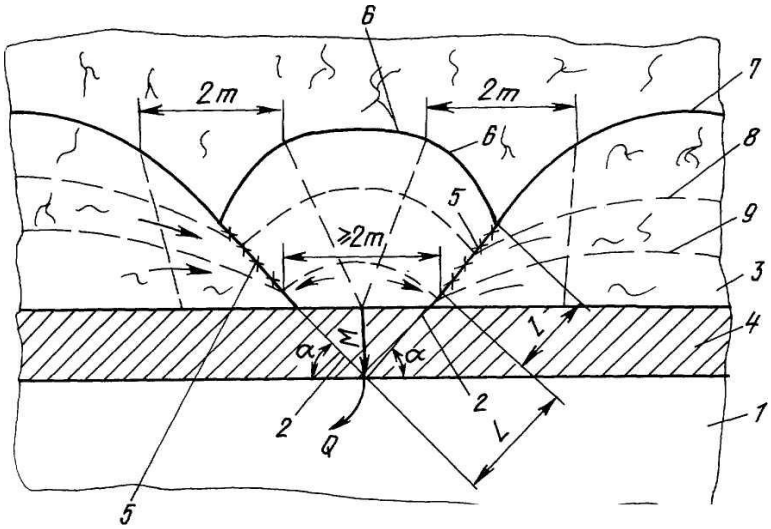
3.4.6. Технологические приёмы в увязке с гидродинамикой потока

Гидродинамика потока подземных вод влияет на структуру системы осушения. Влияние связано с тем, что при использовании в системе осушения таких дренажных устройств, как водопонижающие, восстающие, водопоглощающие, горизонтальные скважины, необходимо учитывать эффект взаимного влияния скважин. При небольшом расстоянии между ними водозахватная способность скважины может существенно превышать величину притока, что соответственно снижает её эффективность. Значительное увеличение расстояния между скважинами приводит к росту проскока подземных вод к защищаемой горной выработке.

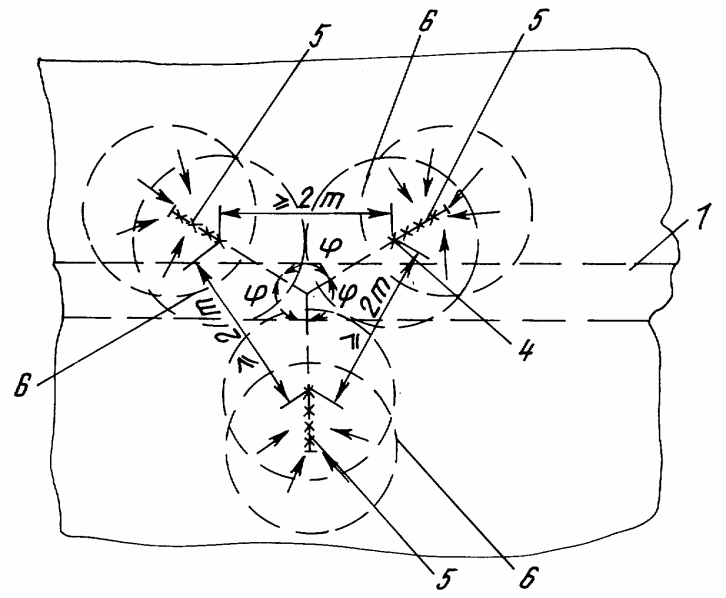
Повышение эффективности осушения за счёт уменьшения степени взаимодействия дренажных скважин и сокращение затрат на их сооружение - одна из задач, которую рассматривают специалисты и проектировщики при выборе структуры дренажной системы с учётом заданных критериев осушения. Подобная задача с методикой её решения рассмотрена на примере расчёта вариантов расположения восстающих скважин из подземного дренажного штрека [67].

Из горной выработки 1 сооружаются наклонные восстающие дренажные скважины 2, размещаемые в виде расходящихся по сторонам от выработки пучков. Скважины 2 заглубляют в пласт 3 водосодержащих пород, отделённый от выработки 1 водоупорным слоем 4, и оборудуют их в пласте 3 фильтрующими водоприёмными частями 5 (рис. 3.31).

Для определения рационального расположения скважин 2 расчётным путём или с помощью моделирования находят количество скважин в каждом пучке, радиус m зоны 6 резкой деформации потока подземных вод вокруг каждой скважины 2, расстояние M по вертикали от нижней кромки



а)



б)

Рис 3.31. Схема сооружения пучка восстающих скважин:
а - в разрезе; б – в плане

водоприёмной части 5 до устья скважин 2, угол φ между проекциями осей скважин 2 на горизонтальную плоскость. Для размещения скважин с учётом зоны резкой деформации потока подземных вод, уменьшения их взаимного влияния и неоптимального перехвата части потока определяют угол α наклона скважин 2 к горизонту по зависимости

$$\alpha \le arctg \frac{m}{M \sin \varphi / 2}.,$$

где m — радиус зоны резкой деформации потока подземных вод;

M — расстояние по вертикали от устья дренажной скважины до нижней кромки её водоприёмной части;

φ — угол между проекциями осей скважин на горизонтальную плоскость, град.

Скважины сооружают под этим углом и добиваются рационального распределения потока подземных вод в пучке скважин.

При сооружении нескольких пучков скважин 2 вдоль горной выработки 1 и при нечётном количестве скважин 2 в каждом пучке их размещают с последовательным чередованием чётного и нечётного количества по сторонам от оси выработки 1. Этим достигается равномерное вдоль выработки расположение скважин 2 и равномерное осушение пласта 5 (рис.3.32).

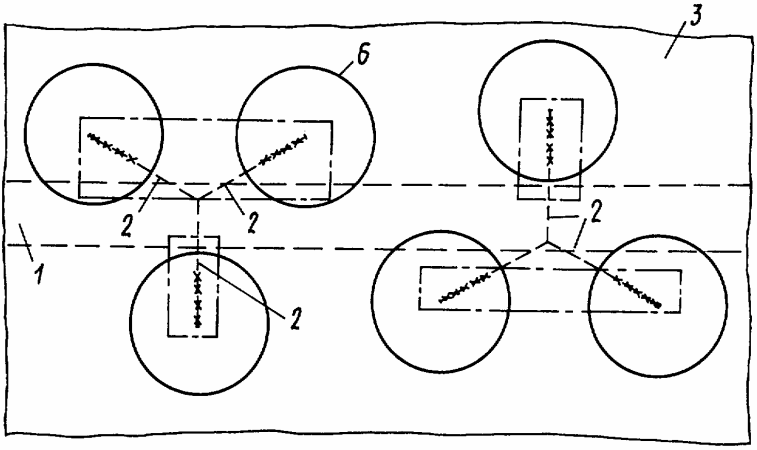


Рис. 3.32. Размещение пучков скважин вдоль горной выработки

После сооружения скважин 2 из них ведут отбор воды, в результате чего в пласте 3 происходит понижение уровня подземных вод от положения 7

последовательно до положений 8, 9. При этом зоны 6 резкой деформации потока подземных вод у соседних скважин 2 не перекрывают одна другую, что обеспечивает эффективную работу каждой скважины 2.

Раздельный отбор подземных вод с естественным химическим составом и привнесёнными компонентами из зоны ведения горных работ может быть реализован с использованием технологии, приведенной в работе [68]. Для защиты горной выработки определяют положение, а затем сооружают дренажную скважину 4, которую в зоне водоносного пласта оборудуют фильтром с гравийной обсыпкой, образующим её водоприёмную часть. Скважину оборудуют насосом, с помощью которого производят откачку подземных вод. Часть 10 подземных вод этого потока уходит к скважине 4 и откачивается насосом на поверхность. Часть 11 потока 3 проскакивает скважину 4. Между 10 и 11 образуется нейтральная линия 12, которая ограничивает зону 13 воды с естественным составом (рис. 3.33). Из этой зоны с помощью скважины откачивают воду с естественным природным химическим составом. Положение нейтральной линии 12 устанавливают или моделированием, или аналитическими расчётами. Определяют расстояние *Xp* от точки *«E»* расположения водоприёмного участка скважин 4 до водораздельной точки *N* нейтральной линии 12. Расстояние *Xp* должно быть меньше расстояния *L* от точки *«E»* до границы 14 участка 2 ведения горных работ, *Xp* <*L*.

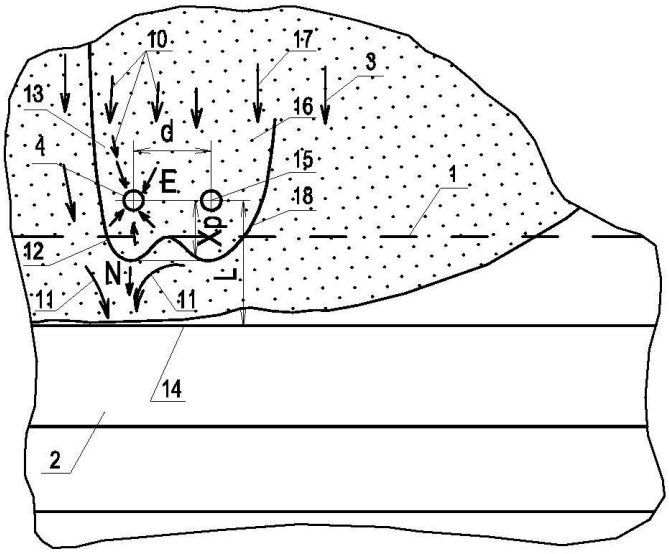


Рис. 3.33. Отбор подземной воды из скважины
и образование зоны захвата потока

После установления положения нейтральной линии 12 и расстояния *d* между скважинами 4 и 15 определяют угол α смещения скважины 19 относительно этих скважин и смещают её по потоку вод, в направлении границы 14 участка ведения горных работ (рис.3.34). Угол α определяют по зависимости (3.19). Физические предпосылки для получения зависимости (3.19) следующие. Расположение скважины, смещённой к границе 14, должно быть указано с изменённой под влиянием скважин 4 и 15 структурой потока 3 подземных вод. При расположении скважин 19 следует учесть также границы участка ведения горных работ и выполнить увязку местоположения скважины с этими границами. Исходя из этих предпосылок, определим основные параметры, для обоснования зависимости по оценке угла смещения.

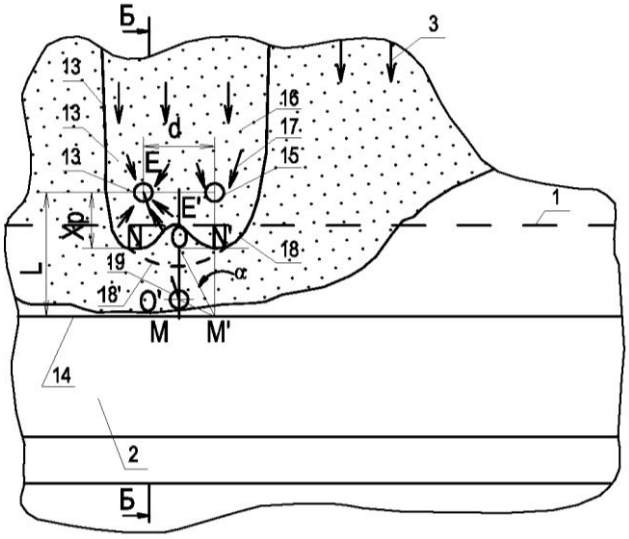


Рис. 3.34. Отбор воды и формирование зоны захвата при взаимодействии 2-х скважин

При работе дренажных скважин 4 и 15 меньшая часть потока 3 подземных вод просачивается за дренажный контур 1 и устремляется на участок 2 ведения горных работ. Для перехвата этой части потока подземных вод следует соорудить ряд дренажных скважин, установленных по потоку и расположенных между скважинами 4 и 15. Скважину 19 располагают вблизи границы 14 (см. рис. 3.34). Для определения местоположения дренажной

скважины 19 используют величины *L* и *Xp*, причем при условии *L>Xp*. Кроме того, местоположение скважины 19 должно быть регулируемым для обеспечения благоприятных условий ведения горных работ. Этого достигают путём изменения положения скважины 19 на отрезке длиной, равной (L-Xp). Поэтому следует предусмотреть возможность изменения угла смещения для приближения скважины 19 к границе 14. Приближение скважины 19 к границе 14 обеспечивает повышение эффективности перехвата потока подземных вод. Скважина 19 должна равномерно перехватывать поток подземных вод в однородных породах, что позволяет расположить её на линии *E'M*, которая проходит посередине между скважинами 4 и 15. Отбор воды через скважину, смещенную к границе 14, будет производиться за пределами зоны 13, ограниченной нейтральной линией 12. С некоторым практически важным запасом крайнее положение точки отбора воды через смещённую скважину можно определить как пересечение линии *E'M* с перпендикуляром, опущенным из водораздельной точки *N'*. Таким образом, исходную величину смещения определяют по положению точки *O*, которая образуется при пересечении линии *E'M* и перпендикуляра *N'O*. Для обоснования зависимости, по которой находят угол α смещения скважины 19 в направлении границы 14, имеем параметры *OM=M'N', Xp, M'M=N'O*. Используя эти параметры из треугольника *MN'O*, имеем, что

$$tg\alpha = \frac{N'O}{M'N'}; \qquad (3.19)$$

так как *N'O=d*/2, а *M'N'=L-Xp*, то получаем

$$tg\alpha = \frac{d}{2(L - Xp)} \qquad (3.20)$$

Так как угол α должен позволять смещать скважину по линии *OM* для регулирования количества отбираемой воды, то формулу (3.20) запишем в виде

$$\alpha \geq \text{arctg}\,\frac{d}{2(L - Xp)}. \qquad (3.21)$$

Угол α целесообразно изменять до величины $\frac{\pi}{2}$, что будет соответствовать расположению смещённой скважины на границе 14. Следовательно, окончательно зависимость для определения угла имеет вид:

$$\frac{\pi}{2} > \alpha \geq arctg\,\frac{d}{2(L - Xp)}. \qquad (3.22)$$

После определения угла α по зависимости (3.22) располагают скважину 19 под этим углом, например, в точке *О* и сооружают её. В скважину 19, аналогично со скважиной 4, оборудуют в водоносном пласте водоприёмную часть 20 (рис.3.35). Опускают в неё насос и отбирают воду. Отбор воды через скважину 19 позволяет уменьшить количество подземных вод, попадающих в горную выработку. Вода, перехватываемая скважиной 19, содержит компоненты, которые просачиваются с участка ведения горных работ и достигают уровня подземных вод (рис.3.27). Поэтому производят раздельный отвод воды по второму водоводу. Воду из этого водовода направляют на очистные сооружения или другие устройства для сбора загрязненной воды. При отборе воды через скважину 19 уточняют положение нейтральной линии 12 и контролируют выполнение условия $L>Xp$.

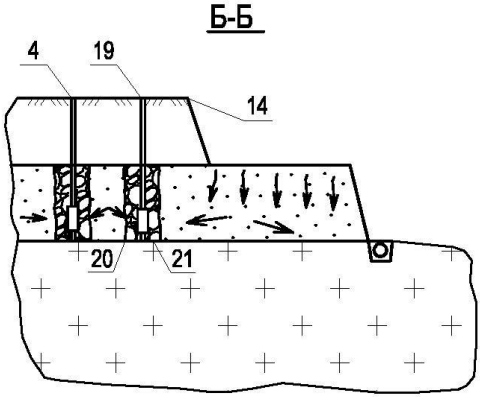


Рис. 3.35. Раздельный отбор подземных вод на участке горной выработки

Последующие скважины сооружают таким же образом, чередуя смещение скважин в сторону против направления потока и по направлению потока подземных вод относительно линии расположения дренажного контура. Скважины, смещённые против направления потока, объединяют одним коллектором и воду из него подают и используют для водоснабжения.

Из остальных скважин, приближённых к участку ведения горных или строительных работ, воду откачивают за пределы нейтральной линии, например, на очистные сооружения. Вариант раздельного отбора подземных вод при подземном способе осушения приведен в работе [2].

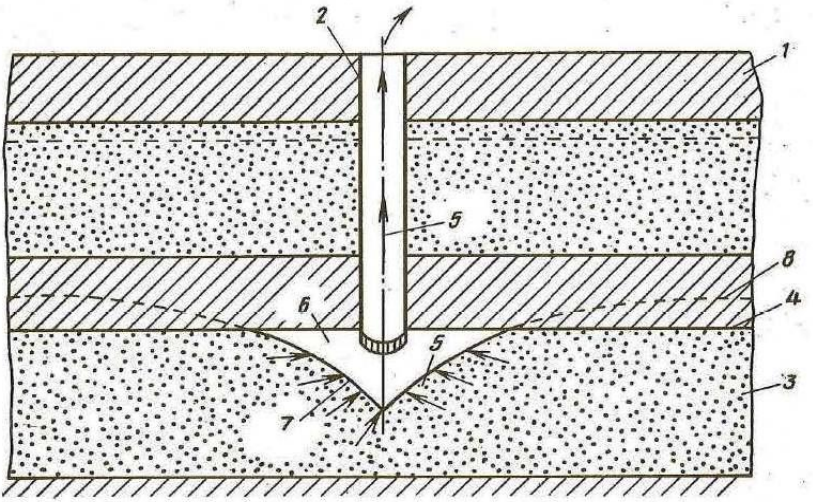
3.4.7. Технологические приёмы повышения водозахватной способности дренажных скважин

Для повышения эффективности осушения многослойной толщи пород с несколькими водоносными горизонтами целесообразно использовать систему, состоящую из поглощающих и водозаборных скважин. Один из вариантов представлен на фрагментарных рисунках 3.36 – 3.38 [69]. Использование данного технологического приёма предполагает сооружение водозаборной скважины 2 с заглублением её в поглощающий водоносный пласт 3 до его кровли 4. Из скважины 2 ведут откачку воды с удалением части грунта 5 и образованием каверны 6 до формирования её устойчивого контура 7. При этом происходит понижение уровня 8 подземных вод. Для увеличения размеров каверны 6 заглубляют водоприёмную часть 9 скважины 2 и вновь ведут откачку воды и грунта 5, при этом каверна 6 формируется до контура 10. Затем в краевую зону каверны 6 сооружают поглощающую скважину 11, которую в вышележащем осушаемом пласте 12 оборудуют фильтром 13 с обсыпкой 14, а в поглощающем пласте 3 – фильтром 15. Вода из пласта 12 через скважину 11 поступает в каверну 6. Одновременно с этим в скважину 11 через воронку 16 подают зернистый материал 17 с плотностью, равной плотности откачиваемой воды. Материал 17 увлекается потоком воды из скважины 11 и распределяется в объёме каверны 6. В процессе откачки воды из скважины 2 зернистый материал 17 заполняет сначала центральную часть, а затем и всю каверну 6. При этом происходит понижение уровня 18 подземных вод в пласте 12.

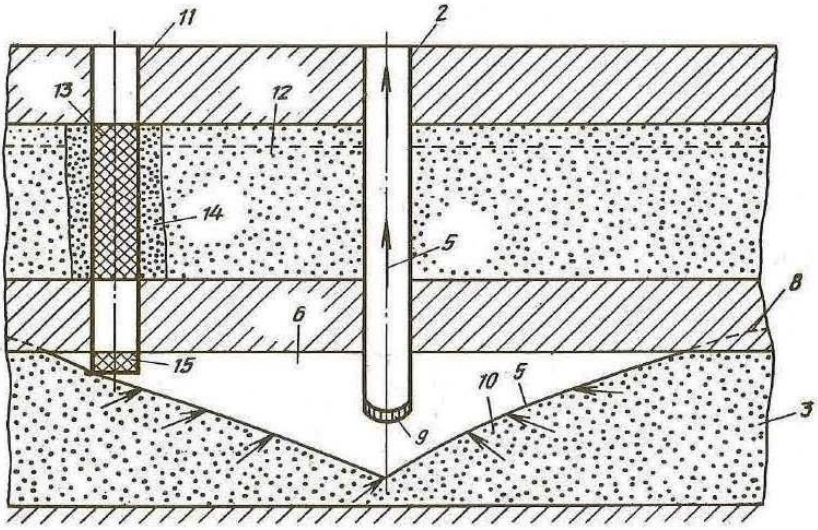
При большой мощности пласта 3 или наличии нескольких водоносных пластов формирование каверны 6 и заполнение её зернистым материалом 17 проводят поинтервально сверху вниз. В каждом цикле заполнения каверны 6 последовательно увеличивают плотность гранул материала 17, что способствует полному заполнению каверны 6, развитию её по глубине пласта 3 и предотвращает развитие каверны 6 по горизонтали.

В качестве зернистого материала 17 можно использовать полувспененный полистирол или другие зернистые вещества, которые позволяют регулировать плотность и размеры гранул, а также обеспечивают очистку воды от примесей.

Благодаря формированию устойчивой каверны, заполненной зернистым фильтрующим материалом, обеспечивается долговременная работоспособность водозаборной скважины, а образование системы поглощающих скважин даёт возможность централизовать откачку подземных вод из одного пласта, что повышает эффективность отбора подземных вод и снижает затраты на её откачку.

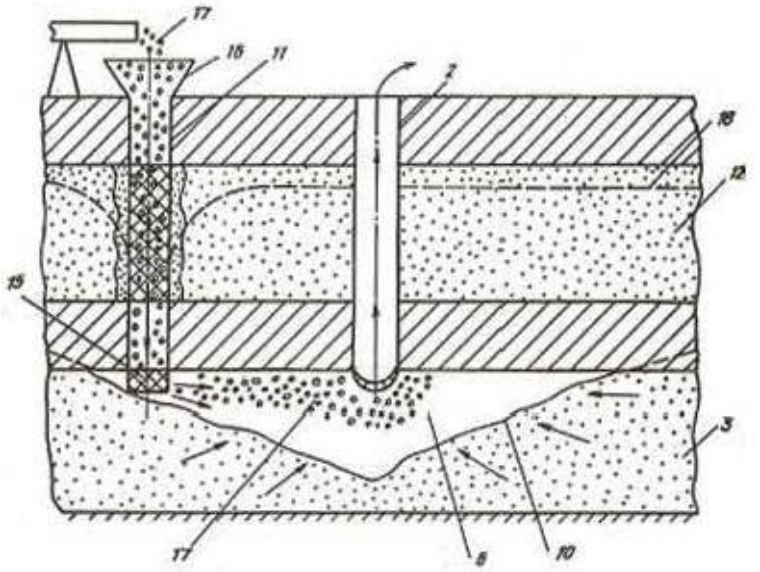


а)

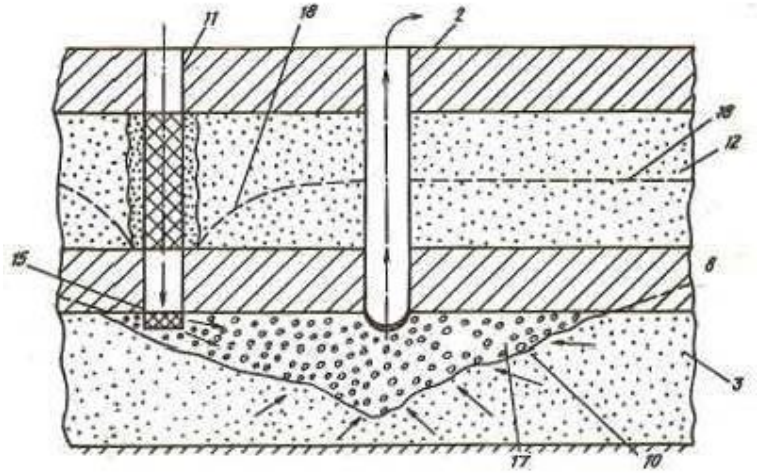


б)

Рис. 3.36. Сооружение водозаборной (а) и поглощающей (б) скважин



а)



б)

Рис. 3.37. Формирование водоприёмной каверны в водозаборной скважине: а) – начальный этап; б) – заключительный

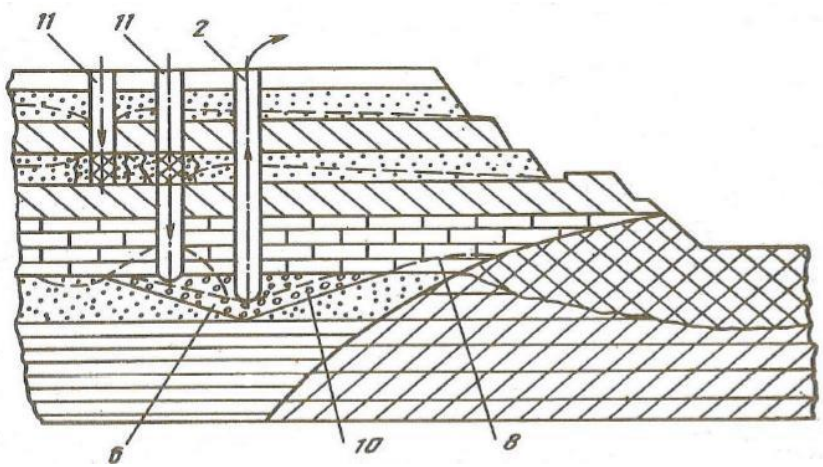


Рис.3.38. Система скважин на борту карьера

Увеличение водозахватной способности скважин связано с выбором конструктивных элементов водоприёмной части и расчётом их параметров в соответствии с водно-физическими свойствами пород, содержащих воду. В частности, эффективным приёмом является значительное снижение сопротивления потоку подземных вод в зоне его наибольшей концентрации, каковой является прифильтровая часть скважины. Для решения этого вопроса в прифильтровой зоне создают гравийную обсыпку, подавая в неё гравий с заданным размером частиц и соответственно с более высокими фильтрационными свойствами и меньшим сопротивлением по сравнению с водоносным пластом. Эффективным является также образование в этой зоне естественной обсыпки при откачке воды с большим, чем эксплуатационный, дебитом и выносом мелких фракций песка из водоносного пласта. В дальнейшем скважина эксплуатируется с расчётным дебитом.

Для восстающих скважин, когда вода отбирается под действием сил гравитации, можно использовать технологию образования в прифильтровой зоне водоприёмной каверны, изложенную в [70]. Последовательность операций предлагается следующая. В массиве горных пород 1 из подземной выработки 2 бурят восстающую скважину 3 с заглублением в подлежащий осушению вышерасположенный песчаный водоносный пласт 4. В скважину 3 устанавливают фильтровую колонну 5 с фильтром 6, запорным устройством 7 и манометром 8. Фильтр 6 размещают в водоносном пласте 4 с расположением верхней кромки фильтра 6 на высоте, равной высоте капиллярного поднятия над подошвой пласта 4 (рис. 3.39). Определяют величину напора подземных вод в фильтровой колонке 5, частично

открывают запорное устройство 7 и производят выпуск воды с понижением напора до величины, не превышающей 10 м вод. ст. над подошвой пласта 4. Затем увеличивают открытие запорного устройства 7 и осуществляют выпуск воды с мелкозернистыми фракциями грунта из пласта 4. Выпуск воды и мелкозернистых фракций грунта ведут при скорости входа воды в отверстия фильтра 6, определяемой по расчётной зависимости

$$V = \frac{a + b(cD^2 + d)}{F\eta},$$

где V - скорость входа воды в отверстия фильтра, м/сут;
F – площадь наружной поверхности фильтра, м^2;
η - скважность фильтра в долях единицы;
D – диаметр отверстий фильтра, м;
a – коэффициент расхода, равный 1,05 – 1,35, м^3/сут;
b – коэффициент пропорциональности, равный 5,83 – 6,37, 1/сут;
c – коэффициент размера, равный 3,77*10^5 – 4,23* 10^5, м;
d - коэффициент размера, равный 1,78 – 2,02 м^3.

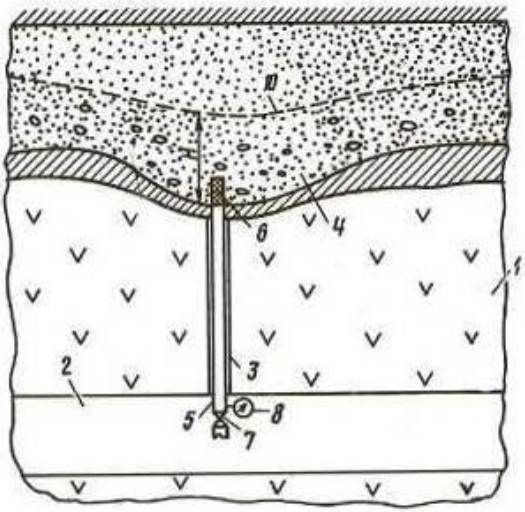


Рис. 3.39. Сооружение восстающей скважины и установка фильтра в водоносном пласте

Величину скорости входа воды в отверстия фильтра 6 контролируют в натуре путём измерения расхода истекающей из фильтровой колоны 5 воды, полученную величину расхода следует разделить на суммарную площадь

отверстий фильтра 6. При несовпадении фактической и расчётной величин скорости с помощью запорного устройства 7 изменяют расход выпуска воды и грунта до совпадения фактической величины скорости с расчётной. После прекращения выноса грунта и сформирования устойчивой каверны 9 продолжают выпуск из фильтровой колонны 5 воды с осушением пласта 4 и понижением уровня подземных вод 10 до минимального положения, характеризуемого высотой капиллярного поднятия, сопротивлением фильтра и прифильтровой зоны.

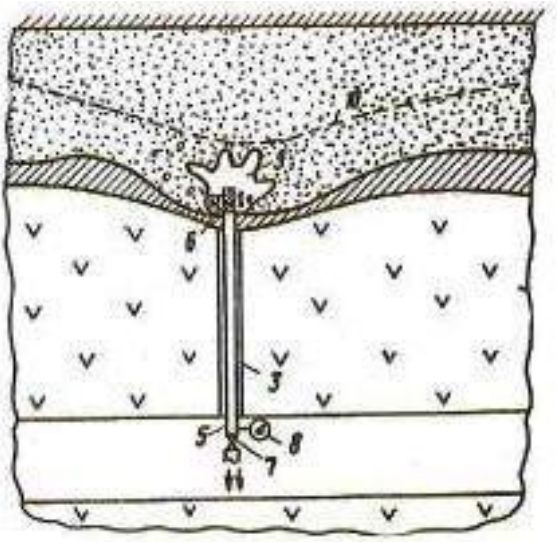
Объём каверны 9 определяют путём измерения количества вынесенного через фильтровую колонну 5 грунта. Для увеличения размеров каверны 9 запорное устройство 7 закрывают на время, достаточное для восстановления напора подземных вод до величины, не превышающей 10 м над подошвой пласта, затем запорное устройство 7 открывают и осуществляют дополнительно выпуск воды и мелкозернистых фракций грунта (рис. 3.40).

Параметры расчётной формулы скорости входа воды в отверстия фильтра установлены экспериментально, они соответствуют условиям формирования устойчивой водоприёмной каверны 9 в водоносных пластах, сложенных плотными и средней плотности мелкозернистыми и пылеватыми песками. Для обеспечения выноса мелкозернистых фракций грунта с диаметром частиц меньше 0,25 мм фильтр 6 выполняют с отверстиями шириной, достаточной для пропуска этих частиц, например, в щелевом фильтре ширина щелей должна быть равна удвоенному диаметру частиц, меньше которого в грунте содержится 70 % фракций.

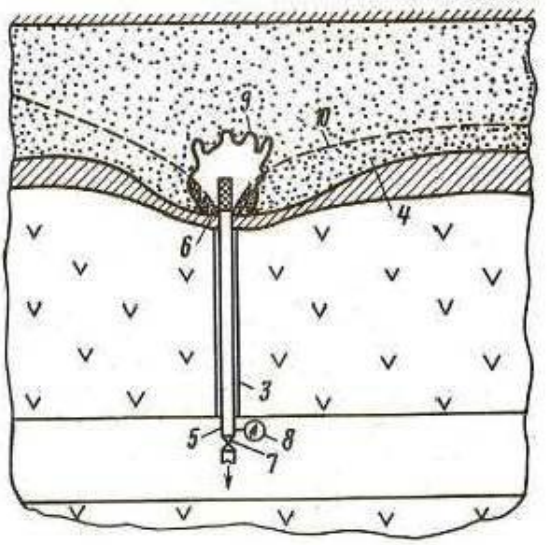
Управление процессом формирования водоприёмной каверны повышается степень её устойчивости. Восстающие скважины с водоприёмной каверной характеризуются высокими дебитами, что увеличивает эффективность осушения пласта и срок их эксплуатации.

3.4.8. Варианты осушения рыхлых неконсолидированных грунтов

Осушение рыхлых неконсолидированных грунтов представляет достаточно сложную задачу. Практически все широко распространённые дренажные устройства оказываются неэффективными. Выполненные в лабораторных условиях опытные работы показали, что эффект осушения неконсолидированных грунтов достигается только при использовании специальных приёмов, основанных на их принудительной консолидации с отводом отжимаемой воды (например, электроосмос, вакуумирование) [51]. Хорошие результаты были получены при создании на поверхности осушаемых грунтов температурного градиента и применении специальных дренажных устройств или приложении на поверхность грунтов



а)



б)

Рис. 3.40. Образование водоприёмной каверны (а)
и осушение водоносного пласта (б)

дополнительной нагрузки и отводом воды через заглубленные дрены. В качестве специальных дренажных устройств использовались геодрены зарубежной конструкции [71] или собственная разработка [72].

Конструктивно и технологически в фильтрационном лотке отработана методика, позволившая оценить возможность осушения пылеватой фракции хвостов из центральной части хвостохранилища Соколово-Сарбайского ГОКА в Республике Казахстан. Используемое дренажное устройство состояло из каркаса 1 и охватывающей его водопроницаемой оболочки 2 (рис. 3.41). Каркас 1 выполнен из пересекающихся полиэтиленовых волокон 3, адгезионно скреплённых между собой в поперечном и продольном направлениях, которые придают ему прочность и пористость 4. Прочностные характеристики каркаса 1 можно изменять за счёт использования полиэтиленовых волокон разной плотности, частоты их наложения и диаметра нитей, увеличивая тем самым сопротивление каркаса на сжатие. Эксперименты показали, что прочность каркаса 1 на сжатие должна, по крайней мере, в 1,2 раза превышать величину наибольшего горного давления. Водопроницаемую оболочку 2 размещают по периметру каркаса 1 и скрепляют на стыке 5 адгезионно, например, водостойким клеем. Оболочку 2 выполняют из материала с величиной пор, близкой к величине пор осушаемого грунта. В качестве материала использовалась бумага, пропитанная составами для повышения устойчивости к размоканию.

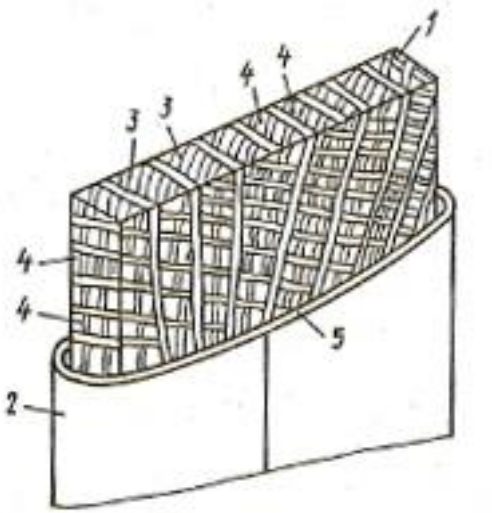


Рис. 3.41. Геодрена для осушения рыхлых неконсолидированных грунтов

Дренажное устройство вводили в неконсолидированный рыхлый слабопроницаемый водоносный грунт на заданную глубину. После этого на поверхность грунта накладывают статическую или динамическую нагрузку, под влиянием которой, а также под действием капиллярных сил вода из грунта отжимается в устройство. Вода проходит через водопроницаемую оболочку 2 и поступает в волокнистый каркас 1 и по нему беспрепятственно отводится за пределы осушаемого участка грунта. Ровная поверхность каркаса 1 обеспечивает надёжное взаимодействие с водопроницаемой оболочкой 2 без создания концентрации напряжений, приводящих к разрыву или недопустимой деформации материала оболочки 2. Упругие свойства каркаса 1 препятствуют его сжатию под влиянием давления со стороны осушаемого грунта. Стабильный контакт каркаса с оболочкой и высокая пористость каркаса в центре повышают эффективность отвода воды. Также проводили опыты, когда на поверхность грунта вместо нагрузки подавался воздух с повышенной температурой. При выступающих над поверхностью осушаемого грунта геодренах интенсифицировался процесс испарения с них. Происходило постоянное подтягивание воды по капиллярам водопроницаемой оболочки вверх из нижних слоёв грунта, что приводило к снижению его влажности.

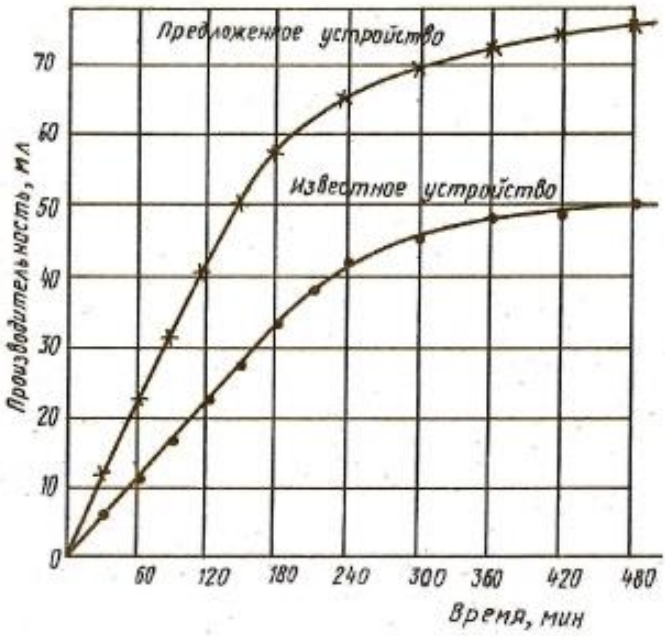


Рис. 3.42. Сравнительные характеристики геодрен

Предлагаемое дренажное устройство испытывалось совместно с устройством известной конструкции, результаты испытаний приведены на графике (рис 3.42), согласно которому предлагаемое устройство имеет производительность в 1,5 раза выше.

Такого типа дренажные устройства повышают надёжность его работы при эксплуатации и улучшают условия отвода воды из осушаемого массива рыхлых грунтов. Его применение наиболее эффективно при осушении неконсолидированных рыхлых грунтов. Установка геодрен в грунт производится с помощью известных машин.

ГЛАВА 4

КЛАССИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОСУШЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Анализ опыта проектирования, строительства горного предприятия и эксплуатации обводнённых месторождений полезных ископаемых на территории бывшего СССР позволяет для краткости изложения рассмотреть несколько объектов, на которых применялись наиболее эффективные технологии при использовании максимально необходимых технологических приёмов и сложных структур дренажных систем.

4.1.Система осушения при подземном способе разработки месторождения

При подземном способе добычи полезного ископаемого система осушения шахтного поля в значительной мере зависит от применяемой технологии ведения добычных работ. В наиболее сложном варианте и технология и структура дренажной системы реализуется при ведении горных работ на добычных горизонтах с обрушением руды и вмещающих пород под водными объектами [73, 74]. Детально теоретические и практические вопросы обоснования систем защиты от обводнения горных выработок при отработке полезного ископаемого под водными объектами изложены в работе [74]. Рассмотрены такие технологические факторы, как образование зон: обрушения, разрывов сплошности и сдвижения горных пород, водопроводящих трещин, проанализированы условия формирования вторичного обводнения горных выработок, изменения геологических свойств обводнённых рыхлых пород и предложены мероприятия по предупреждению прорывов их на участки ведения горных и добычных работ.

Формирование структуры и разработка технологии защиты горных выработок от обводнения рассмотрим на основе обобщения и анализа опыта осушения месторождений Северо-Уральского бокситового бассейна.

Северо-Уральский бокситовый бассейн расположен на территории Нижнее-Тагильского синклинория и находится в пределах Уральской складчатой области, её Предуральского гидрогеологического района. Залежь бокситов приурочена к массиву закарстованных пород, представленных известняками, известняково-глинистыми сланцами (рис.4.1). Подробно природные и геологические условия месторождения изложены в работах [75,76].

Гидрогеологические условия Северо-Уральского бокситового бассейна характеризуются распространением семи водоносных горизонтов. Остановимся на краткой их характеристике.

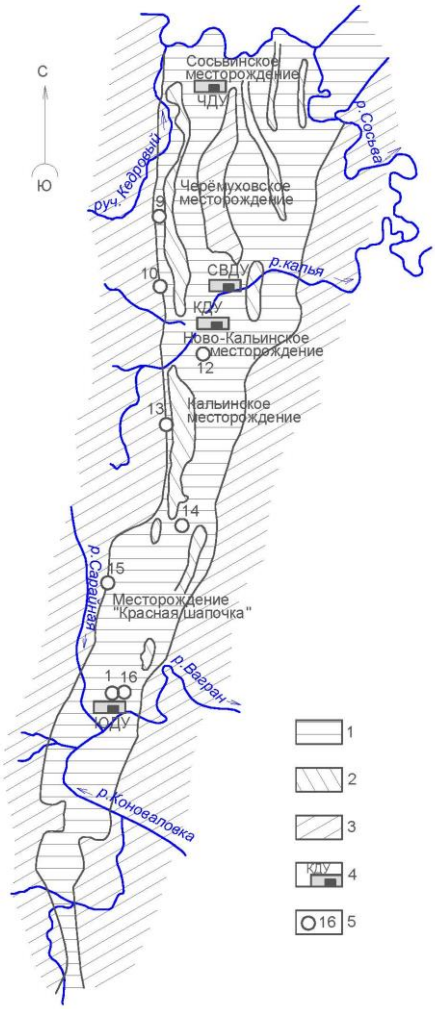


Рис.4.1. Обзорная схема Северо-Уральского бокситового бассейна:
1 – водопроницаемые породы; 2 – слабоводопроницаемые породы (известняки с прослоями глинистых сланцев); 3 – водоупорные породы (глинистые сланцы); 4 – действующие дренажные узлы (КДУ –Кальинский, ЮДУ – Южный, СВДУ – Северо-Восточный, ЧДУ – Черёмуховский); 5 – ствол шахты и её номер.

Два водоносных горизонта, приуроченные к среднедевонским породам черемховской свиты, представлены трещиноватыми известняками. Распространены в восточной части Шегультанской синклинали. Водопроводимость пород изменяется от $(0,2\text{-}2,5)\cdot10^3$ м^2/сут до $(5\text{-}15)\cdot10^3$ м^2/сут, коэффициент уровнепроводности - от $1,5.10^4$ до $7,8\cdot10^6$ м^2/сут.

Два водоносных горизонта вагранской свиты приурочены к различным слоям трещиноватых известняков. Преобладающие значения коэффициентов водопроводимости составляют $(2\text{-}6)\cdot10^3$ м^2/сут, уровнепроводности - $(1,2\text{-}7,6)\cdot10^6$ м^2/сут.

Водоносный горизонт, приуроченный к отложениям петропавловской свиты нижнего девона, представлен известняками, конгломератами, песчаниками, сланцами. Горизонт петропавловской свиты распространён на всей территории бассейна, характеризуется наибольшей неоднородностью и анизотропией водно-физических свойств. Коэффициент фильтрации изменяется от тысячных долей до 1200 м/сут, коэффициент уровнепроводности от 510 до $7,6\cdot10^7$ м^2/сут.

Водоносный горизонт карбонатных пород колонгинской свиты верхнего силура распространён преимущественно в южной части бассейна. Фильтрационные свойства изменяются в широких пределах.

Водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватым известнякам Воскресенской свиты верхнего силура, характеризуется различными фильтрационными свойствами. Водопроводимость достигает 500-1000 м^2/сут. Водоносный горизонт развит на юге Шегультанской синклинали.

Питание водоносных горизонтов осуществляется за счёт атмосферных осадков, перетекания при наличии гидравлической взаимосвязи между отдельными водоносными горизонтами, паводковых вод и вод поверхностных водотоков (река Сосьва, Вагран, Калья, Шегультан и другие).

По особенностям гидродинамического режима на территории Северо-Уральского бокситового бассейна можно выделить три зоны: зона свободного водообмена, зона затруднённого водообмена и зона застойных вод. Зона свободного водообмена имеет мощность от 70 до 750 м. Природными и техническими факторами, которые в наибольшей степени влияют на освоение рудных залежей в этой зоне, являются: гидравлическая связь подземных и поверхностных вод, которая обусловливает величины водопритоков до 70000 м^3/ч; залегание водоносных пластов, которое обусловливает формирование региональной депрессионной воронки подземных вод; рост водопритока в зависимости от увеличения площади ведения горных работ; большие запасы подземных вод; интенсивное поступление воды в горные выработки в течение длительного времени.

Зона затруднённого водообмена имеет мощность до 1200 м. На обводнённость горных выработок при освоении рудных залежей влияют

следующие факторы: быстрая стабилизация водопритоков; распространение и залегание водоносных горизонтов, которые обусловливают формирование локальных депрессионных воронок; статические запасы водоносных горизонтов, которые определяют величины и продолжительность водопритоков. В этой зоне наблюдается постепенное уменьшение водопритоков в горно-капитальные выработки и усиление обводнённости очистных выработок. Число обводнённых блоков на руднике возросло с 15,5 % в 1967 году до 20.7 % в 1983 году.

Зона застойных вод расположена в нижней части массивов известняка. Характерным для неё является отсутствие карстовых форм, высокие гидростатические напоры подземных вод и низкие фильтрационные свойства.

В целом водоприток в горные выработки на Северо-Уральском бокситовом руднике образуется за счёт инфильтрации воды из русел рек и атмосферных осадков, сработки статических и динамических запасов, потерь на фильтрацию из хозяйственно-бытовых водоёмов и коммуникаций.

Разработка залежей бокситов на СУБРе производится в сложных условиях, которые характеризуются глубиной ведения горных работ до 1400 м, закарстованностью вмещающих пород, сильной их обводнённостью, большими гидростатическими напорами. В этих условиях подземным способом разрабатывались месторождения "Красная Шапочка", Кальинское, Ново-Кальинское и Черемуховское; открытым способом велась добыча бокситов на Карпинском и Ивдельском месторождениях. При подземном способе добычи бокситов использовались несколько систем разработки (табл.4.1) [77, 78].

Таблица 4.1 - Системы разработки на СУБРе (1983г.)

Система разработки	Удельный вес, %	Производительность труда рабочего в забое, т/смену	Потери, %	Разубоживание, %
С открытым выработанным пространством:				
Этажно-камерная	5	12,0	18,0	6,0
Камерно-столбовая	39	6,4	17,5	6,0
Слоевого обрушения	33	3,8	5,8	4,4
Горизонтальными слоями с закладкой	4	5,3	2,0	3,0
С камерной выемкой и закладкой (в том числе под искусственной кровлей)	19	7-8,5	3,0	до 4,0

При всех системах разработки необходима защита горных выработок от обводнения подземными водами. Требования к системам защиты горных выработок от подземных вод варьируют в зависимости от применяемых систем разработки и расположения рудной залежи в выделенных зонах. В зоне свободного водообмена с учётом указанных ранее особенностей система защиты должна обеспечивать изоляцию основных источников питания подземных вод, перехват потока подземных вод с фланговых участков бассейна, предотвращение обводнения участков сдвижения горных пород, исключение прорывов карстовых вод, обеспечение рационального использования подземных вод.

При перемещении горных работ в зону затруднённого водообмена для уменьшения обводнённости подготовительных, эксплуатационных и горно-капитальных выработок дополнительно к названным требованиям является необходимым поддержание в осушенном состоянии пород зоны свободного водообмена, перехват потока подземных вод за пределами площади горных работ, сохранение и улучшение состояния слабопроницаемых массивов пород.

В зоне застойных вод основное требование к системе защиты заключается в сохранении сплошности слабопроницаемых горных пород, залегающих над рудной залежью. Данное требование весьма существенно для увязки технологии ведения горных работ и технологии дренажа вышележащих и вмещающих пород.

При выборе технологии осушения Северо-Уральского бокситового бассейна детально анализировались климатические, геолого-тектонические, гидрологические и гидрогеологические группы факторов. Климатические и гидрологические условия района месторождения благоприятствуют пополнению запасов подземных вод, которое может осуществляться с величиной поглощения $(5\text{-}65)\cdot10^3$ м^3/ч. Режим поглощения неравномерный (в период паводков достигает $(15\text{-}20)\cdot10^3$ м^3/ч), что следует учесть в технологии осушения. Геолого-тектоническое строение обусловливает степень трещиноватости и закарстованности вмещающих пород. Известняки закарстованы до глубин 1600-2000 м. С глубиной закарстованность уменьшается. Так, коэффициент закарстованности в интервалах 0-20 м изменяется от 16 до 0,3 %; 200-500 м - от 2,5 до 0,1 %; 500-1500 м - от 0,4 до 0,0001 %. Геолого-тектонические факторы учитываются также при размещении дренажных устройств и оценке условий формирования потоков подземных вод.

Гидрогеологические факторы детально анализируются по выделенным зонам и имеют основное значение при выборе большинства технологических решений по осушению месторождения. Дополнительно к вышеназванному проявлению гидрогеологических факторов учитывается блоковый характер

распространения водоносных пород, наличие горизонтальных и вертикальных слабопроницаемых массивов пород, большой интервал вероятности разброса фильтрационных свойств, сложное геометрическое и структурное строение водоносных пластов.

Технология ведения горных работ активно влияет на изменение природных условий бассейна. На Северо-Уральском бокситовом руднике при ведении горных работ вскрываются обводнённые массивы пород и нарушается сплошность водоупорных слоёв. В целом технология ведения горных работ на СУБРе достаточно тесно увязывается с технологией опережающего осушения, а также с комбинацией технологии опережающего осушения и методами закрепления трещиноватых зон пород.

В соответствии с требованиями и факторами, определяющими защиту месторождений бокситов от подземных вод в Североуральском бассейне, были приняты при проектировании и применяются при эксплуатации поверхностный и подземный способы осушения. Структура всей системы защиты горных выработок от обводнения очень сложная и включает несколько дренажных узлов, дренажные выработки, защитные целики непроницаемых пород, искусственные слабопроницаемые покрытия русел рек (рис.4.2). Необходимо отметить строгую обоснованность и целесообразность всех структурных единиц, что позволяет объединить их в единое целое устойчивыми взаимными связями.

Основное значение и наибольшую нагрузку в системе защиты от обводнения имеют дренажные узлы: Южный дренажный узел (ЮДУ), Северо-восточный дренажный узел (СВДУ), Черёмуховский дренажный узел (ЧДУ) и Черёмуховская дренажная система (ЧДС).

Южный дренажный узел обеспечивает перехват потока подземных вод, формирующегося в южной части бассейна. Он включает водопонижающие скважин глубиной до 300 м, расположенные в долине р.Вагран в виде линейного ряда. Скважины оборудовались насосами ЭЦВ 16-360-180. Фактическая производительность узла изменялась от 800 до 5300 $м^3$/ч (при проектной 4000 $м^3$/ч) (рис. 4.3). Максимальная нагрузка на узел приходится в период паводков и увеличения инфильтрации из р. Вагран при нарушении целостности искусственного русла. ЮДУ наряду с защитным целиком на р. Вагран обеспечивал защиту от водопритоков в горные выработки шахт 15 и 16. Величина понижения уровня в скважинах узла равна 200 м.

СВДУ предназначен для защиты горных выработок на Черёмуховском, Кальинском и Ново-Кальинском месторождениях. Он расположен на границе Черёмуховского и Ново-Кальинского месторождений и состоял из 40 водопонижающих скважин глубиной 400 м. Скважины оборудовались насосами ЭЦВ 14-210-300. Производительность скважин СВДУ изменялась

от 5600 до 9000 м^3/ч (см.рис..4.3). Уровни подземных вод на участке дренажного узла были снижены до глубины 250 м, на рудном поле шахты Черёмуховская – 550 м и шахты 13 – 320 м.

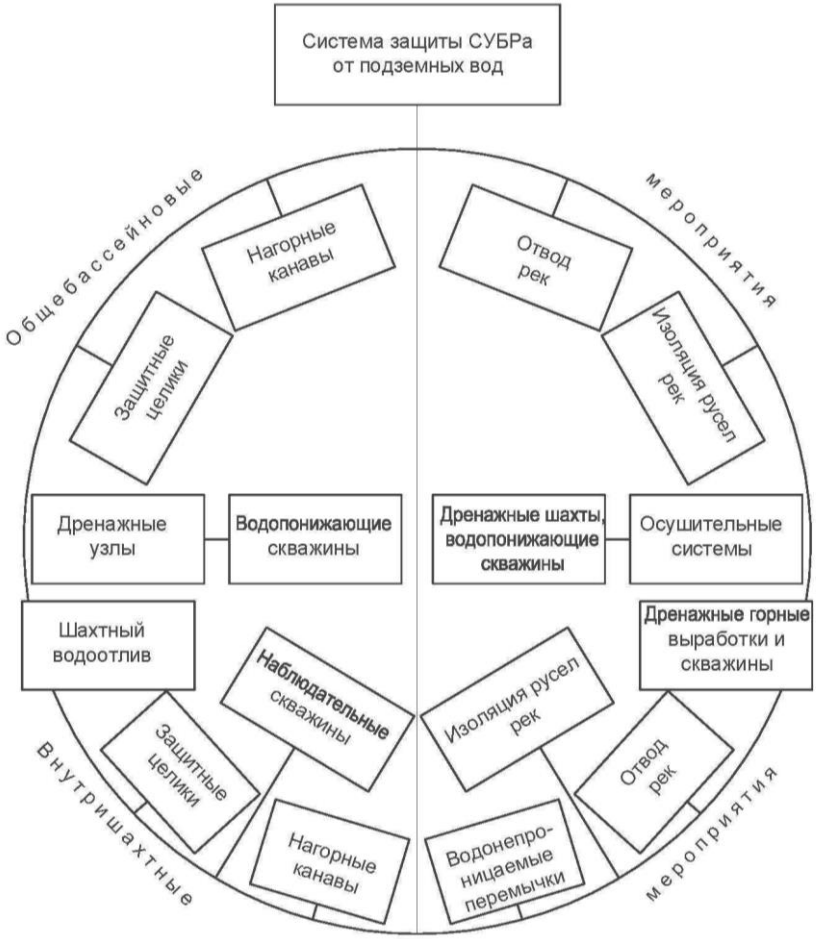


Рис.4.2. Структура системы защиты шахт СУБРа от отрицательного воздействия подземных вод

ЧДУ предназначался для защиты от обводнения горных выработок на Черёмуховском и Сосьвинском месторождениях бокситов. Дренажный узел состоял из 16 водопонижающих скважин глубиной 400 м.

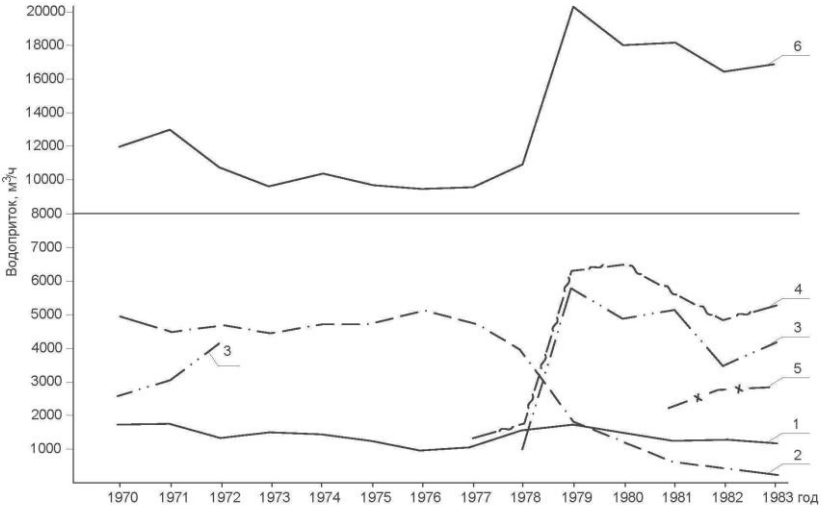


Рис.4.3. Графики изменения среднегодового водопритока к дренажным узлам и суммарного водопритока на СУБРе:
1 – Южный; 2 – Кальинский; 3 – Черёмуховский; 4 – Северо-Восточный; 5 – Сосьвинский; 6 – суммарный по СУБРу

Скважины оборудовались насосами ЭЦВ 16-360-180 и располагались в форме линейного ряда. Суммарная фактическая производительность ЧДУ составляет 3000-7100 м^3/ч. На северной части Черёмуховского месторождения величина понижения уровня подземных вод составляла 120-130 м. Отвод реки Сосьвы за пределы Северо-Уральского карстового массива в комплексе с эксплуатацией скважин ЧДУ позволял повысить эффективность защиты горных выработок от подземных вод.

ЧДС предназначался для защиты от обводнения горных выработок паводковыми водами, проникающими через зону сдвижения горных пород. ЧДС располагался в северной части Черёмуховского месторождения бокситов и состоял из 20 скважин глубиной 400 м. Скважины располагаются в виде линейных рядов. Суммарная производительность ЧДС составляла около 3300 м^3/ч, уровни подземных вод в результате её эксплуатации были понижены на 300 м.

Общебассейновые мероприятия не позволяют достичь полного снятия гидростатических напоров подземных вод над горными выработками, и сохранялась опасность прорывов воды и обводнённых рыхлых пород. Вследствие этого на шахтах создавались локальные системы и участки осушения и выполнялись защитные мероприятия по исключению питания со

стороны рек. Органическая взаимосвязь между всеми системами и сооружениями обеспечивала эффективность защиты горных выработок на конкретных участках шахтных полей. На шахтных полях были сооружены водоотводные каналы для рек Черёмушка, Сарайная, Вагран и другие, имеются нагорные и водоотводные канавы по границам зон обрушения. При проходке горных выработок строились временные и постоянные водонепроницаемые перемычки, сооружались дренажные наклонно-восстающие и опережающие скважины. В отдельных случаях предусматривалась проходка специальных дренажных выработок для осушения закарстованных пород висячего бока. На каждой действующей шахте сооружалась система водоотлива, рассчитанная на откачку подземных вод (рис.4.4). Величины напоров подземных вод, образовавшиеся в результате проведения осушительных мероприятий, были значительно снижены.

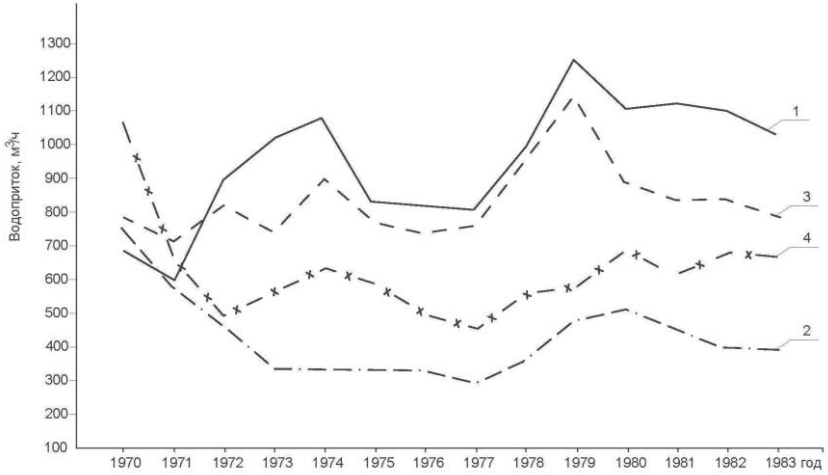


Рис.4.4. Графики изменения среднегодового водопритока на отдельных шахтах СУБРа
Производительность водоотлива на шахтах:
1 - № 16; 2 - № 15; 3 - № 14; 4 - № 13

Анализ проектных решений по дальнейшему развитию технологии осушения на СУБРе свидетельствует о последовательном развитии рассмотренной стратегии: сооружение новых дренажных узлов и осушительных систем, состоящих из водопонижающих скважин, и выполнение отдельных мероприятий на конкретных шахтных полях по

изоляции источников питания от карстовых массивов и отводу потоков подземных вод [76, 77]. Интересным технологическим приёмом, используемым на СУБРе для интенсификации осушения, является сооружение водопонижающих скважин с несколькими стволами.

Гидродинамически такие скважины являются более эффективными по сравнению с традиционными с одним стволом. Основной характерной чертой водопонижающих скважин на СУБРе является их высокая чувствительность к заиливанию при попадании в них паводковых вод с повышенным содержанием взвешенных частиц.

Текущие задачи по развитию технологии осушения сводились к поддержанию на требуемом уровне действующих дренажных систем, реконструкции и совершенствованию технических устройств. Для защиты рудника от подземных вод большое значение имеет надёжность действующих гидротехнических сооружений.

Защиту северного фланга бассейна предполагалось решить с помощью Северо-восточной осушительной системы (защищаются месторождения Черёмуховское, Кальинское и Ново-Кальинское). Система включает дренажные скважины и специальную дренажную шахту.

Защиту от подземных вод Черёмухово-Сосьвинского рудного тела возможно выполнить с помощью Шегультанской осушительной системы, которая также состоит из водопонижающих скважин и дренажной шахты, в различных вариантах её размещения она может дополняться дренажными выработками.

На конкретных шахтных полях предусмотрена защита горных выработок от обводнения в период паводков. Она включает дренажные скважины, располагаемые на наиболее опасных участках, и шахтный водоотлив.

Основные выводы, которые можно сделать из анализа опыта осушения месторождений Северо-Уральского бокситового бассейна, сводятся к следующим:

1. Эффективная защита от подземных вод обеспечивается при реализации в технических решениях трёх основных принципов: отвод и изоляция основных источников питания подземных вод от карстовых массивов горных пород; перехват постоянного потока подземных вод и временного потока, формирующегося в период паводков; обеспечение целостности водоупорных слоёв горных пород.

2. Постоянный поток подземных вод перехватывается за пределами рудных полей специальными дренажными узлами, состоящими из водопонижающих скважин. Временный поток подземных вод перехватывается непосредственно на шахтных полях с помощью локального дренажа за пределами границ развития горных работ и зон сдвижения

вмещающих пород.

3. Отвод и изоляция речного стока от подземных вод осуществляется сооружением искусственных русел для многочисленных рек бассейна.

4. Обеспечение целостности водоупорных слоёв учитывается в основном технологией ведения горных работ. С увеличением глубины разработки полезного ископаемого (более 600 м) значение водоупорных слоёв возрастает.

5. Месторождения, расположенные в зоне свободного водообмена, эффективно защищаются от подземных вод только после изоляции и отвода речного стока от площади оруденения. Осушение рудных залежей в зоне свободного водообмена надёжно осуществлялось в результате перехвата подземных вод дренажными узлами. Разработка глубоких горизонтов в этой зоне требует совершенствования технологии осушения. Защита горных выработок от обводнения в зоне застойных вод обеспечивается сохранением сплошности водоупорных пород, перекрывающих рудную залежь.

6. Система осушения в Северо-Уралъском бокситовом бассейне позволяет обеспечить рациональное использование подземных вод для хозяйственно-питьевых нужд района.

Перспективные направления развития технологии осушения на СУБРе заключаются в дальнейшем совершенствовании поверхностного способа осушения. В наиболее обводнённых зонах целесообразно сооружение водопонижающих скважин большого диаметра (до 1000 мм). Непременное развитие должны получить методы управления процессом водопонижения: внедрение и разработка систем телемеханики и АСУ. В целом для развития технологии осушения на СУБРе весьма полезен опыт, накопленный при разработке бокситовых месторождений в Венгрии (смотри раздел 4.6.3). Создание единой взаимосвязанной с природными и технологическими факторами системы защиты шахт от водопритоков подземных вод также приводит к улучшению технико-экономических показателей [79]. Определённое развитие на СУБРе в комплексе мер защиты от подземных вод должны получить методы закрепления пород (цементация).

4.2. Системы осушения при открытой разработке месторождений

Развитие технологии осушения при ведении горных работ открытым способом рассмотрим на примере обводнённых железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА). В пределах КМА в настоящее время разрабатывается 4 железорудных месторождения: Лебединское, Стойленское, Михайловское и Коробковское. Данные месторождения имеют мощную покровную толщу обводнённых рыхлых

отложений. Из месторождений с маломощным покровным чехлом заострим внимание на Ковдорском карьере.

Приведём краткий обзор опыта осушения Лебединского и Стойленского карьеров.

Лебединское месторождение характеризуется типичным для платформенных областей строением: изверженные и метаморфические породы докембрийского возраста перекрываются мощной слоистой толщей осадочных отложений [80 ,81, 11].

В гидрогеологическом строении района месторождения принимают участие 5 водоносных горизонтов, которые при схематизации объединяются в два водоносных комплекса: верхний и нижний. Верхний водоносный комплекс включает два водоносных горизонта - коньяк-туронский и альб-сеноманский; нижний – девонский и рудно-кристаллический, которые имеют основное значение в обводнении горных выработок (табл. 4.2).

Основными требованиями к осушению на карьерах в период их строительства выдвигались исключение оползневых деформаций уступов бортов, обеспечение допустимого уровня развития суффозионных процессов, создание безопасных и благоприятных условий для эффективного ведения горных работ по обводнённым песчано-глинистым породам, снижение влажности руд до нормативной.

При проектировании осушения учитывались факторы: геологическое и гидрогеологическое строение, система ведения горных работ, техническое оснащение, экономика [83].

Следует отметить неполноту геологической информации, что не позволило при разработке структуры дренажной системы учесть гипсометрию подошвы водоносных пластов.

Гидрогеологические условия месторождений были изучены детально, постоянно уточнялись в ходе освоения, что позволяло своевременно корректировать прогнозные оценки величин водопритоков и понижений уровня [84].

Учёт влияния технологии ведения вскрышных работ (при использовании земснарядов) подробно изложен в работах [85, 86]. Отметим, что накопленный опыт в этом направлении детально обобщён и проанализирован, он должен найти применение на месторождениях-аналогах. Этот опыт ещё раз подчёркивает важность положения о взаимовлиянии и взаимоувязке технологии разработки месторождения и технологии его осушения.

Уровень технического развития при составлении первых проектов осушения Лебеданского и Южно-Лебединского месторождений позволял в основном ориентироваться на использование водопонижающих скважин с последующим переоборудованием их в сквозные фильтры. Следует указать,

Таблица 4.2 - Гидрогеологические параметры водоносных горизонтов в районе Лебединского и Южно-Лебединского месторождений

Водоносный горизонт	Глубина залегания, м	Напор над подошвой, м	Водоупор и его мощность, м	Условия питания	Область разгрузки	Водопроводимость, $м^2$/сут	Гравитационная водоотдача, доли ед.	Коэффициент уровнепроводности, $м^2$/сут	Распространение
Аллювиальный	0		-	Атмосферные осадки, поверхностные воды	Р.Осколец карьер	30	-	-	Локальное
Коньяк-туронский	8	0-10	-	Атмосферные осадки, паводковые воды, инфильтрация из водоёмов	Карьер, система осушения	До 500	0,005	$4 \cdot 10^3$	Повсеместное
Альб-сеноманский	80	12-30	Юрские глины, 0-30	То же	Карьер, система осушения	300	0,15	$4 \cdot 10^3$	Повсеместное
Юрский	100	0-10	Юрские глины	Перетекание	Карьер	До 40	-	-	Локальное
Девонский	110	-	Сланцы	Перетекание	Карьер	До 300	-	-	Локальное
Архей-протерозойский (рудно-кристаллический)	До 120	0-10	Кварциты	Перетекание	Система осушения	До 50	-	-	Повсеместное

что такое положение несколько противоречило развитию технологии осушения за рубежом.

Сравнение экономических показателей по эксплуатации системы осушения на Лебединском и Южно-Лебединском карьерах, проведенное рядом авторов [85], свидетельствует о преимуществах поверхностного способа осушения. Однако, несмотря на это основное значение при реконструкции системы осушения было отдано подземному способу, что необъяснимо с позиций экономики.

Практически полностью при осушении месторождений (первые 10-15 лет) был слабо учтён фактор охраны окружающей среды и рационального использования подземных вод. Должное значение эти вопросы стали получать в последующие года, практические решения были направлены на рациональное использование подземных вод, откачиваемых системой осушения [84].

Перейдём к анализу технологии осушения, использовавшейся на месторождениях. За период их освоения и разработки применялись два способа: поверхностный и комбинированный.

Детальный анализ технологии осушения за более чем 20-летний период дан в фундаментальных работах В.А.Мироненко, Е.П.Писанца, В.В.Лосицкого и других авторов [11, 80, 83]. В настоящей работе кратко укажем основные эксплуатационные характеристики системы осушения и сделаем выводы по технологии осушения.

В целом существующая система осушения на месторождениях КМА включает внешний и внутренний дренажные контуры. Внешний дренажный контур располагается по периметру карьера на расстоянии 150-200 м от бровки на нерабочем борту и 100-150 м на рабочем. Внешний дренажный контур на стадии строительства карьеров состоял из водопонижающих скважин, на стадии эксплуатации - из дренажного штрека со сквозными фильтрами и восстающими скважинами. Протяжённость дренажного штрека составляет более 17000 м. В дренажном штреке размещаются также водосборники и насосные станции для откачки воды на поверхность.

Внутренний дренажный контур представлен прибортовым дренажом, состоящим из открытых и закрытых дренажных канав, горизонтальных скважин и лучевого дренажа. На нерабочем борту сооружаются закрытые прибортовые дрены, которые в сочетании с фильтрующей пригрузкой обеспечивают безопасную работу горно-транспортного оборудования. Накоплен положительный опыт применения на нерабочем борту горизонтальных скважин. Сооружение горизонтальных скважин позволяет перехватить почти весь приток на борт карьера. Производившееся отключение дренажных скважин внешнего контура на участке заложения горизонтальных скважин позволяет отказаться от подземных дренажных

штреков со сквозными фильтрами [85].

Внутренний дренажный контур на рабочем борту представлен открытыми прибортовыми дренами на дренажном подуступе. Открытые дрены обеспечивают нормальные условия работы при величинах водопритоков 0,2 $м^3$/ч на I м длины и расположении их на расстоянии 5-6 м от нижней бровки подуступа. При наличии фильтрующих пригрузок допустимый водоприток увеличивается в 2-3 раза.

Основные технические данные по системам осушения на 1984 год приведены в табл. 4.3.

Большое значение в последние годы в технологии осушения на карьерах имеет перераспределение водопритоков между внешним и внутренним дренажными контурами. При малоизменяющемся суммарном водопритоке (около 8000 $м^3$/ч) водоотбор внешним дренажным контуром уменьшается, что приводит к увеличению нагрузки на внутренний контур. В период строительства карьера дренажные устройства внешнего контура перехватывали 70-80 % суммарного водопритока [85], в настоящее же время эта величина снизилась до 50 %.

Таблица 4.3 - Основные технические показатели систем осушения Лебединского, Южно-Лебединского и Стойленского карьеров (на 1985 г.)

Сквозные фильтры, шт.	Водопони-жающие скважины, шт.	Восстающие скважины, шт.	Дренажный штрек, м	Горизон-тальный прибортовой дренаж, м	Горизон-тальные скважины, шт.
Лебединский карьер					
74	-	12	17500	2570	24
Южно-Лебединский карьер					
30	8	27	13870	3100	-
Стойленский карьер					
38	6	65	23150	3900	32

Перераспределение водопритоков в системах осушения карьеров привело к увеличению количества воды, принимаемого бортом карьера, что, естественно, должно найти отражение на развитии инженерно-геологических процессов. Для детального анализа имеющихся данных область фильтрации в пределах карьеров была разбита на характерные ленты тока в соответствии с особенностями конфигурации контура карьеров. По ширине каждой ленты тока были нанесены инженерно-геологические явления и процессы, наблюдаемые на бортах карьеров. Основное значение подземные воды имеют в развитии деформаций на контакте песков аптского и неокомского возраста и юрских отложений. Отмечаются два вида основных деформаций:

оплывание и вынос. В результате оплывания поверхность откоса выполаживается до угла 10-12°. Фильтрационный вынос песка подземными водами приводил к образованию промоин глубиной до 2 м и протяжённостью до 5 м. В юрских и неокомских глинистых породах под влиянием подземных вод отмечались процессы набухания-разупрочнения, что приводит к обрушению уступов при угле откоса более 50°.

Анализ распределения водопритоков по выделенным лентам тока и в пределах каждой ленты тока по дренажным контурам в совокупности с проявлением инженерно-геологических явлений и процессов позволяет указать на следующие закономерности:

− водопритоки к северному, северо-восточному и западному бортам карьера более существенны, чем к восточному и южному;

− интенсивность и многообразие инженерно-геологических процессов прямо пропорциональны количественным значениям водопритоков во внутренний дренажный контур; наблюдается некоторое снижение интенсивности инженерно-геологических процессов при примерном равенстве водопритоков во внутренний и внешний дренажные контуры;

- суффозионные явления отмечаются при значениях водопритоков, равных 0,16 $м^3$/ч на I м длины откоса; оползни при водопритоках - 0,5 $м^3$/ч на I м длины откоса; осыпи и оплывания отмечены на западном борту карьера, где водопритоки достигают значений 0,84 $м^3$/ч на I м длины откоса.

Эффективным профилактическим мероприятием для предупреждения деформаций является использование фильтрующих пригрузок.

Выполненный анализ позволяет сделать ряд основных выводов и практических рекомендаций по совершенствованию технологии осушения, отвлекаясь от коренной реконструкции системы осушения:

1. Подземный дренажный штрек должен использоваться при развитии внутреннего дренажного контура с целью сбора и откачки воды, осушения обводнённых массивов кристаллических пород, предназначенных для взрывания, дренажа обводнённых рыхлых руд с помощью восстающих скважин.

2. Оперативные мероприятия по совершенствованию технологии осушения на карьерах заключаются:

− в усилении внешнего дренажного контура за счёт сооружения восстающих скважин на участках, где перехватывается менее 50 % суммарного водопритока;

− в усилении внутреннего дренажного контура за счёт сооружения горизонтальных скважин на участках, где водоприток превышает 50 % суммарного.

3. Комплексное решение вопросов осушения месторождений с

проблемами водоснабжения горнорудного района.

4. Создание постоянно действующей имитационной компьютерной модели технологии осушения для выработки стратегических и текущих решений по управлению процессом осушения.

Рассмотрим некоторые аспекты технологии осушения на Стойленском карьере. Стойленское железорудное месторождение располагается в одном регионе с Лебединским и приурочено к крупному поднятию докембрийского кристаллического фундамента, перекрываемого мощной толщей осадочных горизонтально залегающих пород мезокайнозойского возраста. Гидрогеологические условия Стойленского месторождения характеризуются распространением 6 водоносных горизонтов (табл.4.4), которые при схематизации условий обводнённости объединяются в два водоносных комплекса: верхний и нижний, включающих те же водоносные горизонты, что и на Лебединском месторождении.

Характеристика гидрогеологических условий Стойленского месторождения подробно изложена в ряде работ [11, 83, 85] и близка к Лебединскому (см.табл. 4.2 и 4.4). Основными обводняющими месторождение и горные выработки водоносными горизонтами являются турон-сантонский, альб-сеноманский и архей-протерозойский (рудно-кристаллический). Дадим краткую характеристику режима подземных вод в районе месторождения. До начала разработки месторождения статические уровни в водоносных горизонтах, обводняющих месторождение, находились на отметках 130-140 м. На анализируемый период в результате водопонижения уровни снижены на 20-30 м (верхний водоносный комплекс) и 50-60 м (рудно-кристаллический водоносный горизонт).

Произошёл разрыв между уровнями альб-сеноманского и рудно-кристаллического водоносных горизонтов, который достигает 20-40 м (рис.4.5). Разрыв уровней чётко фиксируется по наблюдательным скважинам на восточном и северо-восточном бортах карьера. Значительное понижение уровня может способствовать тому, что подземные воды из девонского водоносного горизонта будут активно поступать в рудно-кристаллический, что увеличивает сам водоприток на горизонтах ниже +20 м.

Разработка Стойленского месторождения производится открытым способом. Технология ведения горных работ на рабочем борту карьера, начиная с 1970 г., постепенно менялась. Производилась замена устаревшей техники на более высокопроизводительную (были внедрены роторные комплексы непрерывного действия КУ-800-1, КУ-800-II и ERs).

Горные работы велись роторными комплексами непрерывного действия с транспортировкой пород по конвейерному транспорту. На горизонте +183 м отрабатывались мергели сантонского яруса роторным экскаватором КУ-800-1, а сухие мела на горизонте +155 м - роторным

Таблица 4.4 – Гидрогеологические параметры водоносных горизонтов в пределах Стойленского месторождения

Водоносный горизонт	Глубина залегания, м	Напор над подошвой, м	Водоупор и его мощность, м	Условия питания	Область разгрузки	Водопроводимость, $м^2$/сут	Гравитационная водоотдача, доли ед.	Коэффициент уровнепроводности, $м^2$/сут	Распространение
Четвертичный	0-2	2-20	-	Атмосферные осадки	Р.Оскол, р.Осколец	До 3	-	-	Локальное
Турон-сантонский	0	15	Слабопроницаемые мела, 0-20	То же	-	До 400	-	-	На карьере сдренирован
Альб-сеноманский	90-110	30	Юрские глины, 0-12	Атмосферные осадки, перетекание	Р.Оскол, р.Осколец, в рудно-кристаллический карьер	До 750	0,1-0,15	$3,5 \cdot 10^3$	Повсеместное
Юрский	110-115	До 46	Юрские глины, 0-12	Перетекание	В рудно-кристаллический карьер	До 6,8	0,1	-	Локальное
Девонский	80-110	70-125	Девонские глины, сланцы	Перетекание	В рудно-кристаллический карьер	До 20	-	-	Локальное на периферии м-ния
Архей-протерозойский (рудно-кристаллический)	130-140	-		Перетекание	-"-	До 200	-	-	Повсеместное

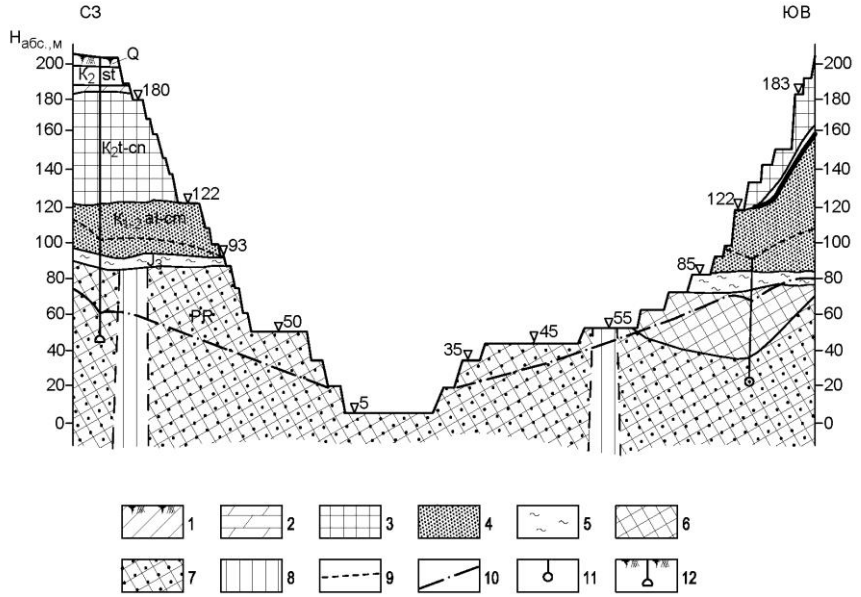


Рис.4.5. Гидрогеологический разрез Стойленского карьера:
1 – почвенно-растительный слой; 2 – мергель; 3 – мел; 4 – песок;
5 – глина; 6 – руда; 7 – кварцит; 8 – сланец; 9 – динамический
уровень Альб-сеноманского водоносного пласта; 10 – динамический
уровень рудно-кристаллического водоносного горизонта;
11 – восстающая скважина; 12 – сквозной фильтр

экскаватором КУ-800-II. Роторные комплексы использовались также на обводнённых и осушенных песках сеноман-альбского водоносного пласта (горизонты +100 и +93 м). Остальная часть рыхлых пород отрабатывалась экскаваторами цикличного действия ЭКГ-4,6 (по суглинкам, мелу, глине) с погрузкой на автомобильный и железнодорожный транспорт.

Технология ведения горных работ по альб-сеноманским пескам предусматривала разделение их на два подуступа: основной (верхний) и дренажный (нижний) (рис. 4.6, а). Осушенную часть песков (основной подуступ) в пределах отметок +100...+120 м отрабатывали роторным комплексом К-300. Угол откоса этого подуступа достигал 80-85°, высота до 20 м. Отработка обводнённой части (дренажный подуступ) песков производилась роторным комплексом ERs (в интервале отметок +93...+100 м). Высота подуступа составляет 7-10 м угол откоса 70°. Рабочая площадка нижнего подуступа, необходимая для ведения горных работ на верхнем

подуступе 2, выбирается по высоте на уровне остаточного столба воды высотой 7-9 м с таким расчётом, чтобы исключалась возможность оплывания откоса верхнего подуступа. Участки оплывания образовывались по фронту заходки между забоями двух подуступов и составляли до 25 м. Нижнюю площадку 3 дренажного подуступа формировали в виде слоя песка высотой 0,5-1 м над кровлей глин с таким расчётом, чтобы в зоне отстающего забоя дренажного подуступа уровень подземных вод не превышал эту величину. Ширина заходки отрабатываемых обводнённых пород составляла 25-30 м.

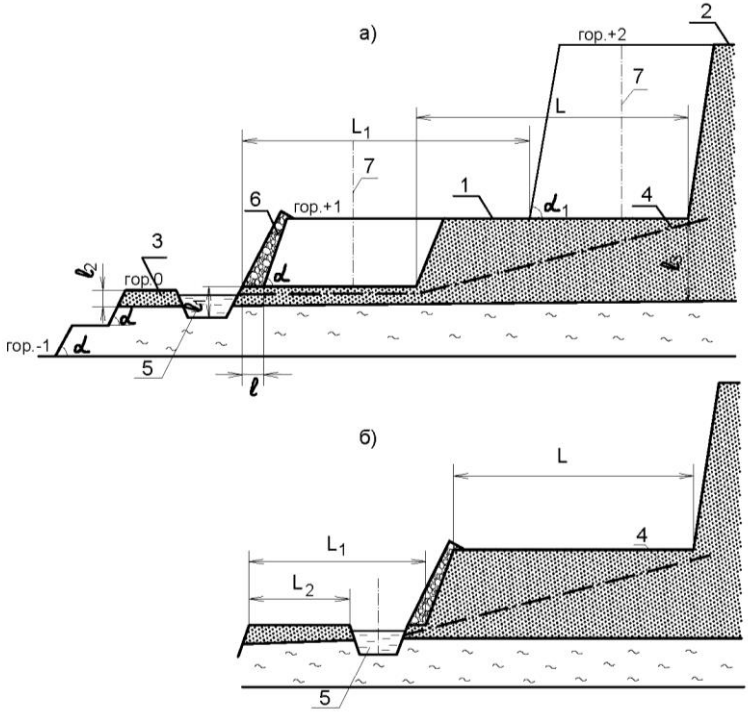


Рис.4.6. Технология осушения уступов песков альб-сеноманского водоносного пласта:
а – схема отработки обводнённых и необводнённых песков альб-сеноманского водоносного пласта; б – схема устройства горизонтальных дрен; 1 – рабочая площадка; 2 – верхний подуступ; 3 – нижняя площадка; 4 – уровень подземных вод; 5 – дрена; 6 – фильтрующая пригрузка; 7 – ось экскаватора; 8 – L, L1, L2, l, l1, l2, l3 – размеры площадки и дрены.

Ширина площадок на горизонтах +100 м и +93 м (+90 м) достигала соответственно до 50 м и 12-25 м. Завершающей стадией в каждой заходке

является устройство временных прибортовых дрен для перехвата и отвода потока подземных вод (рис. 4.6, б).

Временные прибортовые дрены представляли собой заглубленные в водоупор канавы, устраиваемые вдоль нижней бровки дренажного подуступа. Дренажная канава сооружалась экскаваторами Э0-5111, ЭО-4221 или ЭКГ-4.6 сразу же после отработки обводнённой части альб-сеноманского водоносного пласта и при этом выполнялись следующие технологические операции.

Производилась планировка рабочей площадки бульдозером, разметка трассы канавы и её проходка. Глубина канавы составляла I м. Если расстояние между канавой и откосом верхнего подуступа не больше 20 м, то стенки канавы пригружались кварцитной щебёнкой, если это расстояние больше 20 м, то пригрузка не делалась.

Добыча полезного ископаемого на Стойленском карьере производится с применением буровзрывных работ. Технология буровзрывных работ включает операции: очистка поверхности блока, бурение скважин заряжание их, взрывание блока, экскавация, взрывание негабаритных кусков породы (для кварцитов кусков более 1х1,4 м, для богатой руды - более 0,6 х 0,9 м). Бурение скважин осуществляется станком СБШ—250МН, диаметр скважин составляет 250 мм, глубина до 18 м. Ствол скважины продували сжатым воздухом. Выемка взорванной массы производилась экскаваторами ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8И.

Площадь взрываемых блоков изменялась в пределах $(4 - 9)\cdot 10^3$ м^2, объём бурения - $(1{,}2 - 2{,}7)\cdot 10^3$ м, объём блока - $(30 - 90)\ 10^3$ м^3. Выход негабаритных кусков не превышал 2,9 % от общего объёма взорванного блока.

Обводнённость буровзрывных скважин на Стойленском карьере различная. В целом отмечается закономерность увеличения обводнённости к забою карьера (критерием обводнённости принят столб воды в скважине высотой I м). Анализ условий обводнённости блоков показывает: на горизонте +65 м столб воды составлял в среднем 5,7 м, количество обводнённых скважин достигает 87 %. Водоприток во взрываемый блок формируется из альб-сеноманского водоносного горизонта. На горизонте +35 м средняя высота столба воды составляла 5,2 м, количество обводнённых скважин 78 %. На горизонте +5 м высота столба воды в скважинах достигала 7 м (в среднем), количество обводнённых скважин - 93 %. Обводнённость блоков этого горизонта связана в основном с недостаточной осушенностью рудно-кристаллических пород.

Переходя к формулированию требований к системе осушения Стойленского карьера, отметим, что их теоретическое обоснование и научное решение разработано в основном для стадии строительства. Для стадии

эксплуатации карьера имеются только общие направления по выполнению исследований.

Основными требованиями к осушению при разработке Стойленского месторождения являлись: обеспечение устойчивости бортов карьера; создание условий для эффективного использования технологических операций на вскрыше и добыче; обеспечение безопасных условий ведения горных работ; предохранение карьера от случайностей аварийного характера; решение задач охраны и рационального использования подземных вод [84, 85].

При проектировании и сооружении системы осушения на Стойленском карьере анализировались следующие группы факторов: геолого-гидрогеологические, экономические, геотехногенные, технологии ведения горных работ, охраны окружающей среды.

Из геологических факторов при сооружении дренажной системы недостаточно была учтена трещиноватостъ пород докембрийского возраста. Не были выделены зоны интенсивной трещиноватости и не разработаны схемы по их осушению. В недостаточной мере было учтено также геологическое строение зон контакта кварцитов со сланцами, что при наличии прямой гидравлической связи между альб-сеноманским и рудно-кристаллическим водоносными горизонтами увеличивало обводнённость последнего.

Анализ гидрогеологических факторов в целом был выполнен достаточно полно в соответствии с имевшейся информацией. Отметим только, что с увеличением глубины карьера возрастает, видимо, роль девонского водоносного горизонта в обводнении горных выработок. Водоупорные слои глин между девонским горизонтом и рудно-кристаллическим зачастую отсутствуют, что обеспечивает дополнительную обводнённость трещиноватых пород докембрия [86]. Сопоставляя фильтрационные свойства и степень трещиноватости обводнённых пород архей-протерозоя, укажем, что в гидрогеологическом разрезе выделяются слабопроницаемые блоки сланцевых пород (коэффициент фильтрации 0,0001-0,18 м/сут), что следует учесть при выборе структуры системы осушения.

При анализе экономических показателей в качестве альтернативных вариантов рассматривались системы осушения при поверхностном и комбинированном способах осушения. Из соображений надёжности был рекомендован и реализован комбинированный способ осушения. При разработке технико-экономического обоснования технологии осушения нельзя не принимать во внимание всего комплекса водохозяйственных проблем региона, что существенным образом влияет на экономические показатели дренажных мероприятий.

Остановимся на геотехногенных факторах и их влиянии на осушение месторождения.

Действие геотехногенных факторов обусловлено дополнительным питанием подземных вод из искусственных водоёмов: хвостохранилищ, водохранилищ. На участке Стойленского карьера сформировалась асимметричная депрессионная воронка, вытянутая в широтном направлении на восток. В 1984 году отмечался подъём уровней на западном и юго-западном бортах карьера на 0,77-2,22 м, что обусловлено появлением дополнительных источников питания подземных вод.

К существенным геотехногенным факторам, влияющим на изменение гидрогеологической обстановки на Стойленском карьере, относится создание зон искусственной трещиноватости под действием массовых взрывов. Особенно интенсивно влияет трещиноватость, развивающаяся под взрываемым блоком пород, по которым распространяются подземные воды, поступающие за счёт перетока из вышележащих осадочных отложений. Под воздействием взрыва на горный массив происходит возникновение зон повышенной трещиноватости в кристаллических породах и снижается экранирующая роль слабопроницаемых пород вышележащей юрской системы и сланцевых блоков.

Увеличение фильтрационных свойств горных пород при массовых взрывах возможно на большие глубины. Образование в массиве породы волн давления со знакопеременной нагрузкой вызывает колебание уровней подземных вод, что также способствует изменению состояния водоносных и водоупорных пластов. Слабая изученность этих явлений требует выполнения специальных исследований для оценки влияния буровзрывных работ на изменение гидрогеологических условий глубоких карьеров.

Влияние технологии ведения горных работ на Стойленском карьере на технологию осушения достаточно однозначно определяется положением уровня подземных вод в обводнённых породах и величинами водопритоков в зону действия горных механизмов. Технология ведения горных работ на обводнённом уступе альб-сеноманских пород подробно изложена выше. Укажем, что в целом технология осушения и технология ведения вскрышных работ увязаны. Для вскрытия более детальных взаимосвязей на Стойленском карьере имеются благоприятные условия, обеспечивающие проведение натурных наблюдений и последующую сравнительную оценку показателей при отработке пород обводнённого дренажного подуступа и осушенного верхнего.

Более сложный анализ данных вытекает из оценки влияния осушения на буровзрывные работы. На Стойленском карьере сооружение взрывных скважин осуществлялось станком СБШ-250МН с очисткой ствола скважины воздухом.

В общем, поступление воды в скважины резко ухудшает условия очистки забоя от продуктов разрушения, в связи с этим снижается скорость бурения, повышается износ долота, возрастают расходы на бурение по многим статьям. Обводнённость взрывных скважин требует заряжания их водостойкими взрывчатыми веществами, которые в 1,5-2 раза дороже неводоустойчивых, усложняется технология заряжания, возрастает количество отказов [87-92]. Поэтому одним из направлений совершенствования технологии осушения на Стойленском карьере является повышение степени осушенности трещиноватых докембрийских пород.

Интенсивное развитие горнодобывающего производства в районе Стойленского карьера ставит задачи по охране и рациональному использованию подземных вод [93, 94]. Остаточные напоры подземных вод на линии дренажного контура изменялись от 13 м на западе до 27 м на востоке и севере. Исходя из этих величин, имеются определённые резервы в уменьшении радиуса депрессионной воронки, который в анализируемое время достигал свыше 10 км.

Из всего объёма воды, поступающей в систему осушения, 48 % использовались для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения. Осушение Стойленского месторождения следует рассматривать как составную часть программы, предполагающей обеспечение решения задач охраны водной среды и рационального использования подземных вод.

Перейдём к анализу существующей технологии осушения. На Стойленском карьере осушение производится комбинированным способом. Система осушения состоит из 2-х контуров: внешнего, располагающегося за контуром карьера, и внутреннего, сооружённого на рабочих площадках обводнённых уступов.

Внешний дренажный контур включал шахтные стволы, водоотливные установки, водопонижающие скважины, подземный дренажный штрек со сквозными фильтрами и восстающими скважинами. По своим очертаниям внешний дренажный контур представляет в плане замкнутый многоугольник.

Основное значение на внешнем дренажном контуре имеют восстающие скважины, которые перехватывают более половины водопритока из алъб-сеноманского водоносного горизонта. Суммарная производительность 66 восстающих скважин в 1984 году в среднем составляла 1390 $м^3$/ч, что равно 42 % суммарного водопритока. Дебит одной скважины колеблется от 10 до 60 $м^3$/ч при сооружении её на альб-сеноманский водоносный горизонт и не превышает обычно I $м^3$/ч при сооружении на рудно-кристаллический горизонт.

В 1984 году внешний дренажный контур включал два линейных ряда водопонижающих скважин, из которых на 01.01.86 г. остался один на юго-восточном борту карьера. Производительность 11 водопонижающих скважин

составляла 362 м^3/ч (11 % от суммарного водопритока в карьер). Дебит одной скважины изменялся от 20 до 50 м^3/ч.

Наименьшей эффективностью во внешнем дренажном контуре обладают сквозные фильтры. Всего в 1984 году в эксплуатации находилось 38 сквозных фильтров, суммарная производительность их составляла 290 м^3/ч (12 % от общего водопритока).

Внутренний дренажный контур Стойленского карьера состоит из открытых и закрытых прибортовых дрен и горизонтальных скважин. Суммарная производительность внутреннего контура в 1984 году составляла 544 м^3/ч (17 % от водопритока в карьер). С большой эффективностью использовались на внутреннем контуре горизонтальные скважины. В анализируемый период действовало 32 скважины и расположены они были на постоянном юго-западном борту карьера. Длина скважин составляла 20-25 м, производительность - 100 м^3/ч, сооружались они в песках неокомского яруса.

Анализируя распределение водопритока между дренажными контурами, укажем на основную роль внешнего дренажного контура. Из рис. 4.7 следует, что между притоком во внешний дренажный контур и количеством работающих скважин на нём существует прямая зависимость. Приток воды во внешний дренажный контур превышал приток во внутренний контур в 1979 г. в 1,9, в 1980 г. - в 3,2, в 1984 г. - в 2,2 раза. Начиная с 1983 года, отмечается незначительная тенденция к увеличению водопритока во внутренний контур (на 67 м^3/ч) при его уменьшении во внешний. Очевидно, что без проведения дополнительных работ на внешнем контуре, следуя опыту эксплуатации системы осушения на Лебединском карьере, эта тенденция будет усиливаться.

Для более детального анализа фильтрационное поле в районе Стойленского карьера было разбито на характерные ленты тока и выделены величины водопритоков по каждой ленте (см.рис.4.7). Всего было выделено 9 лент тока. В пределах каждой ленты тока были нанесены инженерно-геологические процессы, протекающие на обводнённых горизонтах бортов карьера.

Полученная схема свидетельствует, что наибольшая нагрузка на внешний дренажный контур приходилась со стороны северного и северо-восточного постоянного борта карьера. Суммарный водоприток на этих участках составлял 841м^3/ч (59,5 % от общего водопритока). Внутренний дренажный контур на этом участке принимал 419 м^3/ч (13,5 % от общего водопритока). Водоприток по лентам тока изменялся от 0,05 до 0,27 м^3/ч на 1м борта. Интенсивность проявления инженерно-геологических процессов на северном борту довольно незначительная, отмечается 4 участка протекания суффозии и 7 выходов подземных вод на горизонте +93 м. На северо-

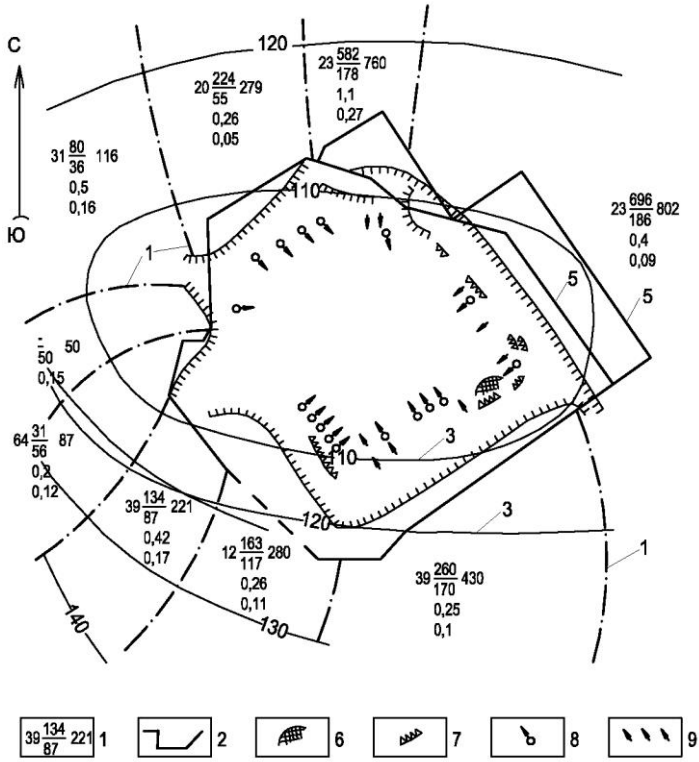


Рис.4.7. Схема распределения водопритока на внешний и внутренний дренажный контур Стойленского карьера:
1 – распределение водопритока по ленте тока, цифры: слева – доля притока во внутренний контур, %; в числителе – водоприток во внешний контур, м^3/ч; справа – общий водоприток, м^3/ч; внизу водоприток в м^3/ч на 1 п.м длины борта карьера общий и во внутренний контур; 2 – внешний дренажный контур; 3 – гидроизогипсы; 4 – линии токов; 5 – подземный дренажный штрек; 6 – оползни в рабочих уступах; 7 – оплывы; 8 – выход подземных вод; 9 – суффозия

восточном борту из инженерно-геологических процессов отмечались оплывины (4 участка), суффозия (4 участка) и 6 выходов подземных вод. Существенное значение в локализации инженерно-геологических процессов имеет, кроме эксплуатации системы осушения, фильтрующая пригрузка откосов кварцитным щебнем на постоянном борту карьера.

На северо-западном нерабочем борту карьера внешним дренажным контуром перехватывалось около 225 м^3/ч, внутренним - 55 м^3/ч, что для данной ленты тока составляло 0,05 м^3 /ч на I м длины борта карьера. На этом участке отмечались только выходы подземных вод на горизонте +93 м.

Наименьшая нагрузка на систему осушения Стойленского карьера приходилась со стороны западного нерабочего борта, где приток в сумме составляет 471 м^3/ч, а на внешний контур приходится 245 м^3/ч. Здесь выделяются 4 ленты тока, на которые приходится 0,16, 0,15, 0,12 и 0,17 м^3/ч на 1м борта карьера, соответственно, причём наблюдаемые в 1983 году 3 выхода подземных вод на горизонте +93 м отмечены по ленте тока с максимальным значением притока на I м.

На юго-западный постоянный и южный рабочий борта карьера приток в сумме составлял 710 м^3/ч, из них 423 м^3/ч приходится на внешний контур. На внутренний контур приходилось около 40 % от суммарного водопритока по этим лентам тока. Водоприток на I п.м борта карьера небольшой и не превышал 0,12 м^3/ч. Несмотря на такую величину, именно на этих участках отмечается максимальная интенсивность инженерно-геологических процессов. По данным на 1984 г., здесь наблюдалось в 4-х местах оплывание песков альб-сеноманского водоносного горизонта, в 16 местах проявление суффозии и в 2-х местах оползание отложений юрской системы. Таким образом, в пределах этих лент тока роль внешнего дренажного контура должна быть усилена.

Из анализа распределения водопритока, приходящегося на внешний и внутренний контуры Стойленского карьера, и сопоставления его с инженерно-геологическими процессами, протекающими на бортах в соответствии с выделенными лентами тока, можно сделать следующий вывод: увеличение нагрузки на внутренний дренажный контур и возрастание водопритока, приходящегося на 1 м борта карьера, приводит и к интенсификации инженерно-геологических процессов на этих бортах. Наиболее существенные процессы наблюдались на юго-западном, южном и северо-восточном бортах, где, как уже отмечалось выше, помимо оплываний песков сеноман-альбского водоносного горизонта наблюдаются также места оползания отложений юрской системы. Необходимо также отметить, что со стороны юго-западного борта, где происходил подпор подземных вод из хвостохранилища, необходим особый постоянный контроль за эксплуатацией системы осушения.

Оплывание песков сеноман-альбского водоносного горизонта на рабочем борту карьера при проходке дренажных канав наиболее интенсивно проявлялось на участках понижений кровли неокомских отложений, подстилающих эти пески, когда канава пройдена не до водоупора глин юрской системы. В этих понижениях неокомские отложения представлены

переслаивающимися разнозернистыми глинистыми песками с преобладанием крупнозернистых. Поток высачивающейся воды концентрируется в рыхлых крупнозернистых песках, при вскрытии которых экскаватором происходил интенсивный вынос отдельных фракций.

Следует отметить, что наиболее существенно влияние обводненности на рабочих бортах сказывается на прочностных свойствах водонасыщенных глинистых пород юрской системы вследствие их набухания, сопровождающегося уменьшением прочности глинистых пород, которое является причиной образования оползней. Борьба с зарождающимися оползнями на рабочих бортах ведётся за счёт пригрузки их кварцитным щебнем. Особенно интенсивные фильтрационные деформации развиваются в первые часы после вскрытия обводнённых песчаных отложений за счёт нестационарного режима фильтрации.

Выполненный анализ по сооружению и эксплуатации систем осушения на карьерах КМА позволил сделать ряд основных выводов и разработать рекомендации по совершенствованию технологии осушения при ведении открытых горных работ.

1. Повышение технико-экономических показателей осушения карьеров связано с развитием внешнего дренажного контура. Преимущественное использование должно быть связано с сооружением восстающих скважин из подземного дренажного штрека с реконструкцией системы водоотведения и минимизацией попадания загрязняющих веществ в дренажные воды, а также соответствия требованиям охраны окружающей среды и рационального использования откачиваемой воды.

2. Подземный дренажный штрек должен развиваться для совершенствования технологии осушения на внутреннем дренажном контуре для дренажа обводнённых массивов кристаллических пород, рыхлых руд.

3. При сооружении восстающих скважин с целью осушения кристаллических пород возможно использовать методы интенсификации водоотбора для увеличения их водозахватной способности.

4. Первоочередное усиление внешнего дренажного контура следует выполнять на участках бортов карьера, которые являются критическими по выделенным лентам тока. На внешнем контуре целесообразно оценить возможность использования современных технологий ГНБ (горизонтального направленного бурения).

5. Совершенствование технологии осушения на внутреннем дренажном контуре связано с широким использованием для дренажа рыхлых пород горизонтальных и лучевых скважин.

6. Разработать локальные технологические схемы по интенсификации осушения рабочих площадок обводнённых уступов с помощью горизонтальных, горизонтально-наклонных и вертикально-наклонных

скважин.

7. Осушение на внутреннем контуре массивов кристаллических пород, предназначенных, в том числе, для ведения буровзрывных работ, рекомендуется выполнять по следующим разработанным технологическим схемам:

I. В простых гидрогеологических условиях, при достаточно высоких значениях фильтрационных свойств наиболее эффективная технология осушения основывается на использовании схемы, включающей сооружение дренажной щели, путём взрывания скважин, пробуренных по глубине на два горизонта, забои скважин образуют уклон для отвода воды из щели.

II. В более сложных гидрогеологических условиях, при дренировании слаботрещиноватых пород и при отсутствии возможности отвода воды по дренажной щели необходимо перпендикулярно или радиально к ней соорудить дополнительные дренажные скважины с уклоном в сторону забоя осушаемого уступа.

III. В наиболее сложных гидрогеологических условиях для достижения высокой степени осушения одного или нескольких уступов кристаллических пород возможно рассмотреть варианты сооружения взрывных горизонтальных скважин с уклоном к забою в основании осушаемого горизонта массива пород. Глубина и расстояние между горизонтальными скважинами определяются радиусом зоны разрушения пород при взрыве. Создание зоны искусственной трещиноватости значительно повысит проницаемость пород в основании, что позволит существенно снизить уровень воды в массиве.

IV. Для улучшения качества взрывной подготовки, увеличения взорванной массы осушение пород взрываемого массива может производиться с использованием энергии взрыва. Образующаяся при взрыве ударная волна оттесняет воду на некоторое расстояние, что приводит к осушению части взрываемого массива. Если в пределах этой части вновь произвести взрыв, то он оттеснит воду еще дальше, и дробление породы будет происходить в осушенных породах. Применяя последовательное короткозамедленное взрывание рядов скважин, можно добиться улучшения условий по ведению буровзрывных работ.

V. Необходимо развивать внутренний дренажный контур, обеспечивая эффективный перехват и водоотведение подземных вод, поступающих со стороны вышележащих осадочных пород, не допуская их перетекания на глубокие горизонты карьера.

8. Развитие технологии осушения следует выполнять в увязке с

проблемами водоснабжения горнорудного района.

9. Обеспечение эффективной защиты глубоких карьеров от подземных вод и управление потоками воды в горнорудных регионах осуществимо на основе постоянно действующей геофильтрационной и геомиграционной моделей, позволяющих оперативно принимать оптимальные технические решения.

4.3. Система осушения глубокого карьера

Ковдорское месторождение магнетитовых и апатитовых руд является частью Ковдорского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов.

Ковдорский массив приурочен к северо-западной окраине Русской платформы – Балтийскому щиту. В плане массив представляет форму неправильного эллипса площадью около 37 км^2 и размещается в толще биотит-олигоклазовых гнейсов и гранито-гнейсов беломорской серии архейского возраста. В целом массив представляет собой трубообразное крутопадающее тело, протягивающееся на глубину не менее 20 км.

Месторождение магнетитовых и апатитовых руд размещается в краевой юго-западной части массива и контролируется пересекающимися разломами северо-восточного (50-60°), северо-западного (330°) и субмеридионального простирания.

Особенностью геологического строения Ковдорского железорудного месторождения является широкое распространение жильного комплекса, наличие взаимопересекающихся тектонических разломов, хорошо развитая сеть трещиноватости, наличие зон дезинтеграции и углы падения пород от 40° до 80°.

Массив кристаллических пород в переуглубленных участках и впадинах перекрывается палеоген-неогеновыми отложениями мощностью от первых сантиметров до десятков метров.

Четвертичные отложения развиты практически на всей территории Ковдорского массива. Мощность четвертичных отложений в основном относительно небольшая, но при перепаде рельефа кристаллических пород довольно сильно изменяется от первых десятков сантиметров до десятков метров.

Комплекс четвертичных отложений представлен тремя основными природными генетическими типами – ледниковыми, позднеледниковыми, послеледниковыми образованиями и современными техногенными отложениями [95-98].

Ковдорское железорудное месторождение характеризуется сложными гидрогеологическими условиями. Особенностями геолого-гидрогеологичес-

кого строения Ковдорского массива являются:

- близкие к вертикальным углы падения пород и широкое распространение жильного комплекса;

- наличие зоны дезинтеграции дочетвертичного периода, которая представлена сильно трещиноватыми породами, и системы тектонических нарушений с падением внутрь карьера – коллекторов и проводников подземных вод на значительные глубины;

- наличие зон искусственной трещиноватости в районе карьера;

- развитие искусственных сооружений – отвалов, хвостохранилища – коллектора техногенных вод;

- наличие развитой гидрографической сети, связанной с подземными водами.

В соответствии с геолого-гидрогеологическим строением в районе карьера «Железный» выделяются три водоносных комплекса:

- водоносный комплекс четвертичных отложений;

- водоносный палеоген-неогеновый горизонт коры выветривания;

-слабоводоносный, локально-водоносный комплекс архей-палеозойских кристаллических пород.

В районе месторождения развиты порово-пластовые воды покровных отложений четвертичного возраста и трещинные воды дезинтегрированных и трещиноватых коренных пород архей-палеозойского возраста. Водоносные комплексы гидравлически связаны между собой и представляют единую водоносную систему с общим уровнем и одинаковыми условиями питания и разгрузки подземных вод.

Водоносный палеоген-неогеновый комплекс коры выветривания представлен обломками кристаллических пород и продуктами их разрушения до песчаного, щебнисто-песчаного состояния. Фильтрационные свойства разнообразные и изменяются от 0,23 - 8,28 м/сут до 1,86 - 62,78 м/сут. Питание водоносного комплекса происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков или перетока с вышележащих четвертичных отложений.

Водоносный архей-палеозойский комплекс кристаллических пород представлен основными, ультраосновными, щелочными и карбонатитовыми породами с ореолом фенитов, гнейсами различного состава и степени.

По данным геологоразведочных работ в зависимости от характера трещиноватости и степени проницаемости среди кристаллических пород выделяют по глубине 4 зоны:

- дезинтеграции и интенсивной трещиноватости до глубины 40,0-80,0 м;

- трещиноватости до глубины 80,0-90,0, иногда до 250,0 м;

-замедленного водообмена до глубины 500,0 – 600,0 м с коэффициентом фильтрации до 0,3 м/сут;

- зона замедленного водообмена ниже глубины 600 м с коэффициентом фильтрации от 0,00003 до 0,014 м/сут.

Согласно базе данных, составленной ОАО «Мурманская ГРЭ» на основании анализа выполненных опытно-фильтрационных работ, зона дезинтеграции карьерного массива в местах разгрузки подземных вод в карьер характеризуется средними коэффициентами фильтрации от 3,55 до 8,8 м/сут. Зона разгрузки подземных вод в пределах северного участка карьера мощностью 35 м характеризуется средним значением коэффициента фильтрации 3,13 м/сут, западного участка мощностью 50 м - средним коэффициентом фильтрации 3,55 м/сут, восточного участка мощностью 30 м – средним коэффициентом фильтрации 8,8 м/сут.

Интервал, соответствующий глубине исследования до гор. +200 м, характеризуется коэффициентами фильтрации водовмещающих пород от 0,058 до 44 м/сут. Среднее значение коэффициента фильтрации до гор. +200 м составляет 7,56 м/сут.

Водоносный архей-палеозойский комплекс кристаллических пород до гор. +100 м характеризуется резким уменьшением фильтрационных свойств. Среднее значение удельного дебита составляет 1,48 л/с/м, коэффициента фильтрации – 0,74 м/сут. Далее, с увеличением глубины, отмечается медленное плавное уменьшение фильтрационных свойств водовмещающих пород (табл.4.5).

Таблица 4.5 – Изменение фильтрационных свойств с глубиной

Горизонт	Кф, м/сут
до гор. ± 0	0,080
до гор. -100	0,067
до гор. -200	0,054
до гор. -350	0,044
до гор. -590	0,0032

Питание водоносного комплекса кристаллических пород происходит непосредственно за счёт инфильтрации атмосферных осадков или перетока с вышележащих водоносных горизонтов. Разгрузка происходит в природные и техногенные дрены (ручьи, карьеры).

Для всех водоносных комплексов Ковдорского массива характерно значительное колебание уровня подземных вод в годовом разрезе. По данным режимных наблюдений, проводимых ОАО «Мурманская ГРЭ», годовая амплитуда колебания уровня в гидронаблюдательных скважинах составляет 0,16 – 15,14 м.

Обводнение карьера происходит в основном со стороны речных долин и акватории оз. Ковдоро. В связи с разработкой карьера ниже базиса эрозии поверхностные водотоки и водоёмы превратились из зон разгрузки в источники питания подземных вод, которые по высокопроводящим участкам транзита потока обводняют, в основном, горную выработку. Согласно выполненным гидрогеологическим съёмкам 2008 – 2012 гг. суммарные выходы подземных вод на бортах карьера составляют порядка 1510 м^3/час.

Наибольшие водопритоки порядка 43 % поступают с восточного борта карьера, около 31 % - со стороны западного и 20 % - со стороны северного борта карьера.

Основное количество выходов подземных вод приурочено к верхним уступам карьера до горизонта +70 +118 м. Обводнённость нижних уступов карьера связана в основном с зонами водопроводящей трещиноватости тектонических нарушений. В связи с проведением горных и буровзрывных работ в карьере потоки со склонов меняют своё направление, могут появляться или исчезать, однако общая картина водопритоков в карьер сохраняется.

Западный борт карьера подрезает долины реки Верхняя Ковдора и ручья Безымянный, подрусловый поток которых разгружается на горизонтах +190 - +204 м с общим дебитом 135 м^3/час.

Северный борт карьера подрезает долину ручья Железорудный. Со стороны ручья Железорудный на горизонтах +154 - +166 м наблюдаются выходы подземных вод (родники, ручьи) в количестве около 155 м^3/час. Выходы подземных вод на этом участке фиксируются по подошве палеоген-неогеновых отложений и в зоне дезинтеграции - интенсивной трещиноватости коренных пород.

В районе пересечения ручья Железорудный с обводным каналом образован пруд площадью около 5 тыс.м^2. Обводной канал, который является на этом участке частью пруда, не экранирован. Наличие крутой депрессионной поверхности на участке между обводным каналом и карьером, а также пруда в непосредственной близости от карьера создаёт благоприятные условия для обводнённости верхних уступов, а при наличии водопроводящих трещин – более глубоких горизонтов карьера.

Южный борт карьера наименее обводнён. Зафиксированы расходы подземных вод на гор. +70 - +190 м около 5 м^3/час на участке выхода апатит-штаффелитовой коры выветривания в борту карьера.

Восточный борт карьера наиболее обводнён. Он вскрывает зону с сильно дезинтегрированными породами. При обследовании карьера в 2008 году на участке восточного борта карьера отмечены выходы подземных вод с общим дебитом 285 м^3/час.

Основной водоприток на восточном борту связан с разгрузкой

подземных вод через высокопроницаемые четвертичные и дочетвертичные отложения, слагающие долину озера Ковдора и подрезаемые бортом карьера. Здесь происходит разгрузка подруслового потока и фильтрационных потерь из озера Ковдоро и отстойника.

На расстоянии 350 м от карьера, в отсечной части озера Ковдоро, создан отстойник карьерных вод. По состоянию на 2016 год абсолютная отметка уровня воды в отстойнике изменяется от 212,57 м до 213,0 м, уровня воды в озере Ковдоро составляет 212,0 м.

Анализ данных эксплуатации системы осушения за последние годы и результаты натурного обследования, выполненного сотрудниками ОАО «ВИОГЕМ» в июне 2017 г., показали, что фактическая система осушения карьера состоит из внешнего дренажного контура, внутрикарьерных дренажных устройств и системы карьерного водоотлива. В таблице 4.6 и 4.7 приведены водопритоки к системе осушения карьера за период с 1991 по 2017 годы.

Таблица 4.6 - Водопритоки к системе осушения за 1991-2017 гг.

Год отработки	Абс. отм. забоя карьера	Средний водоприток, м^3/час					
		Карьерный водоотлив	Водопонижение				Суммарный
			ВПС+ (ПД+178)	ВПС		Всего	
			Восточный ряд	Западный ряд	Северный ряд		
1	2	3	4	5	6	7	8
1991-2004	+0-(-110)	1328	944	287	345	1576	2904
2005		1289	713	268	310	1291	2580
2006		1195	683	281	309	1273	2468
2007	-125	1710	720	288	323	1330	3040
2008	-130	1554	639	306	297	1242	2796
2009	-144	1623	602	197	275	1074	2697
2010	-156	1545	493	270	290	1053	2598
2011	-174	1796	530	170	313	1013	2809
2012	-182	1671	944	237	301	1576	2904
2013		1596	450	239	269	958	2554
2014		1334	605	189	217	1011	2345
2015	-195	1526	579	176	212	967	2493
2016	-220	1391	573+70*	33	205	881	2272
2017	-230	1391	421+109*	0 (откл.)	186	716	2107
*70 - среднегодовой водоприток к ПД+142							

Таблица 4.7 - Средние притоки подземных вод к системе осушения карьера за 10 месяцев 2017 г.

Приток, м^3/час								
Месяц	Карьерный водоотлив	Северный ряд	Западный ряд (отключен)	Восточный куст				ПД +142м
				1 ряд	2 ряд	ПД +178м	Всего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1095	200	0	356	85	125	566	175
2	1057	202	0	355	85	105	545	175
3	1045	201	0	349	85	103	537	170
4	1150	192	0	340	85	118	543	118
5	1113	180	0	349	75	117	541	180
6	1105	180	0	342	75	116	533	218
7	1273	145	0	370	70	103	543	189
8	1398	173	0	370	70	100	540	183
9	1396	192	0	355	65	101	521	180
10	1279	203	0	356	65	109	530	183
Средн.	1191	187	0	354	76	110	540	177
Мин.	1045	145	0	340	65	100	521	118
Макс.	1398	203	0	370	85	125	566	218

Внешний дренажный комплекс включает в себя три группы водопонижающих скважин (ВПС): восточную, состоящую из 7 ВПС, северную – 2 ВПС (в работе находилась одна скважина) и западную – 2ВПС. Скважины оборудованы на четвертичный водоносный горизонт и зону интенсивной трещиноватости кристаллического массива.

Восточный контур ВПС состоит из скважин глубиной от 31 до 80 м. Длина водопонижающего контура – 130 м. В 2017 году скважины водопонижающего контура откачивали в среднем 430 м^3/час подземных вод. Весь объём откачанных вод используется во внутреннем обороте комбината.

Северная группа скважин расположена на правом берегу водоотводящего канала в 25 м от отсечённого русла ручья Железорудного в старом его русле и включает 4 скважины, одна из которых находится в работе, а три в резерве. Скважины имеют глубину от 33,0 до 44,5 м и одна – 80,0 м. По состоянию на 2017 год в работе находится одна скважина (116 м) со средней производительностью порядка 187 м^3/ч. Сброс откачанных вод осуществляется в обводной канал.

Западная группа скважин расположена в 0,75 км от бровки карьера и в 120-150 м к востоку от подводящего канала реки Верхняя Ковдора и состоит

из 3-х скважин. Две скважины находятся в работе и одна – в резерве. Суммарная производительность скважин составляла около 200 м^3/ч. С марта 2016 года скважины выведены из состава системы осушения и законсервированы.

Внутренний дренажный контур состоит из прибортового дренажа и прибортовой дренажной щели с горизонтальными скважинами.

Прибортовой дренаж (ПД) представляет собой глубокую дренажную канаву, сооружённую буровзрывным способом, и предназначен для перехвата остаточной фильтрации подземной воды, идущей в обход контура ВПС, и является водосборником на уступе карьера. В прибортовом дренаже сооружено три зумпфа (2 в работе, 1 в резерве), которые оборудованы погружными насосами типа ЭЦВ. Средние притоки в 2017 году к прибортовому дренажу составили 290 м^3/ч.

Для перехвата и упорядоченного отвода подземных вод вдоль северо-восточного и восточного участков борта карьера с гор. +154 до гор. +142 м пройдена прибортовая дренажная щель протяжённостью около 900 м. Щель проходилась буровзрывным способом с забуриванием взрывных скважин и дробления скального массива в виде полосы шириной 3-35 м и глубиной от 14 до 22 м с уклоном (i=0.02). Для разгрузки дренажной щели и снятия напоров в прибортовом массиве в неё пробурен комплекс горизонтальных дренажных скважин длиной от 50 до 140 м. По результатам обследования карьера горизонтальные дренажные скважины дренируют и перепускают воду в количестве около 135 м^3/ч. Отвод воды от скважин осуществляется самотёком через трубу диаметром 273 мм. На отдельных участках бортов карьера функцию прибортовых дренажей выполняют открытые временные водосбросные канавы.

Водоотведение из карьера осуществляется с помощью карьерного водоотлива. Максимальный приток воды к карьерному водоотливу в период интенсивного снеготаяния и паводка может достигать – 2000 – 2500 м^3/час.

Анализ эксплуатации системы осушения карьера (таблица 4.8) указывает на постепенное снижение её производительности. Основная причина – срок эксплуатации ВПС (более 30 лет) и относительная сработка запасов водоносных горизонтов в прикарьерном массиве.

В 2012 году специалистами ОАО «Мурманская ГРЭ» были проведены опытно-фильтрационные работы на восточном контуре ВПС. В результате установлено, что максимально возможный объём откачки подземных вод с помощью существующих ВПС не может превышать 600 м^3/час.

При оценке возможных вариантов развития системы осушения на Ковдорском карьере следует учесть следующие факторы:

- наличие водоносных горизонтов в рыхлых и скальных отложениях, гидравлически взаимосвязанных между собой;

Таблица 4.8 – Притоки воды в карьер и производительность системы осушения за 2000-2017 г.г.

Год	Водоприток, $м^3$/час			Водоприток, %	
	Водопо-нижение	Водоотлив	Итого	Водопонижение	Водоотлив
1	2	3	4	5	6
2000	1801	1468	3269	55,1	44,9
2001	1492	1287	2779	53,7	46,3
2002	1464	1368	2832	51,7	48,3
2003	1506	1210	2716	55,4	44,6
2004	1290	1275	2565	50,3	49,7
2005	1291	1289	2580	50,1	49,9
2006	1272	1195	2467	51.6	48.4
2007	1330	1710	3040	43.7	56.3
2008	1242	1554	2796	44,4	55,6
2009	1099	1623	2722	40.4	59.6
2010	1049	1629	2678	39.0	61.0
2011	975	1796	2771	35,1	64,9
2012	1072	1671	2743	39,1	60.9
2013	957	1596	2553	37,5	62.5
2014	1011	1334	2345	43,1	56.9
2015	964	1526	2490	38,7	61,3
2016	881	1391	2272	38,8	61,2
2017 (среднее за 10 месяцев)	916	1191	2107	43,5	56.5

- в целом весьма высокую водообильность вмещающих пород;

- сложный инженерно-геологический разрез, в котором чередуются рыхлые и скальные породы при наличии обширных зон дробления (зона дезинтеграции), интенсивной трещиноватости;

- влияние высоких гидростатических напоров, величина которых достигает 80,0 м, вследствие чего депрессионная кривая выходит в борта карьера, что в свою очередь приводит к ослаблению устойчивости уступов.

В этих условиях система осушения должна:

- обеспечить максимально возможный перехват потока подземных вод до (70-75 %) за пределами карьера и снизить высокие напоры;

- сформировать в приоткосном массиве депрессионные поверхности, предотвращающие фильтрационные деформации уступов и обеспечивающие нормативную несущую способность пород для принятого типа оборудования;

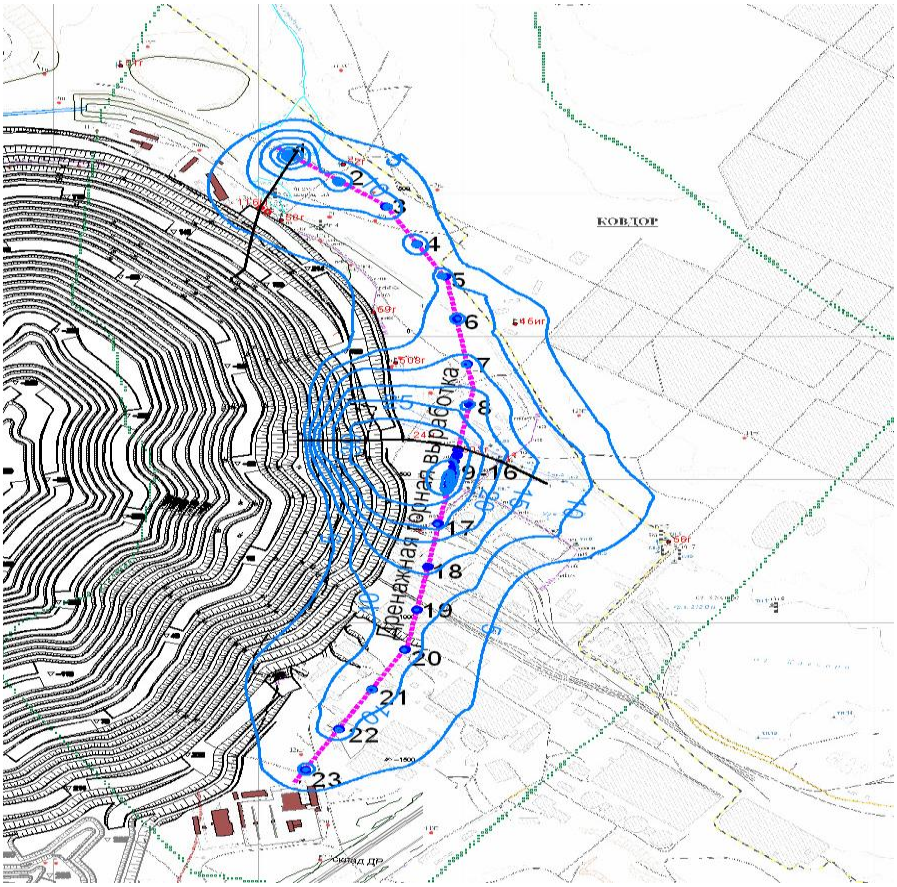


Рис. 4.8. Снижение уровня подземных вод при работе восстающих скважин, гидроизоляции пруда отстойника и обводного канала на участке впадения в него р. Железорудный

- обеспечить общую устойчивость бортов карьера как при длительном их стоянии, так и при постоянном продвижении.

Гидрогеологическое обоснование системы осушения северного и восточного бортов карьера осуществлялось с применением методов математического моделирования процессов геофильтрации и подробно рассмотрено в разделе 11. На региональной и локальных моделях были

разработаны и оценены различные варианты по защите карьера от отрицательного влияния подземных вод:

- подземная дренажная выработка с системой восстающих скважин;
-строительство водопонижающих скважин восточного ряда за проектным контуром карьера и их совместная работа с подземной горной выработкой;
- гидроизоляция пруда-отстойника карьерных вод;
- гидроизоляция руслоотводного канала реки В. Ковдора на участке впадения в него ручья Железорудный;
- заложение водопонижающих скважин северного ряда за проектным контуром карьера.

По результатам гидродинамической оценки, варианты развития дренажного комплекса на северном и восточном бортах карьера как на основе поверхностного, так и подземного способов являются перспективными в комплексе с гидроизоляцией руслоотводного канала реки В. Ковдора и пруда отстойника. На рисунке 4.8 приведен эффект от сооружения подземной дренажной выработки с восстающими скважинами.

4.4. Защита от подземных вод при добыче угля открытым способом

При осушении угольных разрезов применяют как подземный способ осушения, так и поверхностный. Подземный способ включает шахтные стволы, подземный дренажный штрек с восстающими скважинами и систему водоотлива. Поверхностный способ в наиболее экономичном варианте основан на применении систем горизонтальных скважин. Рассмотрим его использование на примере разреза «Бородинский» [99-101].

Ирша-Бородинское буроугольное месторождение входит в состав Рыбинского угленосного района, который является частью Канско-Ачинского бассейна. Месторождение представляет собой мульдообразную синклинальную складку (Бородинская мульда) северо-западного простирания, длиной 13 км и шириной 9 км, выполненную юрскими отложениями на палеозойском основании. Мощность юрских отложений достигает 465 м.

Обводнение разреза “Бородинский” связано с водоносным горизонтом, приуроченным к продуктивной угольной толще, характерной особенностью которой является чередование водовмещающих угольных пластов и песчаников с маломощными слабопроницаемыми и водоупорными породами, что затрудняет гидравлическую связь между отдельными обводнёнными слоями.

Длительное время для осушения разреза “Бородинский” применялся

подземный способ. Технико-экономические условия не позволяли быстро и оперативно реконструировать подземный дренажный комплекс при углублении разреза, в связи с чем принято решение о переходе на более дешёвый и мобильный поверхностный способ осушения с помощью горизонтальных дренажных скважин.

Гидрогеологические и горнотехнические условия разреза "Бородинский" определили основные предпосылки для применения осушения поверхностным способом системой глубоких (протяжённых) горизонтальных дренажных скважин с использованием новой техники и технологии бурения этих скважин, разработанной специалистами института ВИОГЕМ.

Анализ горно-геологической ситуации и предварительные гидрогеологические расчёты показали, что наиболее эффективной является система осушения, включающая горизонтальные дренажные скважины глубиной (длиной) от 250 до 300 м, буримые по подошве угольных пластов. Рассматривались два варианта создания системы осушения: 1-й - с использованием для бурения зумпфов (мелких для западного участка и глубоких для восточного участка) и 2-й - с сооружением горизонтальных дренажных скважин на восточном участке непосредственно с рабочих бортов. Дренажные скважины в обоих случаях закладываются в добычном горизонте.

На западном участке система осушения включала проходку неглубоких котлованов - зумпфов (глубиной до 3 м), бурение из них в направлении развития горных работ вееров скважин длиной до 250 м и систему отвода дренажных вод.

На Восточном участке длина дренажных скважин может быть увеличена до 300 м. Окончательные параметры системы осушения определялись гидрогеологическими расчётами с применением численного геофильтрационного моделирования.

Численное моделирование позволяет учесть фильтрационную неоднородность водоносных горизонтов, их взаимосвязь, условия питания и разгрузки подземных вод, взаимодействие дренажных устройств и карьерного водоотлива, сложную конфигурацию фильтрационных полей и т.д. Геофильтрационная региональная модель Бородинского буроугольного месторождения была реализована с помощью программного комплекса GMS.

Размеры моделируемой территории определялись, в основном, площадью развития отложений бородинской свиты в пределах мульды. Область, охваченная региональной моделью Бородинского буроугольного месторождения, представляет собой прямоугольник размерами 15х15 км, площадь которого составляет 225 км^2. На севере граница области моделирования проходит в широтном направлении по выходам пласта

Бородинский-II на уступы разреза. На западе, юге и востоке граница площади моделирования проходит параллельно линии выходов почвы пласта Бородинский-II под четвертичные отложения. За пределами выходов угольных пластов ячейки были переведены в неактивное состояние и в конечном варианте расчётная модель стала представлять собой фигуру сложной конфигурации (рис.4.9).

При схематизации гидрогеологических условий рассматриваемой территории в разрезе учитывалась возможность объединения ряда водоносных горизонтов в расчётные комплексы. В разрезе моделируемый массив, в соответствии с принятой для данной территории гидрогеологической стратификацией, был разбит сверху вниз на три водоносных слоя и две разделяющих их относительных слабопроницаемых толщи.

Режим надугольного водоносного комплекса выбран напорно-безнапорным. Остальные расчётные водоносные слои моделировались как напорные.

Таким образом, мощность моделируемой толщи составила 150 м, размеры элементарного блока в плане 100х100 м.

Прогнозные оценки техногенного режима подземных вод выполнялись на откалиброванной геофильтрационной модели при различных вариантах размещения дренажных узлов.

Для оценки технологических параметров схем осушения были дополнительно разработаны подробные локальные геофильтрационные модели двух участков разреза «Бородинский»: западного и восточного Основного поля.

Задачи локального моделирования заключались в определении оптимальных параметров расположения котлованов и скважин, притоков и эффекта осушения на отдельных участках отработки месторождения.

На этом этапе для моделирования работы системы осушения была произведена более детальная разбивка модели на отдельных участках месторождения. На этих участках линейные размеры расчётных блоков были уменьшены в 4 раза и составили 25х25 м. Площадь локального моделирования восточного участка Основного поля составила 10,6 км^2, западного участка Основного поля - 9,6 км^2(см. рис. 4.9).

На каждом исследуемом участке было рассмотрено несколько вариантов размещения и количества дренажных котлованов. После определения оптимального количества зумпфов-котлованов рассматривались различные варианты бурения горизонтальных дренажных скважин, определялась глубина (длина) дренажных скважин, положение их в пространстве и количество в каждом дренажном узле.

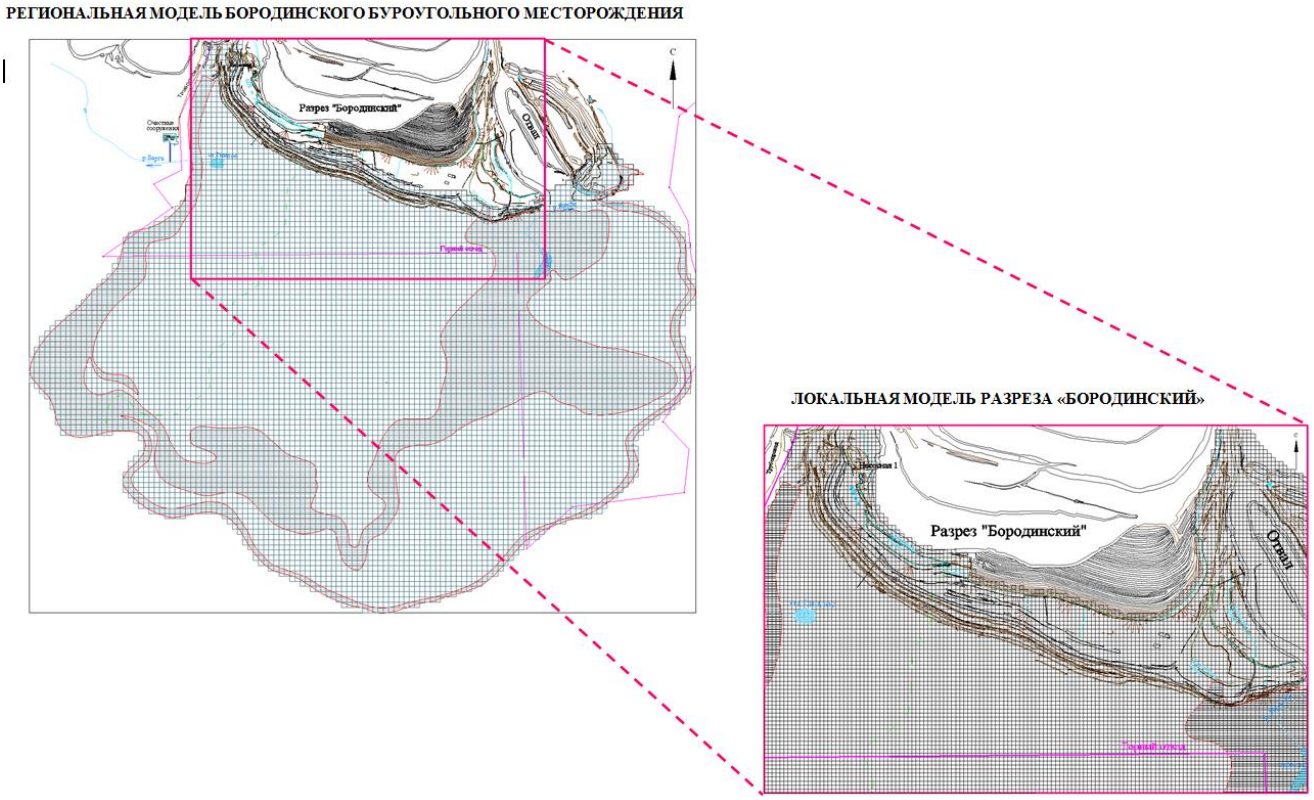


Рис. 4.9. Геофильтрационные региональная и локальные модели Бородинского буроугольного месторождения

Результаты моделирования в виде карт гидроизогипс, таблиц водопритоков и остаточных напоров приведены на рис 4.10 и 4.11.

Как показывают расчёты, дренажные системы, состоящие из горизонтальных скважин, обеспечивают с достаточной степенью надёжности осушение разреза при ведении вскрышных и добычных работ: снижение уровня происходит на величину до 8,5 м на восточном участке основного поля и до 15 м на западном участке, что позволит вести горные работы в сухих условиях.

По мере приближения к центру мульды притоки к системе осушения будут возрастать с 595 $м^3/ч$ до 830 $м^3/ч$ и, данным модельных расчётов, достигнут максимума к 2039 году. Однако насосное оборудование, заложенное в дренажных узлах, позволяет откачивать указанное количество воды без изменения их конструктивных решений.

На западном участке один дренажный цикл охватывает площадь осушения карьерного поля 0,4 $км^2$, на восточном участке - 0,75 $км^2$.

При развитии системы осушения параметры и конструкции дренажных устройств не будут изменяться, равно как и площади осушаемого карьерного поля, заключённые в пределах одного дренажного цикла. Всего для осушения Бородинского разреза в пределах горного отвода намечается реализовать 8 дренажных циклов.

Система откачки дренажных вод и водоотведения на Бородинском разрезе включает создание участковых насосных станций, прокладку трубопроводов (труб быстрого соединения) и проходку дренажных канав.

Технология осушения, используемая на разрезе, является эффективной и технологически вписывается в систему ведения горных работ. Обеспечивается независимость осушительных работ от горных как на западном, так и на восточном участках основного поля и повсеместное снижение уровня подземных вод до требуемых отметок.

Стоимость системы осушения, состоящей из горизонтальных дренажных скважин и котлованов, в 6-7 раз дешевле, чем создание подземного дренажного комплекса. Соответственно снижаются и годовые эксплуатационные затраты. Экономия электроэнергии составляет не менее 20 %.

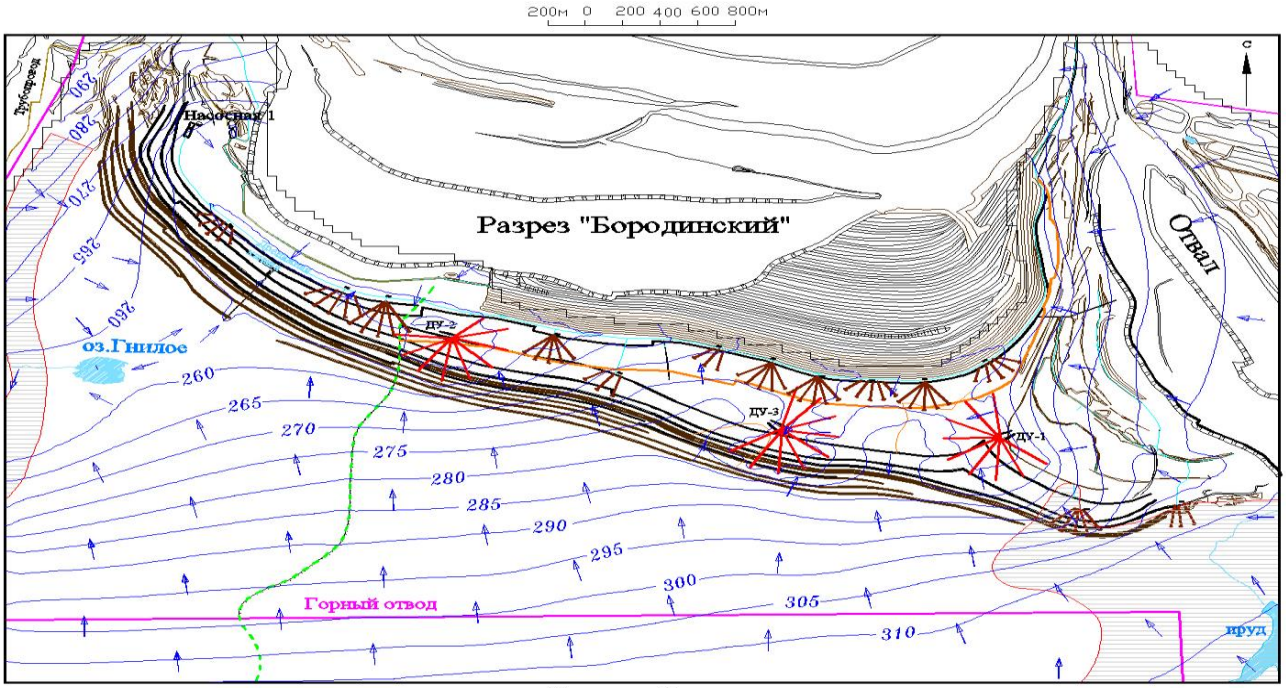


Рис.4.10. Результат решения прогнозной задачи в нижнем угольном подгоризонте по варианту I разреза «Бородинский»

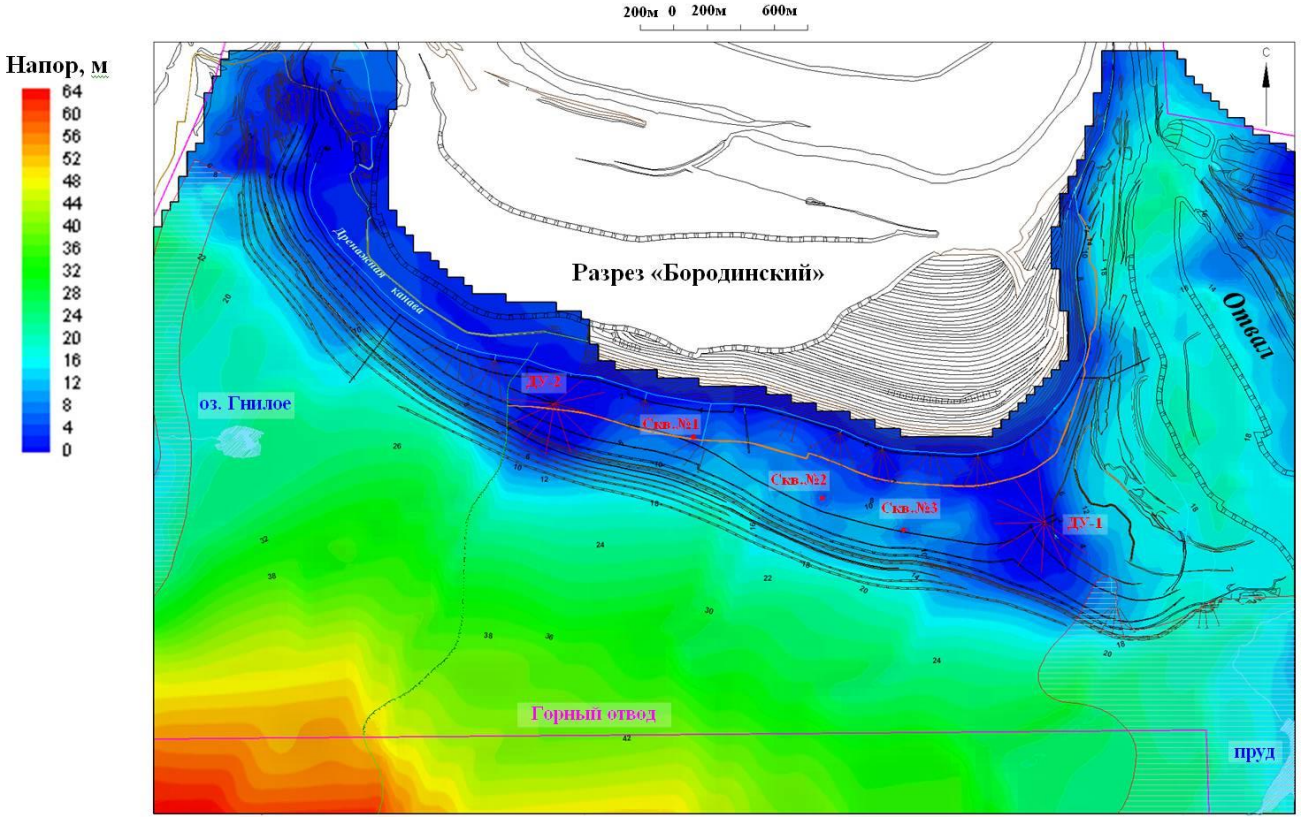


Рис. 4.11. Прогнозная карта остаточных напоров воды над подошвой угольного пласта «Бородинский 2» при эксплуатации системы осушения

4. 5. Защита горных выработок от обводнения при добыче угля подземным способом

Обобщение и анализ опыта на примере добычи бурого угля в Подмосковном бассейне производится в соответствии со следующей структурой: требования к осушению; факторы, учитываемые при выборе схемы и технологии осушения; применяемые способы и технология осушения; влияние осушения на эффективность ведения горных работ и окружающую среду; перспективные направления развития технологии осушения.

Горные работы в Подмосковном угольном бассейне велись открытым и подземным способами. Наибольший интерес представляет опыт осушения при использовании подземного способа. Системы разработки при подземном способе были основаны на применении механизированных комплексов. Требования к осушению заключались в обеспечении безопасных условий проходки горных выработок, исключении прорывов воды и обводнённых рыхлых пород при ведении подготовительных и очистных работ. Исследованиями установлено, что количество происходящих прорывов прямо пропорционально величине остаточных столбов воды в надугольных водоносных горизонтах. Условия формирования и количественные характеристики прорывов различны в зависимости от этапов ведения горных работ. При подготовительных и нарезных работах дебиты прорывов не превышают 30 $м^3$ /ч, время - 10 суток, количество выносимого песка - 100 $м^3$. При очистных работах дебиты прорывов достигают 100 $м^3$ /ч, время - до года. Более 75 % прорывов при ведении очистных работ приурочены к выемочным столбам, располагающимся на участках развития современной гидрографической сети [102]. Некоторые аномалии (по увеличению количества прорывов) приурочены к верховьям балок и их разветвлениям. Прорывы вод на отдельных шахтах снижают темпы ведения очистных работ и повышают себестоимость добычи угля на 20 % [103].

Факторы, учитываемые при проектировании технологии осушения, могут быть объединены в 5 групп:

- геологическое и гидрогеологическое строение участков месторождений;
- техника безопасности;
- экономика;
- уровень технического развития;
- технология ведения подготовительных и очистных работ.

Большинство угольных шахт в Подмосковном бассейне находились в сложных гидрогеологических условиях, характеризующихся распространением нескольких водоносных горизонтов (до 5). Водоносные

горизонты располагаются над, под и между угольными пластами, представлены они мелкозернистыми песками и известняками. В нижней части разреза (ниже угольных пластов) распространены упинский или девонский (известняки) и подугольный (пески) водоносные горизонты. Коэффициенты фильтрации известняков изменяются от 0,7 до 40 м/сут, песков - от 0,2 до 3 м/сут. В верхней части разреза залегают надугольный (пески), тульский и окский (известняки) водоносные горизонты. Коэффициенты фильтрации надугольных песков не превышают 3 м/сут, тульских и окских известняков достигают 200 м/сут, в среднем составляя около 10 м/сут. Все водоносные горизонты характеризуются резкой анизотропией фильтрационных свойств, отмечается также изменчивость напоров в плане от 2 до 40 м. Многослойное строение вмещающих уголь пород резко затрудняет технологию осушения и требует наличия детальной и достоверной информации обо всех гидрогеологических факторах (режим подземных вод, карст, взаимосвязь с поверхностными водами и т.д.).

Требования безопасного ведения горных работ заключались в исключении прорывов воды в горные выработки. Многообразие гидрогеологических условий и жёсткость требований вызвали необходимость разработки безопасных пределов осушения. Первые нормы осушения были предложены еще в 60-х годах [104], они базировались на имевшемся опыте и в качестве основного показателя использовался напор подземных вод в водоносном горизонте (табл.4.9). В дальнейшем было установлено, что все водоносные горизонты надугольных пород должны осушаться до остаточных напоров не более 0,5 м, в подугольных породах уровень должен быть снижен не менее чем на 1 м ниже подошвы угольного пласта.

Институтом ПНИУИ в результате многолетних наблюдений и исследований в 1979 году выпущены согласованные с надзорным органом новые нормы осушения [105]. Характерной особенностью предложенных норм является то, что они вырабатывались при анализе геомеханических, гидрогеологических и технологических факторов ведения подготовительных и очистных работ. Основные положения методики по обоснованию допустимых напоров заключались в следующем:

- обосновании норм осушения в зависимости от допустимого дебита прорыва воды;
- определении высоты зоны обрушения;
- определении высоты зоны водопроводящих трещин;
- учёте особенностей литологического состава водоупорных и водосодержащих пород;
- учёте стадий развития очистных работ;
- учёте фильтрационных свойств пород водоносного горизонта;
- определении норм осушения раздельно при ведении

Таблица 4.9. – Величина допустимого напора на подошву горной выработки (водоносного горизонта)

Технология водопонижения	Напор на подошву выработки, м						Напор на подошву водоносного горизонта, м					
	Водоносные горизонты											
	нижней части разреза						верхней части разреза					
	Упинский*	Девонский*	Подугольный*				Надугольный				Тульский	Окский
			Мощность водоупора в подошве выработок, м				Мощность водоупора в кровле выработки, м					
			<2,0	2,0	3,0	5,0	<2,0	2,0	3,0	4,0		
Предварительная (требуемый напор достигается до начала ведения горных работ)	0	0	4-5	6,0	10,0	15,0	4-5	5,0	7,0	10,0	5,0-6,0	Не установлены. Определяются конкретными условиями на месторождении
	Уровень снижается на 2-3 м ниже подошвы горных выработок											
Параллельная (требуемый напор достигается одновременно с ведением горных работ)	То же	То же	0 Уровень снижается ниже подошвы выработки	0	0	0	1-2	1-2	1-2	1-2	5,0-6,0	

* При наличии взаимосвязи между водоносными горизонтами уровень снижается на 2-3 м ниже подошвы горных выработок

подготовительных и очистных работ;

- обосновании технических возможностей снижения уровня подземных вод.

При разработке методики по такой схеме на основе экспериментальных данных был установлен ряд закономерностей, характерных для Подмосковного угольного бассейна. Выявлено, что развитие зоны обрушения главным образом определяется мощностью вышележащих пластов глин. Рыхлые и полускальные породы, при тех мощностях, которые встречаются в Подмосковном бассейне, мало влияют на высоту зоны обрушения. Наиболее вероятное нахождение верхней границы зоны обрушения находится на уровне, не превышающем расстояния от кровли угольного пласта, равного трём вынимаемым мощностям угля и отсчитываемым только по глинистым слоям независимо от количества и мощности прослоев других пород.

Надёжная защита от водопритоков в выработанное пространство обеспечивается, если над зоной обрушения имеется глинистый пласт, не пересекаемый на всю мощность водопроводящими трещинами. Высота зоны водопроводящих трещин определяется величиной деформации пород и пластическими свойствами глин, зависящими от степени их литификации.

При сопоставительном анализе данных по временному прослеживанию за развитием зоны обрушения на участках очистных работ и условиями возникновения прорывов воды было выявлено, что в начальный период ведения очистных работ вероятность прорывов выше, чем после формирования зоны обрушения. Наибольшая вероятность прорывов отмечается при продвижении механизированного комплекса на 2-6 м.

Вероятность прорыва воды и обводнённых пород в прямой зависимости находится от фильтрационных свойств; чем они выше, тем больше вероятность прорыва. В соответствии с этими закономерностями в обобщённом виде критерии для обоснования технологии осушения приведены в таблице 4.10.

Для подугольного водоносного горизонта в зависимости от мощности водоупора в подошве выработки уровень подземных вод должен находиться на отметках: ниже подошвы на I м; в пределах $h_д$; при больших мощностях глин естественного залегания понижение не производится.

В надугольных водоносных горизонтах уровень подземных вод при предварительном осушении снижается до остаточных напоров менее 10 м; при таких напорах начинается проходка подготовительных штреков, затем при параллельном осушении остаточные напоры могут снижаться до 2 м. При ведении очистных работ остаточные напоры рассчитываются по предложенным эмпирическим зависимостям и, в крайнем случае, при недостаточной мощности глин они уменьшаются до 0 (см.табл. 4.10).

Оценка экономических критериев в начальный период осушения

Таблица 4.10.- Величины допустимых напоров на подошву горной выработки (водоносного горизонта)

Технология водопонижения	Напор на подошву выработки, м			Напор на подошву водоносного горизонта, м	
	Водоносные горизонты				
	нижней части разреза			верхней части разреза	
	Упинский, девонский, подугольный*			Надугольный, тульский, окский	
	Мощность водоупора в подошве выработок, м			Мощность водоупора в кровле выработки, м	
	0	≤10	>10	Подготовительные работы	
				<1,0	≥1,0
1	2	3	4	5	6
Предварительная	Уровень снижается на 1 м ниже подошвы	$h_g = m\gamma \frac{L^2 n}{l^2} \sqrt{\frac{L_n}{l}} + 1$ $L_n = 1{,}45 \sqrt[5]{\frac{c^3 m^2}{\gamma^3}}$	Уровень может не понижаться	<10,0	<10,0
Параллельная	Уровень поддерживается на отметке на 1 м ниже подошвы	$h_g = m\gamma \frac{L^2 n}{l^2} \sqrt{\frac{L_n}{l}} + 1$ $L_n = 1{,}45 \sqrt[5]{\frac{c^3 m^2}{\gamma^3}}$	Уровень может не понижаться	≤2,0 с оставлением защитного целика	Шаг возведения крепи не должен допускать обрушения кровли

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3	4	5	6
				Очистные работы	
			$m_1 > \sum m_0 + m_н$ $\sum m_0 = 3m_b$	$m = \sum m_0 + m_н$	$m < \sum m_0 + m_н$
			$h_{дв} = h_{до} \frac{m_1}{\sum m_0 + m_н}$	$\frac{h_{до}^2}{\lg h_{до}} = \frac{70}{K}$ $2{,}0 \le h_{до} \le 10$ м	$h_д = 0$

Примечание:

$h_д$ – допустимый напор на подошву штрека, м; m – мощность пласта глин в подошве выработки, м; l - ширина обнажения водоупора в подошве штрека, м; $L_п$ – предельно устойчивая ширина обнажения водоупора в подошве штрека, м; γ - объёмный вес глины, тс/м^3; С – удельное сцепление глины, Па; m_1 – мощность глин над угольным пластом, м; Σm_0 – суммарная мощность пластов глин, вовлекаемых в зону обрушения, м; $m_н$ – мощность пласта глин над зоной обрушения, при которой не образуются водопроводящие трещины на всю мощность, м; m_b – вынимаемая мощность угля, м; $h_{дв}$ – допустимый напор на подошву водоносного горизонта при $m=\Sigma m_0+m_н$, м; К – коэффициент фильтрации песков, м/сут.

угольных шахт базировалась на выборе наиболее дешёвых вариантов. В последние годы такой подход был изменён, и при выборе технологии осушения учитывается необходимость создания оптимальных условий для ведения добычных работ механизированными комплексами /25/.

Техническое обеспечение технологии осушения основано на использовании серийно выпускаемого оборудования для сооружения водопонижающих, водопоглощающих и восстающих скважин, забивных фильтров. Проводились разработки по применению вращательного способа бурения с обратной промывкой для сооружения водопонижающих скважин [106].

Рассмотрим технологию осушения, которая использовалась в Подмосковном бассейне. Для осушения шахтных полей применяется комбинированный способ осушения. В начальной стадии для обеспечения безопасных условий при проходке подготовительных выработок применяется поверхностный способ. Структура системы осушения при поверхностном способе состояла из линейных рядов водопонижающих или водопоглощающих скважин, сооружаемых по контуру подготовительных выработок или защищаемого участка (блока). Ряды скважин размещались с учётом гипсометрии границ водоносных горизонтов, геоморфологических элементов рельефа и т.д. [107, 108]. Ввод скважин в эксплуатацию и понижение уровня в дренируемых горизонтах осуществляли с расчётом, чтобы на забое подготовительных выработок напоры были снижены до требуемых величин. В среднем скважины вводились в эксплуатацию за год до начала работ по подготовке выемочного столба.

Критериями применения водопонижающих скважин являются напоры, равные 15-20 м, и коэффициенты фильтрации не менее 2-3 м/сут. Для предварительного осушения тульских и окских известняков использовались водопоглощающие скважины [109]. Сброс воды осуществлялся в нижележащие карбонатные породы нижнего девона. Критерии эффективного использования водопоглощающих скважин следующие [109]:

- отношение водопроводимостей поглощающего и дренируемого пластов должно быть больше или равно 1;
- уровень воды в поглощающем слое при пуске и эксплуатации скважины должен быть ниже подошвы дренируемого пласта;
- толщина слоя гравийной обсыпки не менее 70 мм, гранулометрический состав её подобран из условия выполнения геометрического и гидродинамического критериев

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 8\text{-}15;\ V_д = I0^3\ K\left(\frac{d_{50}}{D_{50}}\right)^2,$$

где D_{50}, d_{50} - средние диаметры частиц гравия и песка, м;

K - коэффициент фильтрации песков, м/сут;

$V_д$- допустимая скорость движения воды в прифильтровой зоне, м/сут;

8-15 - числовые критерии.

Интенсификация водопонижения при использовании водопоглощающих скважин достигается различными способами повышения проницаемости прифильтровых зон (гидроудар, химическая обработка) и более совершенными конструкциями фильтров. Поверхностный способ осушения позволяет перехватить 40-50 % общего водопритока к выработкам на защищаемом участке.

Подземный способ осушения применяют по мере проходки подготовительных выработок. Структура системы осушения в основном представлена линейными рядами восстающих, наклонно-восстающих скважин и забивных фильтров для дренирования водоносных горизонтов, залегающих выше угольного пласта; дренажных канав и колодцев для осушения подугольного водоносного горизонта. Линейные ряды скважин располагались по выработкам положение которых определялось технологией ведения горных работ [110], или проходились специальные дренажные штреки [102, 111, 112]. Обычно в первом случае система осушения рассчитана на защиту единичного выемочного столба, во втором - защищается сразу часть шахтного поля (так называемое, опережающее осушение).

При защите единичного выемочного столба система осушения жёстко привязана к подготовительным выработкам (штрекам главных направлений и выемочным штрекам), из которых сооружаются восстающие и наклонно-восстающие скважины и забивные фильтры. Интенсификация осушения достигается увеличением количества скважин. Оценка критериев по увязке технологий осушения и ведения горных работ показала, что в этом случае на одну действующую лаву необходимо иметь 2-3 подготавливаемых выемочных столба, что увеличивало срок окупаемости капвложений и было экономически не выгодно [107].

Работами ПНИУИ было доказано, что при комплексной механизации выемки угля эффективным является использование при подземном способе схем опережающего осушения [112]. Внедрено три варианта схем (рис.4.12), анализ полученных результатов позволил обосновать рекомендации по условиям применения каждого из них (рис.4.13) [112, 113, 114].

По первому варианту структура системы осушения представляет незамкнутый прямоугольник, по трём сторонам которого сооружаются дренажные штреки с соответствующими дренажными устройствами. Два дренажных штрека 9 и 10 совпадают с подготовительными выработками принятой системы разработки, третий 11 проходится специально. Дополнительный дренажный штрек 11 опережает отрабатываемый выемочный столб 12 в направлении развития горных работ на расстояние,

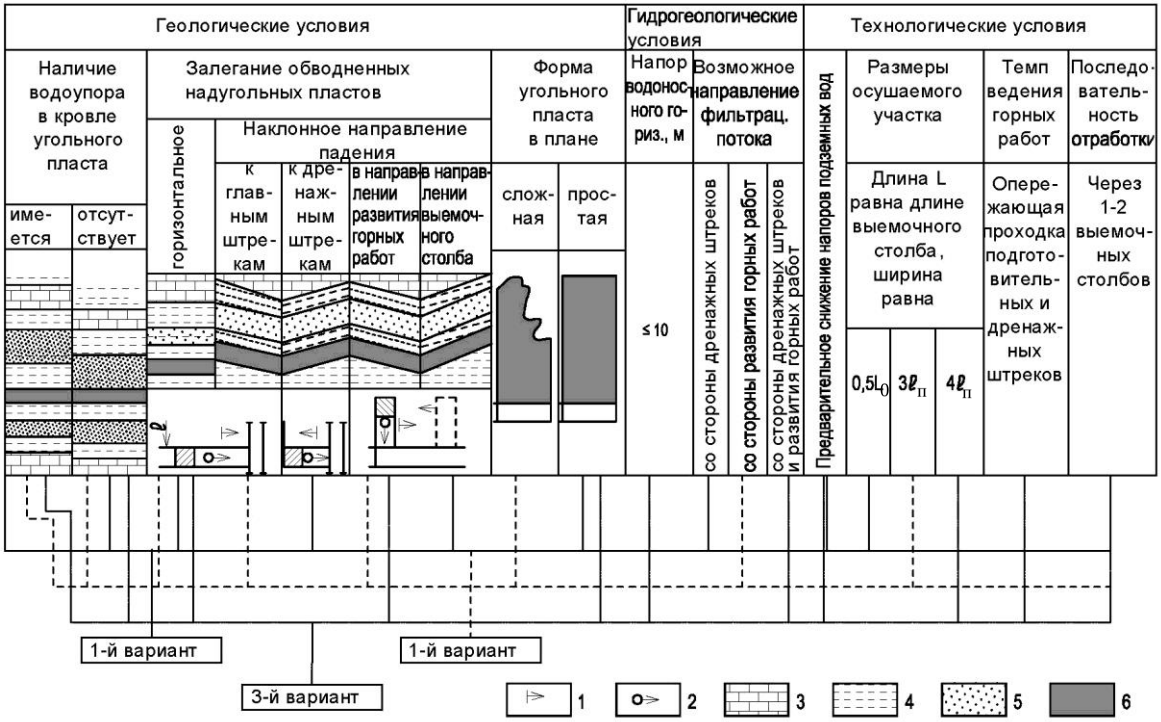


Рис.4.12. Условия применения вариантов опережающего осушения при механизированной добыче полезных ископаемых:

1 – направление падения водоносных пластов; 2 – направление движения механизированного комплекса; 3 – известняк; 4 – сланцы; 5 – песок; 6 – уголь

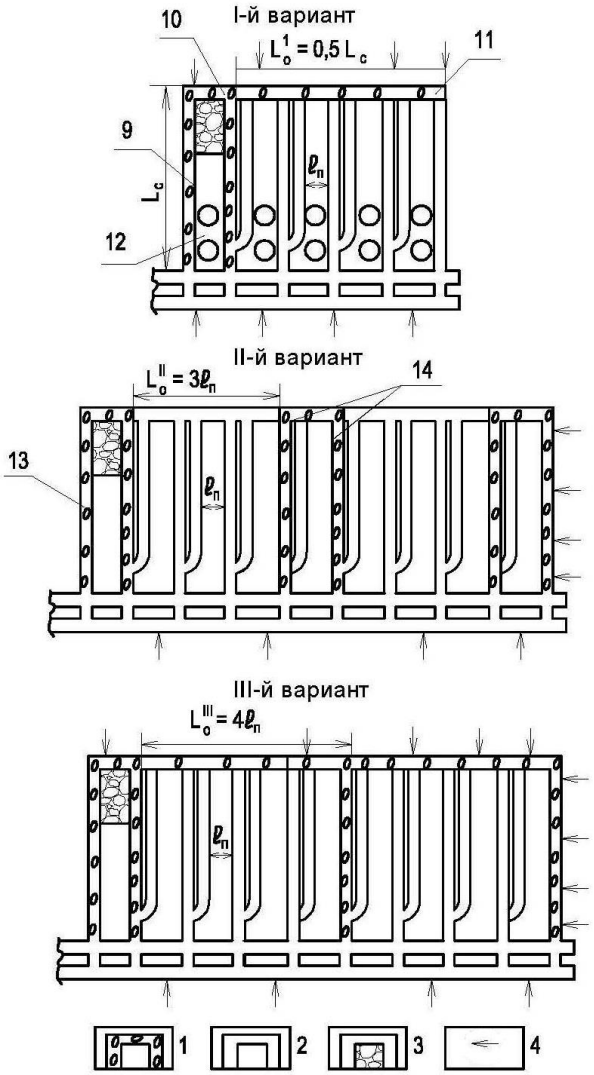


Рис.4.13. Технологические схемы опережающего блочного осушения:
1 – опережающие дренажные выработки, оконтуривающие блок;
2 – выработки, проводимые внутри блока; 3 – отработанная площадь;
4 – направление потока подземных вод

равное не менее 0,5 его длины (см.рис.4.12). Технология осушения эффективна при достаточно простой форме угольной залежи, направлении движения фильтрационного потока со стороны дренажных штреков и при падении водоносных пластов в сторону дополнительного дренажного штрека 11. Использование технологии осушения по первому варианту позволило получить на одной из шахт увеличение интенсивности осушения и выемки угля на 16-17 %.

Второй вариант был основан на сооружении опережающих дренажных штреков 14, параллельных выемочным штрекам 13 отрабатываемого столба. В принципе дренажные штреки совпадают с выемочными штреками намеченных к отработке столбов. Технология осушения должна обеспечивать опережающую проходку дренажных штреков на расстоянии не менее 3-х длин лав от отрабатываемого столба. Данный вариант эффективен при направлении фильтрационного потока со стороны участка развития горных работ.

В третьем варианте структура системы осушения основана на оконтуривании по периметру дренажными штреками угольной залежи или её части. Расстояние между дренажными штреками изменяется от равного длине выемочного столба до 4-х длин лавы. По рекомендациям ПНИУИ этот вариант эффективен при простой форме угольного пласта и различных направлениях движения фильтрационного потока. Технологическими условиями применения всех 3-х вариантов является опережающая проходка по отношению к первому отрабатываемому столбу штреков главных направлений и соответствующих дренажных штреков под защитой схем предварительного и параллельного осушения.

По данным работ [112, 115] использование опережающего осушения на шахтах Подмосковного бассейна позволило увеличить интенсивность горнопроходческих работ в среднем в 1,5 раза, осушения в 2,6 раза и выемки угля в 1,6 раза.

Имеются сведения об эффективном применении при подземном способе наклонно-восстающих скважин [116]. Использование их в схеме осушения на шахте "Щекинская" позволило сократить сроки осушения надугольных песков в 1,5-2 раза. Дебиты наклонно-восстающих скважин превышали дебиты забивных фильтров в 1,3-2,2 раза при коэффициенте фильтрации песков, равном 0,8-1,5 м/сут и начальных напорах от 5 до 10 м. Влияние обводнённости на технологические операции зависит от вида выполняемых работ и характера поступления подземных вод в горные выработки. Для очистных работ при рассосредоточенном притоке воды и его величине не более 5 $м^3$/ч производительность механизированного комплекса не снижается. Большую опасность представляют прорывы воды, которые зачастую сопровождаются выносом песка. Допустимый дебит прорыва, при

котором не возникали угрозы безопасности людей и выводу из строя очистных забоев, составлял 3,8 $м^3$/ч. Эта величина допустимого дебита прорыва использована при обосновании безопасных напоров в табл. 4.10. Потери добычи и рост себестоимости угля при прорывах возрастали до 20 % [103].

При ведении подготовительных работ обоснованные в табл. 4.10 пределы осушения обеспечивали безопасную работу горного оборудования, данных, указывающих на снижение эффективности его использования при поступлении подземных вод в забой выработок в проанализированных публикациях, нет.

Каковы же направления совершенствования технологии осушения на примере Подмосковного угольного бассейна?

Технология осушения и система осушения с учётом современных требований к ускорению научно-технического прогресса должны быть оптимальными по всем группам факторов: геолого-гидрогеологическим, техническим, экономическим,экологическим, охране и безопасности труда. Характерной тенденцией в Подмосковном угольном бассейне является развитие технологии опережающего осушения.

Очевидно, это останется главным направлением прогресса в защите горных выработок от подземных вод при использовании комплексной механизации добычи угля. Имеющиеся схемы опережающего осушения следует увязать с нормами осушения и параметрами технологии ведения горных работ.

Второе направление связано с необходимостью развития качественно нового подхода к использованию в технологии осушения методов интенсификации водоотбора. Возможности опережающего осушения без этих методов используются не полностью.

Технология осушения может учитывать дренирующую роль образующихся зон обрушения.

Как одно из направлений совершенствования технологии осушения следует рассмотреть задачу эффективного ведения горных работ при наличии обводнённых тектонических нарушений. В большинстве случаев возникающие трудности связаны с резким увеличением водопритока из трещиноватой зоны.

В целом направления совершенствования технологии осушения на примере Подмосковного угольного бассейна отражают технические решения, связанные с обеспечением безопасных условий ведения горных работ и с оценкой влияния обводнённости на технологические операции, комплексированием осушения с использованием технологий водоподавления на основе закрепляющих растворов.

4.6. Опыт защиты горных выработок от обводнения за рубежом

4.6.1. Состояние и перспективы развития технологии осушения шахтных полей за рубежом

Осушение угольных шахт использовалось в таких странах, как Венгрия, Польша, Чехия, Великобритания, США и других. Основная цель - обеспечение безопасных для горняков и эффективных условий эксплуатации горного оборудования. Исходя из этого, основное требование к процессу осушения заключается в исключении прорывов воды и обводнённых рыхлых пород в горные выработки. В последние годы в ряде стран большое значение стали приобретать вопросы охраны окружающей среды, и соответственно повысился интерес к системам осушения, позволяющим снизить негативное воздействие на подземные и поверхностные воды.

При обосновании мер по защите от подземных вод учитываются следующие шесть групп факторов: геологическое и тектоническое строение месторождения; экономика; техника безопасности; защита окружающей среды; система разработки; геотехногенез (изменение условий залегания месторождения под влиянием деятельности человека).

Первая группа факторов является главной, и от детальности её анализа зависит успешное преодоление трудностей, связанных с обводнённостью месторождения. Особое внимание при анализе факторов этой группы уделяется литологическому составу водонасыщенных и водонепроницаемых слоёв, геологической структуре месторождения, наличию дизъюнктивных и пликативных нарушений в залегании пород. По данным работы [117], в 80 % случаев водоприток в подготовительные горные выработки на угольных месторождениях определяется фильтрацией воды вдоль сместителей сбросов, в 16 % - по зонам повышенной трещиноватости и только в 4 % роль тектоники установить не удалось. Тектоническое строение района месторождения и гидрогеологические особенности обусловливают скорость и направление движения потока подземных вод, взаимосвязь между различными водоносными горизонтами. Считается, что для достоверной оценки обводнённости месторождения и при его разработке необходимо располагать картами мощностей водоупоров и водоносных горизонтов, изолиний уровней подземных вод, а также тектонической картой.

Экономика является решающим фактором при осуществлении осушения, когда необходимо свести к минимуму вероятность обводнения горных выработок. При экономической оценке важно установить влияние обводнённости на ведение горных работ. В статье [118] указывается, что попадание воды в забой может снижать сменную производительность труда

на 25 %.

В качестве альтернативных вариантов часто рассматривают оставление целиков или использование различных способов закрепления пород. Опыт ведения горных работ показывает, что если водоприток в выработанную зону угольного забоя меньше 1,8 $м^3$/ч, то изолирующая способность целика удовлетворительная. При водопритоках от 1,8 до 10,8 $м^3$/ч изолирующая способность достигает критических значений, а если водоприток больше 10,8 $м^3$/ч, то требуется осушение [119]. При ведении горно-проходческих работ и величинах водопритоков до 12 $м^3$/ч осушительные мероприятия могут не проводиться [120].

Защита окружающей среды связана в основном с выбором мероприятий при осушении угольных шахт, оказывающих минимальное влияние на уменьшение запасов подземных вод и загрязнение поверхностных водотоков и водоёмов. Заслуживают внимания предложения по согласованию проектов защиты горных выработок от обводнения с местными органами власти.

Выбор рациональной системы разработки при подземной добыче угля в сочетании с анализом факторов первой группы, по мнению ряда специалистов [120], позволяет в отдельных случаях отказаться от сооружения систем осушения (оставление защитных целиков, выемка угля в зонах отсутствия фильтрационных потоков подземных вод). При более общем подходе варьирование системами разработки позволяет обосновать оптимальную технологию осушения и особенно структуру системы осушения. Горные работы в ряде случаев могут приводить к возникновению трещин растяжения, по которым образуется гидравлическая связь между водоносными горизонтами и тем самым создаются условия для прорывов воды и песка.

Геотехнические факторы учитывают при ведении горных работ в районах нахождения старых заброшенных подземных выработок, а также при подсечении горными выработками различного рода скважин (разведочных, наблюдательных и т.д.). Особую опасность эти выработки представляют при наличии прямой связи с водоносными горизонтами и накоплении больших объёмов воды. В отдельных случаях потенциальную угрозу для разработки месторождения представляют и старые выработки, заполненные закладочным материалом.

Согласование требований к осушению угольных шахт и факторов, определяющих защиту горных выработок от подземных вод, позволяет зарубежным специалистам обосновать технологию борьбы с подземными водами в каждом конкретном случае. За рубежом широко распространён подземный способ осушения; в сложных условиях он сочетается с поверхностным.

В наиболее простом варианте защита горных выработок от подземных вод заключается в сооружении сети водоотводных канав. Основную нагрузку при этом выполняют гидроизоляция и тампонаж (так называемые пассивные меры борьбы). Особую ценность при осуществлении тампонажа приобретают анализ и постоянное уточнение факторов первой группы. Чаще всего этот вариант применяется при разработке каменноугольных месторождений.

В сложных условиях системы осушения состоят из скважин, пробуренных из горных выработок под разными углами наклона или с поверхности на соответствующих участках (активный дренаж). Это характерно в основном для буроугольных месторождений. В этом случае основная задача системы осушения состоит в снижении уровней подземных вод до такой степени, чтобы не было опасности обводнения выработок. Для таких систем, как правило, характерно региональное влияние на гидрогеологические условия района месторождения. Данный факт послужил причиной разработки новых методов, которые бы позволили частично снизить напоры только в непосредственной близости от горных выработок. Предлагается использование локальных систем расположения дренажных устройств, позволяющих формировать депрессионную воронку требуемых размеров практически одновременно с ведением горных работ. Этот метод наиболее перспективен в сочетании с различными приёмами по интенсификации водоотбора, однако он требует детального изучения природных факторов как вблизи горных выработок, так и в пределах образующейся депрессионной воронки.

Некоторые различия существуют в технологии осушения водоносных горизонтов, залегающих выше и ниже угольного пласта. Осушение вышележащих водоносных слоёв производится, как правило, предварительно с опережением во времени до 26 мес. по отношению к горным работам [120, 121, 122]. Интенсивность снижения уровня подземных вод в большинстве случаев обеспечивает снятие напоров до кровли водоносного горизонта с опережением по отношению к подготовительным работам, а осушение водоносного пласта до требуемых остаточных напоров – с опережением по отношению к добычным работам. Осушение слабопроницаемых пород приводит к замедлению скорости снижения уровня подземных вод, что вызывает необходимость использования методов интенсификации водоотбора. Наибольшее распространение получили вакуумирование и нагнетание сжатого воздуха.

При залегании водоносного горизонта ниже угольного пласта обычно обходятся снижением пьезометрического напора до величин, определяемых с учётом мощности и физико-химических свойств разделяющего защитного слабопроницаемого слоя. Для ускорения понижения уровня увеличивают число дренажных скважин и изменяют их конструкции.

В целом из методов интенсификации водоотбора заслуживает внимания нагнетание сжатого воздуха в пласт. При экстремальном опробовании этого метода на одной из шахт в Венгрии было получено увеличение расхода воды в 27,5 раза [123]. Нагнетание сжатого воздуха производилось в скважину, отбор воды осуществлялся в дренажных выработках. Режим нагнетания незначительно менялся во времени, что позволило установить ряд закономерностей, характерных для процесса осушения при использовании этого метода (рис. 4.14 и 4.15).

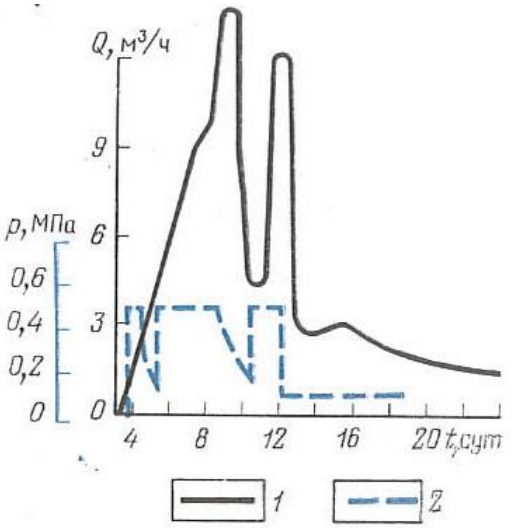


Рис. 4.14. Изменение водопритока Q (1)
и величины давления p (2) нагнетания сжатого воздуха во времени t

По мнению венгерских специалистов, нагнетание сжатого воздуха в водоносный пласт в значительной мере ускоряет процесс осушения. При этом следует учитывать, что сильное увеличение давления подаваемого воздуха может оказать неблагоприятное воздействие, так как оно приводит к неустойчивости расхода отбираемой воды. Для исключения этого явления рост давления по мере приближения к критической величине расхода должен производиться постепенно. Кроме того, как установлено при промышленных испытаниях этого метода российскими специалистами, необходимо учитывать состояние крепи горных выработок.

Показано, что использование схем опережающего осушения обеспечивает эффективную и безопасную добычу угля. Анализ практики эксплуатации угольных месторождений подземным способом в различных по

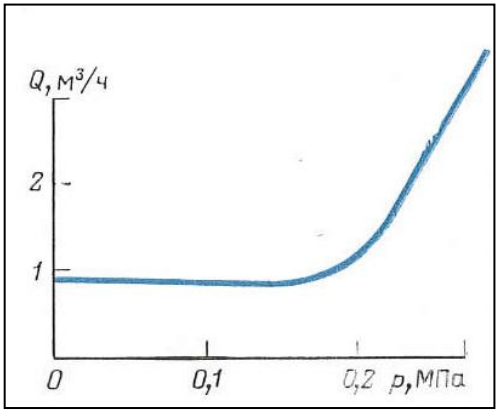


Рис. 4.15. Зависимость водопритока Q от давления p нагнетаемого воздуха

сложности гидрогеологических условиях свидетельствует, что борьба с подземными водами осуществляется эффективно при сооружении систем осушения из подземных горных выработок. Подземный способ осушения обеспечивает достаточную безопасность горных работ и надёжность в управлении процессом осушения при подземной добыче угля. Технология этого способа эффективно применяется при разработке горизонтальных, наклонных и крутых угольных пластов. Она позволяет добиваться снижения уровня подземных вод как в высоконапорных горизонтах, так и в безнапорных пластах небольшой мощности. При значительных площадях осушения и дренировании слабопроницаемых пород интенсификация водопонижения осуществляется за счёт сооружения высокопроизводительных дренажных устройств, вакуумирования и нагнетания сжатого воздуха под давлением, превышающим гидростатическое давление подземных вод.

Применяемая за рубежом технология осушения шахтных полей предусматривает сооружение дренажной системы и последующее формирование депрессионной воронки требуемых размеров. Схемы систем осушения зависят от технологии ведения горных работ. Практика показывает [124], что высокая степень защиты от подземных вод обеспечивается оперативным изменением как структуры системы осушения, так и схемы расположения горных выработок при добыче угля, а в отдельных случаях и переходом на новую технологию разработки месторождения.

Следующим направлением совершенствования технологии осушения является комплексное применение имеющихся методов и приёмов. Этот

принцип требует детальных сведений о факторах первой группы, чтобы обеспечить безопасность при проведении выработок только профилактическими методами или в более сложных условиях позволит применить опережающее осушение.

Немаловажное значение в совершенствовании технологии защиты от подземных вод имеет использование комбинированных систем, включающих осушение, закрепление грунтов, оставление целиков полезного ископаемого, сооружение водонепроницаемых и фильтрующих перемычек. Возможности технических решений в комбинированных системах, как правило, можно значительно расширить, особенно при предотвращении прорывов подземных вод в зонах тектонических нарушений, водопроводящих трещин, кавернозных пород. Следует отметить, что защита горных выработок цементацией за рубежом считается весьма перспективным способом.

В последние годы некоторыми исследователями [122] рассматриваются перспективы применения так называемой «мгновенной» защиты. Теоретически её применение обосновывается изменением уровня подземных вод и свойств защитного слоя (водоупора) при проведении запланированного быстрого понижения уровня воды (прорыва). Система осушения в этих случаях создаётся независимо от эксплуатационных и подготовительных выработок в предварительно пройденных для целей осушения изолированных выработок, в которые из водоносных горизонтов мгновенно выпускается вода в большом объёме. В дальнейшем часть воды, просачивающаяся через перемычки, удаляется обычными способами.

С учётом охраны окружающей среды основным направлением совершенствования технологии осушения является применение локальных систем осушения, которые обеспечивают снижение уровня подземных вод и (или) осушение пород на отдельных участках [125]. Подобные технические решения не связаны с региональным понижением уровня, поэтому требуют повышенной детализации геологического и гидрогеологического строения как на защищаемом участке, так и во всём рассматриваемом регионе. В таких схемах может быть использовано нагнетание в пласт сжатого воздуха.

На ближайшую перспективу технологические решения по совершенствованию подземного способа осушения на шахтах должны осуществляться в тесной взаимосвязи с системами ведения горных работ, особенно при плавной посадке кровли; соответствовать постоянному прогрессу в области механизации и автоматизации добычных работ; учитывать проблемы защиты локальных участков от влияния подземных вод, а также возможности создания схем защиты горных выработок, рассчитанных на комплексное использование процессов осушения и закрепления пород; способствовать дальнейшей модернизации технологии и

схем осушения при обеспечении охраны и рационального использования подземных вод; предусматривать методы интенсификации водопонижения.

Отмеченные тенденции технологии осушения полей угольных шахт за рубежом совпадают с основными направлениями этих работ в нашей стране. Комплекс рассмотренных вопросов позволяет особо выделить применение сжатого воздуха для интенсификации осушения и комбинирование цементации зон водопроводящих трещин с технологическими приёмами осушения горных пород [125].

4.6.2. Состояние и перспективы осушения угольных разрезов за рубежом

Осушение угольных разрезов за рубежом развито в таких странах, как Германия, Польша, Великобритания, Турция, США, Австралия. Затраты на осушение в некоторых странах, например, составляют 10-25% общих затрат на добычу полезного ископаемого на месторождении.

Требования к системам осушения и критерии оценки их эффективности формируются зарубежными специалистами исходя из применяемой технологии ведения горных работ, обеспечения надёжности, мобильности и гибкости дренажной системы, охраны окружающей среды. На всех рассмотренных месторождениях технология осушения полностью подчинена технологии добычных и вскрышных работ.

В последние годы возрастают требования к степени осушения и влажности пород, подлежащих экскавации. Это обусловлено высоким уровнем развития горнодобывающей техники и использованием технологии, позволяющей быстрыми темпами вести вскрышные работы по осушенным породам (применение роторных экскаваторов производительностью 3350 и 6600 $м^3$/ч). Осушение в этих условиях должно вестись интенсивно как во времени, так и в пространстве, то есть требуется быстрое и значительное снижение уровня подземных вод. Применение роторных комплексов и поточной технологии предусматривает максимальное осушение вскрышной толщи пород в пределах разреза в период его строительства и максимальный перехват потока подземных вод по контуру месторождения при ведении добычных работ. В связи с этим нередко возникает задача осушения слабопроницаемых пород и понижения уровня подземных вод ниже отметок ведения горных работ.

Существенное значение при выборе системы осушения отводится повышению эффективности всех технологических операций транспортных, погрузочных и взрывных работ, формирования откосов разрезов и отвалов пород. С этой точки зрения, по мнению американских специалистов, перспективным является сочетание схем опережающего и одновременно с ведением горных работ снижения уровня подземных вод [126].

Координирование всех требований и факторов, определяющих выбор систем осушения (геологические и гидрогеологические условия месторождения, способ и технология ведения горных работ, техника безопасности, защита окружающей среды, структурные особенности и условия эксплуатации системы осушения, уровень технического развития и материальное снабжение, экономические показатели), анализ накопленного опыта по разработке обводнённых месторождений угля приводят зарубежных специалистов к преимущественному обоснованию поверхностного способа осушения при опережающем снижении уровня подземных вод. Применяемые схемы основываются обычно на сооружении одно- и двухконтурных систем водопонижающих скважин, диаметр которых, как правило, превышает 800 мм. Обращает внимание практика создания рядов скважин не только за пределами границ разреза, но и внутри его на отдельных уступах бортов с расположением скважин на участках, позволяющих достичь максимальной степени осушения (разрезы в Польше, Австралии и США). Весьма показательными выглядят перевод большинства буроугольных разрезов в Германии на поверхностный способ осушения и те преимущества, которые были при этом получены [127, 128].

Поверхностный способ осушения в трактовке зарубежных специалистов является высокоманевренным и гибким благодаря успешному применению наряду со стационарными контурами водопонижающих скважин, схем на основе вспомогательных средств осушения (горизонтальных скважин, иглофильтров, отдельных водопонижающих скважин, дренажных канав и др.). Использование этих схем и средств позволяет в короткие сроки добиваться требуемой степени осушения на наиболее ответственных участках.

При поверхностном способе осушения успешно решаются вопросы сохранения качества откачиваемых подземных вод и недопущения их загрязнения. Именно по этой причине, а также в связи с большими затратами на очистку воды зарубежные компании и фирмы предпочитают данный способ осушения. В этом способе водопоглощающим скважинам отводится подчинённое значение. Объясняется это, видимо, отсутствием соответствующих гидрогеологических условий. Известно, что применение водопоглощающих скважин с целью сохранения запасов подземных вод является перспективным, и это признаётся большинством специалистов.

Рациональное ведение горных работ открытым способом предопределяет необходимость повышения всех технологических процессов, в частности, процесса осушения. Судя по существующим публикациям, способы и технология осушения буроугольных месторождений за рубежом в ближайшее время не претерпят коренных изменений. Основным способом осушения останется поверхностный, применение подземного способа

ограничивается из-за экономических соображений. Считается, что технология осушения при поверхностном способе даёт высокий результирующий эффект только в том случае, если она наиболее полно учитывает общую технологию ведения горных работ и подкрепляется соответствующим техническим оснащением. В соответствии с этим принципом происходит постоянное совершенствование структуры систем осушения, технологии, технических средств и вспомогательного оборудования. Модернизируются конструкции водопонижающих скважин, разрабатываются новые приёмы по их оборудованию и доводятся до совершенства конструктивные элементы водоприёмной части скважин. Большое значение в некоторых странах уделяется внедрению телемеханики и микроэлектроники для управления процессом осушения и осуществления контроля за работой погружных насосов [127, 128].

Технология осушения при поверхностном способе предусматривает одновременное или последовательное выполнение операций по сооружению дренажной системы и снижению уровня подземных вод. Различаются схемы осушения для разрезов с цикличной, циклично-поточной и поточной технологией разработки пород и угля. Соответствующие этим схемам системы осушения при практически постоянном наборе дренажных средств отличаются структурой, которая наибольшей сложности достигает при использовании высокопроизводительных роторных комплексов и поточной технологии ведения горных работ. Схемы осушения при поточной технологии основываются, как правило, на линейных или контурных рядах водопонижающих скважин и вспомогательных дренажных устройствах. Наблюдается стремление располагать дренажные устройства как можно ближе к контуру разреза и внутри его на отдельных уступах бортов. Создаются также локальные участки осушения вблизи действующих забоев и на забое разреза. Считается, что при этом существенно улучшаются технико-экономические показатели добычных и вскрышных работ.

Основное требование при разработке систем осушения при поточной технологии заключается в достижении максимально возможного снижения уровня подземных вод, т.е. полного удаления гравитационной воды из обводнённых пород до отметок ведения горных работ. Преимущества таких систем осушения очевидны. Различные модификации их структур обеспечивают хорошие условия для эксплуатации роторных комплексов. Отметим, что варианты систем осушения в данном случае полностью зависят от полноты и достоверности информации о геологическом и гидрогеологическом строении месторождения. Известно, что полное осушение водоносного горизонта при горизонтальном водоупоре невозможно, однако размещение дренажных скважин в пониженных участках подошвы обводнённых пород можно достичь высокой степенью

осушения. Существуют и другие приёмы для достижения максимальной степени осушения обводнённых пород. К ним можно отнести расположение скважин в зонах повышенной водопроницаемости, исключение гидравлических потерь в водоприёмной части дренажных устройств.

Известные трудности в выборе системы осушения возникают при увязке её с другими технологическими процессами, например, экскавацией породы. Экскавация породы приводит к подработке дренажных устройств, располагаемых на рабочих бортах или вблизи действующего забоя. В этом случае технология, предусматривающая демонтаж насосного оборудования, сооружение в скважине ниже отметки ведения горных работ цементной пробки, подрезание скважины экскаватором, разбуривание пробки, установку насоса и пуск скважины в эксплуатацию, позволяет сохранять скважины в рабочем состоянии длительный период. При качественном выполнении всех операций они повторяются на одной скважине до пяти раз [128, 129]. При цикличной технологии используются менее сложные системы осушения. Скважины размещают в соответствии с расположением дренажных устройств внутри разреза, учитывая при этом гидрогеологические особенности строения водоносных горизонтов.

Снижение уровня подземных вод может быть начато раньше или одновременно с горными работами. Эффективным считается применение обоих вариантов или их комбинации при максимальном использовании имеющихся технических средств.

При поточной технологии уровень подземных вод снижается очень быстро. Это требует сооружения высокопроизводительных дренажных устройств и использования различных методов интенсификации водоотбора (вакуумирование, сооружение скважин большого диаметра). Серьёзные трудности в снижении уровня подземных вод возникают при осушении слабопроницаемых рыхлых пород. Степень их осушения должна обеспечить не только устойчивость формируемых откосов, но и создать условия для высокопроизводительной работы роторного комплекса. Разрабатываемые технологические и технические новшества, как правило, приводят или к удорожанию работ по осушению, или недостаточно эффективны. В большинстве случаев снижение уровня подземных вод в слабопроницаемых породах осуществляется с помощью иглофильтров, эжекторных иглофильтров и вакуумирования.

Оценивая возможность использования для осушения слабопроницаемых грунтов электроосмос, американские специалисты приходят к выводу, что на настоящем этапе это нецелесообразно ввиду значительного удорожания системы осушения [130].

Определённые перспективы для осушения слабопроницаемых пород имеет технология, используемая при разработке угольных месторождений в

Великобритании. В соответствии с ней могут применяться дренажные колодцы, сооружаемые из пористых бетонных колец, с установкой в них насосов, эксплуатируемых в автоматическом режиме.

Снижение уровня подземных вод при цикличной технологии производится до определённого предела, который обосновывается в основном гидрогеомеханическими расчётами устойчивости уступов бортов или забоя разреза.

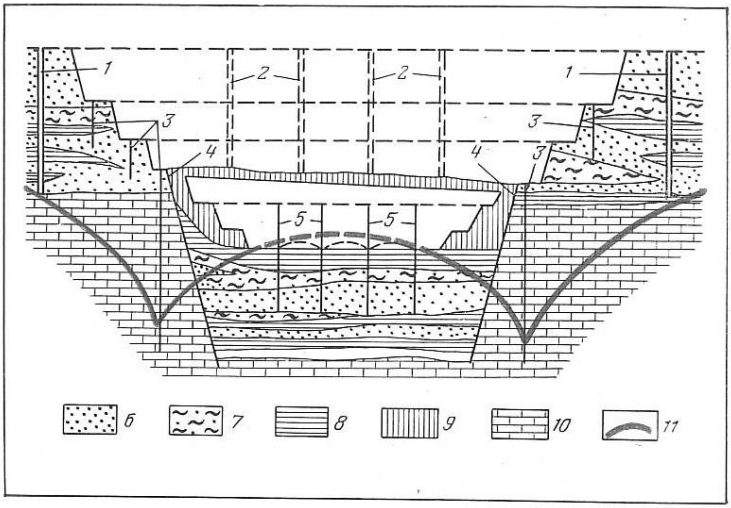
В последние годы при выборе технологии осушения серьёзные ограничения накладывают требования охраны окружающей среды. Уменьшение запасов подземных вод и ухудшение физико-химических показателей воды при попадании её в горные выработки затрудняют водоснабжение на базе подземных вод, приводят к снижению урожайности земледельческих культур и вызывают необходимость сооружения дорогостоящих очистных сооружений. С этой точки зрения осушение должно охватывать минимально возможную площадь распространения водоносного горизонта; технология осушения должна исключать загрязнение подземных вод.

С другой стороны, использование высокопроизводительного горного оборудования, углубление разрезов постоянно повышают требования к степени осушенности обводнённых пород. Рост мощности используемой горной техники связан с интенсификацией процесса осушения во времени и изысканием возможностей полного удаления гравитационной воды на обводнённых уступах.

Таким образом, возникает противоречие между естественными условиями протекания процесса осушения, стремлением вести работы в осушенных породах и необходимостью сохранения запасов и качества подземных вод. Следовательно, выбор эффективных систем осушения в будущем будет значительно осложняться взаимоисключающим влиянием данных факторов. При определении технологии осушения следует учитывать и возможности использования природных особенностей строения месторождения с целью получения максимального полезного эффекта при минимальных затратах. В качестве примера можно привести систему осушения на разрезе «Белхатув» в Польше [131]. Гидрогеологические условия Белхатувского буроугольного месторождения сложные. Они характеризуются наличием четырёх водоносных горизонтов с коэффициентами фильтрации 2 – 20 м/сут. При проектировании защиты разреза от подземных вод было учтено, что технологию осушения следует ориентировать на большие водопритоки из четвертичного и юрского водоносных горизонтов и слабую водоотдачу пород третичного возраста. Вскрышные работы и добыча лигнитов на месторождении производились роторными экскаваторами.

С учётом гидрогеологических условий, технологии разработки, технического уровня и экономики разреза был разработан поверхностный способ осушения с помощью глубоких скважин большого диаметра при опережающем снижении уровня подземных вод (рис. 4.16). Скважины располагались по контурам за пределами разреза и внутри его. Они сооружались в течение 2-3-х лет. Всего было оборудовано 380 скважин, из которых работало 320. Суммарная производительность скважин составила 23 400 м^3/ч. Коэффициент, учитывающий полезное действие системы осушения, равнялся 0,7; коэффициент расхождения проектных и фактических данных – 0,88 (против 0,8 по проекту, что объясняется низким качеством бурения). Производительность одной скважины в основном изменялась в пределах 70 – 240 м^3/ч при максимальной 510 м^3/ч.

Технология осушения предполагала последовательную эксплуатацию дренажных контуров. Скважины внешнего контура имели меньшую глубину; по мере снижения уровня подземных вод до предельных значений они отключались и в работу вводились скважины внутреннего контура, позволявшие достигать большей степени осушения.



Профиль водопонижения Белхатувского месторождения в ПНР:
1 — внешний дренажный контур; *2, 5* — скважины для осушения соответственно вскрышных пород и пород на дне разреза; *3* — скважина внутреннего дренажного контура; *4* — контур разреза; *6* — пески; *7* — песчано-глинистые породы; *8* — глина; *9* — уголь; *10* — известняк, *11* — сниженный уровень подземных вод

Рис 4.16. Система осушения Белхатувского месторождения

Эксплуатация системы осушения на разрезе «Белхатув» позволила перехватить около 99 % (при проектном задании 80-90 %) суммарного водопритока. Поступление воды на борт разреза составило 1-2 % общего её потока. При таком незначительном притоке число вспомогательных дренажных устройств (горизонтальных скважин, иглофильтров, дренажных канав и т.д.) было сведено к минимуму.

Применение данной технологии осушения на разрезе позволило значительно уменьшить размеры образующейся депрессионной воронки и тем самым снизить отрицательное влияние на окружающую среду.

Прогнозные оценки перспектив развития технологии осушения за рубежом показывают, что оно будет идти по пути совершенствования поверхностного способа. Можно выделить следующие основные направления совершенствования этого способа: разработка схем осушения глубоких разрезов; внедрение рациональной технологии; использование новейшего горного оборудования поточной технологии ведения горных работ; создание типовых схем осушения обводнённых уступов, развитие техники и технологии сооружения горизонтальных скважин в откосах бортов разреза и отвалах вскрышных пород; повторное введение в эксплуатацию водопонижающих скважин, подрезаемых при вскрышных работах; осушение слабопроницаемых пород; разработка схем осушения, основанных на использовании лучевых скважин; механизация и автоматизация управления процессом осушения. Большое значение будут иметь дальнейшая модернизация техники сооружения водопонижающих скважин, повышение объёмов и рентабельности использования дренажных вод, меры по охране окружающей среды [132].

4.6.3. Системы осушения месторождений руд чёрных и цветных металлов

Опыт осушения анализировали по отдельным месторождениям бокситов и меди в Венгрии, урана в Канаде, меди в США и Замбии, золота в Южной Америке.

Осушение шахтных и карьерных полей в этих странах проводится для обеспечения безопасных условий разработки месторождений при высокопроизводительной работе горного оборудования. Основные требования к процессу осушения - создание условий для исключения прорывов воды и обводнённых рыхлых пород в подземные горные выработки, деформаций бортов и уступов карьеров и обеспечение допустимых водопритоков в зону ведения горных работ. Реализация этих требований осуществляется при различных способах и разнообразии систем

разработки месторождений. Значение и роль осушения увеличиваются с ростом глубины ведения подготовительных, транспортных и добычных работ. Отмечается стремление к удешевлению стоимости используемых дренажных устройств и повышению надёжности эксплуатации.

Факторы, учитываемые при выборе технологии осушения на рассмотренных месторождениях, могут быть объединены в основном в семь групп: геологические, гидрогеологические и тектонические; техника безопасности; защита окружающей среды; система разработки; геотехногенез; уровень технического развития; экономика.

Первая группа факторов характеризуется широким диапазоном проявления. В неё включаются мощность и угол падения рудного тела, устойчивость и генетические комплексы пород, проницаемость, способность к карстообразованию, виды подземных вод, трещиноватость и др. Влияние этих факторов изменяется как по простиранию залежи, так и с глубиной, поэтому обеспечивается детальный анализ факторов в течение всего периода разработки месторождения. Устанавливаются их качественные и количественные взаимосвязи с обводнённостью пород, выясняется влияние на изменение технологии осушения. Экономические показатели при проектировании и осуществлении осушения сравниваются с показателями по применению методов закрепления пород для водоподавления [133]. Закрепление экономически выгодно в условиях защиты подземных горных выработок от водопритоков на локальных участках распространения обводнённых устойчивых трещиноватых пород [134, 135]. В большинстве случаев как при подземной, так и при открытой разработке используется технология осушения.

В последние годы целесообразность разных технологических вариантов осушения стала существенно зависеть от требований охраны водных ресурсов. Увеличение объёмов откачиваемых вод и интенсивности понижения уровня грунтовых вод обусловливает резкое изменение водного баланса на больших территориях, что по своим отрицательным последствиям, особенно в высокоразвитых странах, становится недопустимым при эффективной хозяйственной деятельности. Поиск оптимальных систем защиты месторождения от подземных вод в этих условиях связан с внедрением локальных схем осушения, позволяющих снижать уровень вблизи участка ведения горных работ, комплексным применением осушения и закрепления [136]. При расчётах систем осушения в отдельных случаях учитывают составляющие водного баланса региона и вводят ограничения на производительность откачки во избежание значительного ущерба окружающей среде [133].

На некоторых шахтах в Южной Африке с целью снижения угрозы интенсификации процесса карстообразования часть отбираемой из

водоносного пласта воды вновь в него возвращается [137].

Технология осушения на рассматриваемых месторождениях является полностью подчинённой технологии ведения горных работ. Взаимоувязываемые решения используются в случаях, когда, несмотря на принятые меры защиты, обводнённость начинает заметно снижать производительность горных работ.

Геотехногенные факторы учитывают при ведении горных работ системами с обрушением руды и вмещающих пород, подсечении горными выработками различного рода скважин, создании искусственных потенциальных источников питания подземных вод. Эти факторы не всегда определяются в полном объёме, однако их влияние обычно нарастает во времени и часто они служат причиной аварийных ситуаций [138]. Геотехногенные факторы приводят к росту водопритоков в горные выработки за счёт инфильтрации воды из хвостохранилищ, водохранилищ и гидроотвалов.

Уровень технического развития учитывается при выборе технических средств и отдельных конструктивных элементов дренажных устройств. Характерным примером являются данные, приводимые в работах [139, 140] по выбору конструкций дренажных скважин на карьерах Канады «Гертнер» и «Дейлман» (табл. 4.11 и рис.4.17).

Таблица 4.11 - Технико-экономические показатели по выбору конструкций дренажных скважин на карьерах «Гертнер» и «Дейлман»

Показатели	Диаметр скважины, мм		Эффективность конструкции скважин, %
	250	600	
Суммарные затраты на сооружение, %	100	183	-83
Дебит, %:			
начальный	100	325	+225
конечный	100	275	+175

Из таблицы 4.11 видно, что развитие техники сооружения скважин привело к незначительному росту затрат на увеличение диаметра, а с учётом эксплуатационных показателей был сделан вывод в пользу водопонизительных скважин большого диаметра (суммарная эффективность от их использования составляет +317 %). Сравнительные данные испытаний различных конструкций фильтров выявили преимущества фильтров типа «Джонсон». По эксплуатационным характеристикам они оказались равноценными другим типам фильтров с двойной гравийной обсыпкой [140].

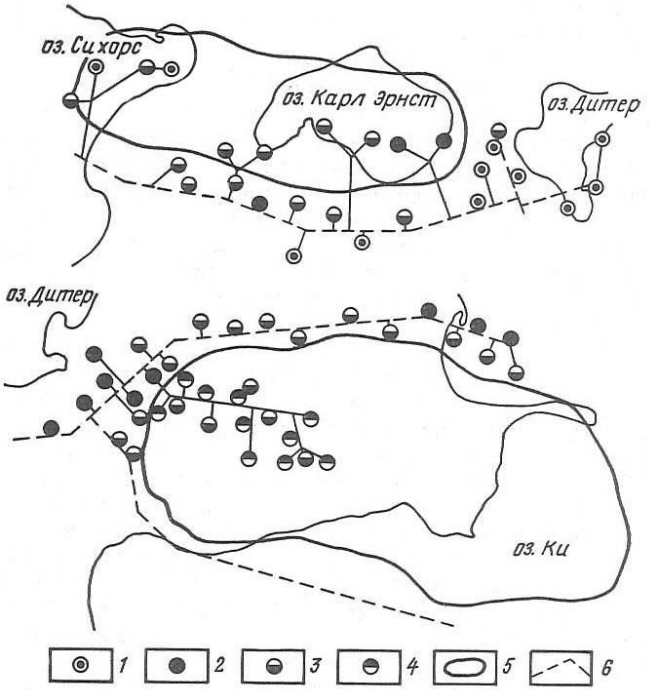


Рис.4.17. Расположение водопонижающих скважин на карьерах «Гертнер» и «Дейлман»: 1, 2, 3, 4 – скважины диаметром соответственно 600, 400, 250, 150 мм; 5 – контур карьера; 6 – дренажный контур

Анализ требований, факторов и технико-экономическое сравнение конкурирующих вариантов позволяют зарубежным предприятиям и фирмам выбирать рациональную систему осушения на каждом конкретном месторождении. При подземной разработке месторождений основное значение сохраняет подземный способ осушения. Технология его часто предусматривает постепенный переход от пассивных методов на небольших глубинах к активным методам при ведении работ на глубоких горизонтах. При пассивных методах используется цементация обводнённых зон, поступающая в выработки вода собирается в отстойники и откачивается на поверхность. Пассивные методы находят широкое распространение, чему способствуют устойчивость пород, тип подземных вод (трещинно-жильный), блоковый характер распространения водоносных пород.

При активных методах применяются восстающие и опережающие дренажные скважины. Схема расположения скважин увязывается или с

подготовительными выработками, или со специальными дренажными штреками и квершлагами. Технология осушения предусматривает опережающее дренирование обводнённых пород по отношению к проходимым горным выработкам и очистным работам [141]. Наиболее сложная технология осушения используется при ведении горных работ системами с обрушением руды и вмещающих пород. Иногда подземный способ при этих системах дополняется поверхностным (рис. 4.18). Такие системы осушения характерны для рудников «Нейрад» (Венгрия) и «Бэнкрофт» (Замбия). На руднике «Нейрад» основное значение в системе осушения имеют водопонижающие скважины, сооружаемые с поверхности [133, 142]. Глубина скважин составляет 200 м, диаметр - до 2 м. Скважины располагают по периметру осушаемого участка. В одной скважине устанавливают от одного до четырёх погружных насосов производительностью 180 $м^3$/ч каждый [133]. Применение такой схемы позволило существенно повысить безопасность ведения горных работ за счёт увеличения степени осушения водоносных пород. Производительность системы осушения была ограничена величиной, исключавшей негативное влияние на имевшиеся в регионе источники потребления подземных вод.

Из технологических приёмов, иногда используемых на руднике «Бэнкрофт», некоторый интерес представляет осушение карстовых полостей, заполненных обводнённым песчано-глинистым материалом. К такой полости подводят горную выработку, забой которой останавливают на расстоянии 5 м от стенки полости. На расстоянии 16-30 м от забоя сооружают перемычку. Продолжают проходку на 2-3 м, затем взрывают оставшийся слой и через перемычку дренируют взорванные породы и песчано-глинистый материал [135]. Метод трудоёмок и не всегда надёжен.

При открытой разработке руд цветных металлов схемы осушения основаны на использовании линейных и контурных рядов водопонижающих скважин, располагаемых как за бровкой карьера, так и на отдельных бермах уступов, что характерно при большой глубине карьеров (см.рис.4.17) [139]. Скважины обычно имеют большой диаметр (до 1 м). Расположение скважин позволяет учитывать гипсометрию подошвы водоносных слоёв. Из внутрикарьерных дренажных устройств применяют иглофильтровые установки, горизонтальные дрены и скважины. Высокой оценки, по мнению американских специалистов, заслуживает использование горизонтальных скважин для существенного уменьшения количества подземных вод, непосредственно принимаемых откосом борта карьера. Горизонтальные скважины располагают внутри карьера на отдельных уступах по контакту водонасыщенных и водонепроницаемых пород для осушения рабочих площадок или отвода воды из-за непроницаемых барьеров.

Расстояние между скважинами выбирается исходя из сложности

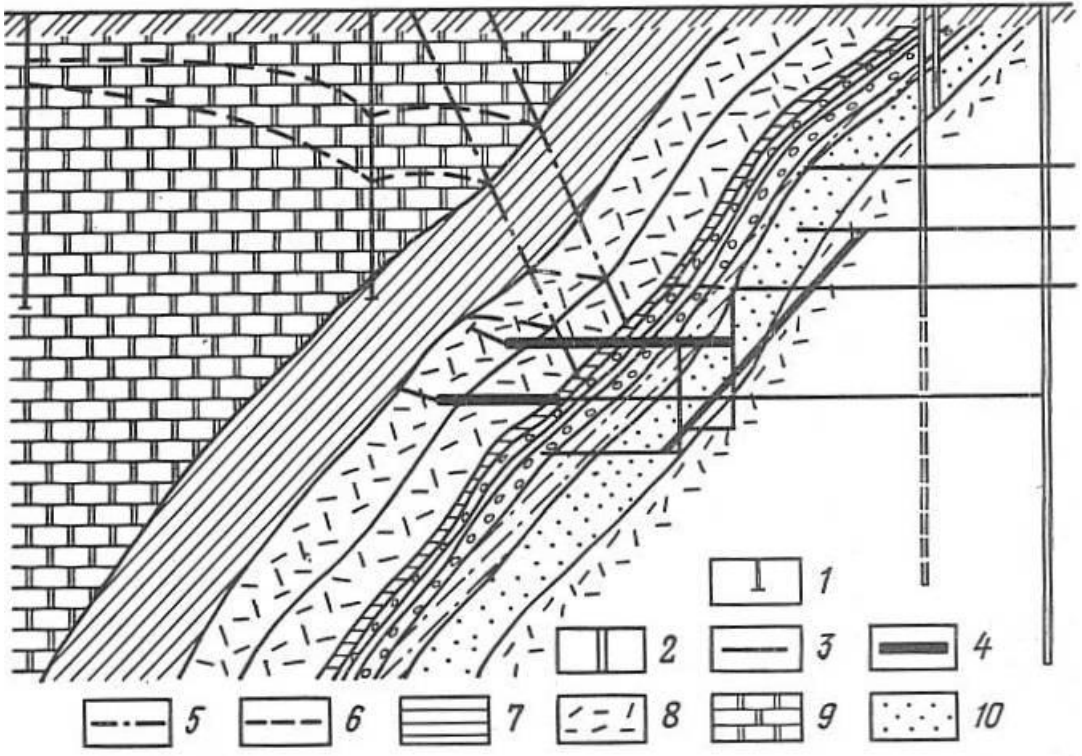


Рис.4.18. Геологический разрез и схема осушения на руднике «Бэнкрофт»:
1 – водопонижающие скважины; 2 – шахтные стволы; 3 – горные выработки; 4 – дренажные выработки;
5 – теоретическая линия обрушения; 6 – динамический уровень воды; 7 – сланцы; 8 – кварциты;
9 – доломиты; 10 - аргиллитовый песчаник

геологических и гидрогеологических условий. Практически установлено, что при расстоянии менее 3 м сооружение горизонтальных скважин становится экономически невыгодным, при расстоянии более 30 м не обеспечивается необходимая степень осушения. Длина скважин обычно не превышает величины, равной высоте уступа. В скважинах устанавливают фильтры из поливинилхлоридных труб. Затраты на сооружение горизонтальных скважин (по данным на 1979 г.) изменяются в мягких породах от 9 до 19,5 и в твёрдых - от 13,5 до 36 долларов на один метр. Применение горизонтальных скважин в системе осушения карьера «Йерингтон» позволило осушить зоны с повышенной водообильностью пород, исключить деформации уступов, повысить производительность горного оборудования.

Эффективная добыча полезного ископаемого обеспечивается в результате совершенствования всех процессов горнодобывающего производства. Анализ технических решений, применяемых за рубежом, даёт возможность выделить две основные тенденции, по которым развивается защита горных выработок от обводнения на разрабатываемых месторождениях руд цветных металлов.

Совершенствование систем осушения связано с созданием технологий, максимально учитывающих требования охраны окружающей среды. Особенно интенсивно это направление проявляется в высокоразвитых странах. Технические решения, разрабатываемые специалистами, основываются на комплексном применении осушения и закрепления пород. Схемы, основанные на совместном использовании этих способов, обеспечивают высокую эффективность защиты от подземных вод. Уменьшение водопритока в горные выработки из наиболее высокообильных зон достигается путём закачки цементных растворов по системам наклонно-восстающих скважин.

В отдельных случаях детально анализируются составляющие водного баланса, устанавливаются допустимые по экономическим последствиям его нарушения при учёте нанесения ущерба поверхностным водотокам и водоёмам, заболоченным участкам и т. д. Исходя из этого, ограничивается величина водоотбора системой осушения [133]. Снижение стоимости проводимых мероприятий обеспечивается в результате рационального использования откачиваемой воды при удовлетворении потребностей в ней других отраслей хозяйства.

Технические решения основываются также на сочетании региональных и локальных систем осушения в пределах одного месторождения. Специалистов привлекает более низкая стоимость этих систем по отношению к закреплению пород нагнетанием цементных растворов. При подземной разработке месторождений локальное осушение основано на использовании восстающих скважин, сооружаемых на участках

распространения высокопроницаемых пород. При открытом ведении горных работ локальное осушение осуществляется с помощью вертикальных и горизонтальных скважин, располагаемых на площадках уступов карьеров.

Второе направление в развитии технологии осушения обусловлено постоянным прогрессом в механизации и автоматизации горнодобывающего производства. Разрабатываются и внедряются системы с автоматическим управлением эксплуатацией водопонижающих скважин, что позволяет постоянно контролировать ход водопонижения. Дистанционное управление работой скважин даёт возможность эффективно поддерживать требуемую величину понижения уровня подземных вод.

Обобщающая сравнительная оценка технологии осушения на рудных месторождениях в нашей стране и за рубежом показывает, что общий уровень развития технологии осушения в нашей стране не уступает зарубежному. Однако в нашей стране необходимы проработки по созданию техники осушения, которая позволяла бы сооружать глубокие водопонижающие скважины диаметром до 1 м и более. Применение таких скважин требует повышения надёжности используемого насосного оборудования. Заслуживает также внимания сочетание осушения и закрепления пород.

Более широкое внедрение на предприятиях должны найти локальные схемы осушения, основанные на использовании горизонтальных и наклонно-восстающих скважин. Технические решения по осушению откосов карьеров горизонтальными скважинами и участков ведения горных работ на подземных рудниках наклонно-восстающими и восстающими скважинами позволяют снизить эксплуатационные расходы и оперативно влиять на степень осушения пород на требуемых направлениях. Необходимо отметить также, что при выборе параметров системы осушения более детально следует анализировать водный баланс региона, оценивать рациональную степень осушения с позиций допустимого нарушения экологического равновесия и сравнивать её с требуемой для эффективного ведения горных работ. В случае сильного несовпадения этих величин в технологию осушения должны быть внесены соответствующие коррективы.

4.6.4. Технологические приёмы осушения слабопроницаемых рыхлых пород

Анализ зарубежного опыта осушения слабопроницаемых грунтов и рекомендации по использованию отдельных положений представляется весьма репрезентативным для многих объектов на предприятиях РФ.

Осушение слабопроницаемых грунтов (с коэффициентом фильтрации менее 10^{-3} см/с) представляет сложную задачу, решение которой необходимо

для эффективного выполнения отдельных технологических операций в разных отраслях производства: горнодобывающей, земледелии, гидротехнической, строительстве и других. При ведении горных работ осушение слабопроницаемых грунтов выполняется для улучшения их прочностных характеристик и повышения эффективности использования современной горнодобывающей техники. Осушение слабопроницаемых пород на карьерах и подземных рудниках характеризуется условиями: мощность осушаемого массива превышает десятки метров; увязка с технологией ведения горных работ; надёжность работы дренажных устройств. К числу слабопроницаемых пород в горнодобывающей отрасли относятся и обводнённые рыхлые руды, при разработке которых также требуется выполнение дренажных мероприятий.

В РФ и за рубежом разработано несколько методов, применение которых является эффективным в отдельных разностях пород и при определённых горно-строительных операциях. Большинство из имеющихся методов приводят к заметному повышению стоимости работ по осушению, и поэтому специалисты неохотно соглашаются на их использование. В последние годы за рубежом опробовано несколько методов осушения слабопроницаемых грунтов, основные достигнутые результаты представляют некоторый интерес и для отечественной практики.

Рассмотрим вначале методы, применяемые в горнодобывающей и строительной отраслях.

Технология осушения слабопроницаемых грунтов в ФРГ основана на использовании локальных схем осушения, основой которых являются иглофильтровые установки и (или) водопонижающие скважины большого диаметра.

В грунтах с коэффициентом фильтрации, равным 10^{-5}-10^{-7} см/с применяется вакуумный дренаж с помощью иглофильтровых установок. Иглофильтры устанавливаются через 1-2 м, рабочая величина вакуума составляет 0,03 - 0,04 МПа, время работы установок до наступления стационарного режима фильтрации - до 4-х недель. При такой технологии осушения высота нарезаемых уступов на бортах не превышает 6 м.

Осушение слабопроницаемых грунтов с коэффициентом фильтрации 10^{-5}–10^{-6} см/с возможно с использованием скважин большого диаметра. В скважинах сооружается мощная гравийная обсыпка с увеличенным против оптимального размером частиц гравия и устанавливается фильтр диаметром до 3-х раз меньше диаметра скважины. Такие скважины являются ёмкостями-накопителями воды, откачиваемой затем насосами, работающими в автоматическом режиме (включение-отключение). Срок эксплуатации скважин ограничен временем кольматажа гравийной обсыпки и обычно не превышает нескольких недель [143].

Осушение водонасыщенных слабопроницаемых пород, складируемых в отвалах, являющихся основанием отвала или образующих уступ борта карьера, может производиться дренажными колодцами из перфорированных бетонных колец (диаметром 1м и высотой 2 м). Дренажный колодец выводится на поверхность по мере его обратной засыпки, в нём устанавливаются насосы и затем ведётся отбор подземных вод [144].

Для осушения слабопроницаемых грунтов в США ведутся разработки по совместному применению эжекторных иглофильтровых установок, песчаных дрен и уплотняющих пригрузок. Иглофильтры размещают в предварительно сооружённых и заполненных песком вертикальных дренах. Поверхность грунта покрывается непроницаемой тканевой мембраной, на которую при создании вакуума в пласте действует атмосферное давление. Давление передаётся на грунт, в результате он уплотняется, происходит отжатие воды в песчаные дрены и этим интенсифицируется процесс осушения [145].

При осушении грунтов с коэффициентами фильтрации в пределах 10^{-7}-10^{-8} см/с используются специальные способы: электроосмос и вертикальный дренаж на основе фитильновых элементов (геодрен) [146, 147].

Электроосмос эффективен для осушения илов, суглинков, иловатых глин. Технология осушения заключается в установке в обводнённых породах металлических электродов (анодов) и дренажных устройств (катодов), на которые подаётся постоянный электрический ток. Под влиянием электроосмоса вода движется по порам в направлении к катоду и затем откачивается на поверхность. В статье [147] приведены результаты осушения илов при строительстве моста. На участке шириной 61 м было установлено 4 ряда электродов. Два ряда с глубиной 24 и 43 м и два ряда -15 и 18 м. Эксплуатация осуществлялась в течение 3^{x} месяцев. Дебит откачки составлял 4,5 $м^3$/ч, всего из пласта было удалено около 4 % воды. Понижение уровня составило 10-12 м. В результате такого осушения были ликвидированы оползневые явления на откосе.

Вертикальный дренаж с помощью геодрен применяется в илах, илистых глинах, не подвергавшихся длительной консолидации [147]. Впервые геодрены были опробованы в Швеции. В настоящее время выпускаемые фирмами геодрены состоят из пластмассового каркаса, обвитого снаружи волокнистым материалом (рис. 4.19). Ширина элемента геодрены составляет 100 мм, толщина от 3 до 6 мм. Геодрены устанавливают с песчаной обсыпкой для интенсификации притока воды. Максимальная производительность одной дрены достигает 0,05 $м^3$/сут. Достоинства геодрен, по мнению зарубежных специалистов, заключаются в простоте установки, надёжности конструкции, экономичности. Установку геодрен в грунт производят задавливанием при приложении статической или

динамической нагрузки. По данным статьи [147] оба метода приводят к получению идентичных эксплуатационных характеристик дрен.

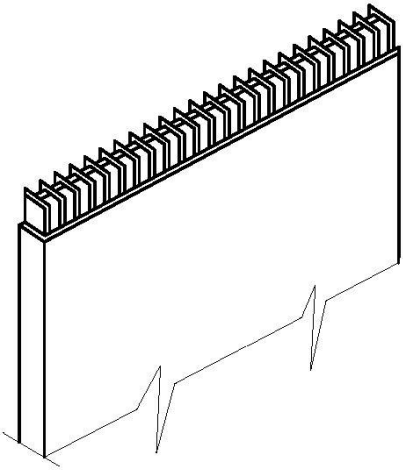


Рис.4.19. Готовая к употреблению фитильновая дрена

В качестве примера использования геодрен можно указать на укрепление откоса при строительстве плотин. Геодрены использовались в комплексе с водопонижающими скважинами (рис. 4.20). С помощью водопонижающих скважин понижался уровень в подстилающих обводнённых песках. В вышележащем слое иловатых глин по треугольной схеме с расстоянием 2 м друг от друга были установлены геодрены. Установка осуществлялась оборудованием фирмы "Родио". Производительность работ составляла примерно 3000 м/сут. Геодрены заглублялись на 17 м в глины и на 0,5 м в подстилающие пески. Через 4 месяца после установки геодрен была достигнута осадка осушаемого грунта на 0,33 м, что составляло 70 % от общей, на 30-70 % увеличилась прочность грунта на сдвиг. До осушения предел прочности на сдвиг составлял от 15 до 40 кПа.

Применение геодрен для осушения слабопроницаемых грунтов считается за рубежом более предпочтительным по сравнению с электроосмосом.

При развитии технологии осушения слабопроницаемых грунтов в горном деле могут представить интерес имеющиеся за рубежом достижения по сооружению горизонтального дренажа в почвенном слое [148]. Горизонтальные дрены в наиболее сложном варианте состоят из канавы (щели), обсыпки и фильтра. Эффективность дрен полностью зависит от

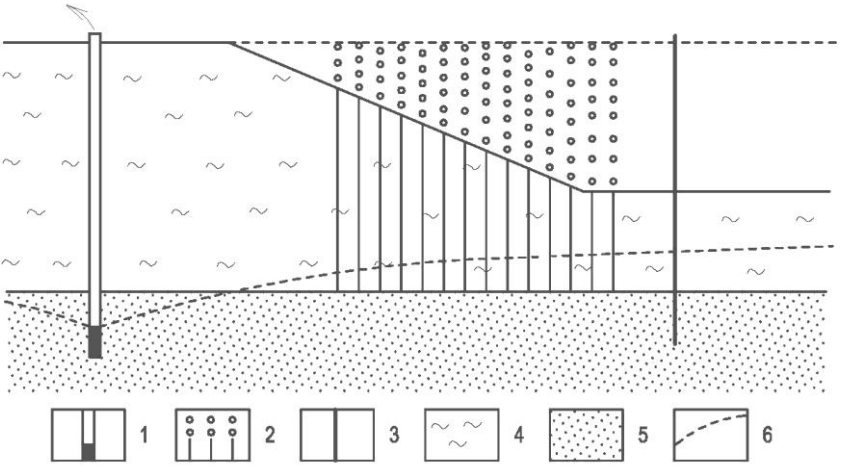


Рис.4.20. Поперечное сечение участка установки дрен:
1 – водопонизительная скважина; 2 – дрены; 3 – пьезометр;
4 – глина; 5 – песок; 6 – динамический уровень подземных вод

правильного подбора обсыпки и фильтра, которые должны обеспечить защиту от суффозии, кольматации и заиления, улучшение условий притока грунтовых вод в дрену, снижение входных градиентов напора, уменьшение осадкообразования в прифильтровой зоне, то есть требования, достаточно близкие по отношению к таковым для конструкций водоприёмной части дренажных устройств на горных предприятиях.

На основании исследований по защите дрен от заиления в Чехословакии сформулировали следующие требования (табл.4.12), которые определяют необходимость в устройстве обсыпок.

При сооружении обсыпки рекомендуется выполнить условия

$$\frac{K_2}{K_1} \le 100 ,$$

при установке фильтра -

$$\frac{K_\phi}{K_1} \le = 10 - 100.$$

K_2, K_1, K_ϕ - коэффициенты фильтрации обсыпки, грунта и фильтра соответственно, м/с.

Таблица 4.12 - Критерии защиты дрен в почвах

Возможные негативные явления	Тип грунта	
	Несвязные грунты, число пластичности <7	Связные грунты, число пластичности 7
Просыпание	$\frac{D_{85}}{d_{отв}} \geq 0{,}6$	-
Оплывание, заиливание	$\frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$ $J_{доп}=0{,}5$	-
Оплывание, суффозия	$5 \leq \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 12$ $J_{доп}=0{,}4$	-
Суффозия	$\frac{d_{60}}{d_{10}} > 12$ $J_{доп}=0{,}2$ и меньше	-
Неустойчивость к фильтрационным деформациям	-	$J = \frac{N}{N_1} < 0{,}5$
Оплывание	-	Wт<ППВ
Заиливание	-	Wт<10% ППВ d=(0,01-0,1)>40% по весу

Примечание:

N, N_1 - содержание фракций мельче 0,002 мм и 0,01 - 0,1 мм соответственно;

d -ширина водоприёмного отверстия, мм;

d_{85}, d_{60}, d_{10} - диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 85, 60 и 10 % по массе соответственно;

$J_{доп}$ - допустимый градиент напора при входе воды в дрену, исключающий соответствующее явление;

Wт - влажность предела текучести, *%;*

ППВ - естественная влажность, *%.*

Практикой установлено, что тонкослойный фильтр высокой проницаемости более эффективен, чем фильтр, имеющий большую толщину, но малую проницаемость.

Наиболее сложно решаются вопросы борьбы с осадкообразованием на дрене. Большая часть осадка представлена гидроокисью железа. В разных странах для борьбы с ним используют крупнозернистые обсыпки, органические материалы, промывку.

Фильтры при устройстве горизонтальных дрен выполняются из гибких пластмассовых, гончарных, поливинилхлоридных и гофрированных труб. Трубы могут иметь защитное покрытие в виде слоя песка, гравия или стиромуля.

Обсыпки горизонтальных дрен выполняются из органических, минеральных, искусственных и синтетических материалов (рис.4.21).

Обсыпки из органических материалов (торф, опилки, гумусовая земля) обеспечивали увеличение дренажного стока, уменьшали осадкообразование солей железа (опилки). Основными недостатками являлись недостаточная сыпучесть, анаэробное микробиологическое разложение с образованием плотной слабопроницаемой массы, короткий срок службы, кольматация сульфидом железа.

Обсыпки из минеральных материалов получили самое широкое распространение. Наиболее часто применяются обсыпки из песка и гравия. По имеющимся данным обсыпки из гравийно-песчаных смесей повышают производительность дрен на 60, из гумусовой почвы на 50 и из соломы на 40 %. Наиболее сложный вопрос в применении гравийно-песчаных обсыпок - это подбор гранулометрического состава.

Рис.4.21. Материалы обсыпок горизонтальных дрен

Считается, что кривая грансостава обсыпки должна проходить выше и параллельно кривой грансостава осушаемого грунта. Критерии подбора гранулометрического состава обсыпок характеризуют соотношение различных диаметров частиц обсыпки и грунта. В Польше для подбора обсыпок рекомендуются соотношения:

$$3d_{85} \geq D_{15} \geq 4d_{15}. \quad (4.1)$$

В Чехословакии при подборе состава обсыпок используют показатели:

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25; \quad \frac{D_{15}}{d_{15}} > 4\text{-}5; \quad \frac{D_{85}}{d_{15}} < 4\text{-}5. \quad (4.2)$$

В США используют соотношения:

$$D_{50}(12\text{-}58)d_{50}; \quad D_{15} = (12. . .40)\, d_{15} \quad (4.3)$$

$$D_{15} < 5d_{85}; D_{85} \geq 0{,}5d_{отв} \quad (4.4)$$

$$\frac{D_{60}}{d_{10}} \leq 4 \text{ (для гравия)}; \quad \frac{D_{60}}{d_{10}} \leq 6 \text{ (для песка)} \quad (4.5)$$

где d_{85}, d_{15}, d_{50} - диаметр зёрен дренируемого грунта, меньше которых содержится 85, 15 и 50 % зёрен по весу соответственно;

D_{15}, D_{50}, D_{85}, D_{10}, D_{60} – диаметр зёрен обсыпки, меньше которого содержится 15, 50, 85, 10, 60 % зёрен по весу;

$d_{отв}$ - диаметр отверстий фильтра, мм.

Толщина обсыпки подбирается в соответствии с данными табл.4.13.

Таблица 4.13 - Подбор толщины слоя обсыпки в горизонтальных дренах

Соотношение диаметров обсыпки и грунта, D_{50}/ d_{50}	Толщина слоя обсыпки, см
1	2
< 12	1,3 -2,5
12-24	8
24-28	15
28-40	23
40-52	30

Отметим, что гранулометрический состав обсыпок, используемых в горизонтальных дренах при осушении слабопроницаемых грунтов, по своим показателям отличается от состава обсыпок, рекомендуемого для дренажных устройств при осушении водоносных горизонтов, представленных рыхлыми породами. Как правило, для обсыпок в слабопроницаемых грунтах используется более крупнозернистый песок или гравий.

Опыт использования известняковой крошки для обсыпок свидетельствует о быстрой кольматации дрен солями железа.

Обсыпки из искусственных материалов используются достаточно редко в связи с повышенной их стоимостью. Из синтетических материалов некоторое распространение получил стиромуль - смесь эластичных хлопьев размерами 4-16 мм или шариков вспененного полистирола. Применение стиромуля в разных условиях дало хорошие результаты.

Большое применение для осушения слабопроницаемых почв за рубежом получили фильтры из пластмассовых труб с защитным покрытием из волокнистых материалов. При небольшом периоде работы дрен (2-3 года) используется покрытие из соломы, льняной костры, кокосового волокна, жгутов из пеньки и т.д. К достоинствам этих материалов относят дешевизну, способность снижать интенсивность осадкообразования, высокие защитные свойства. Недостатками является недолговечность работы, разложение в анаэробных условиях с закупоркой отверстий фильтра. Фирма "Ольтманс" (ФРГ) выпускает фильтр из соломы и опилок древесины с повышенным содержанием дубильных веществ, которые переводят железо в растворимое состояние, что способствует его выносу из дрены.

Из искусственных минеральных волокнистых материалов применялись стекловата и стеклохолст. В последние годы имелась тенденция к сокращению их использования в связи с несоответствием требованиям охраны труда и интенсивной кольматацией.

Их синтетических волокнистых материалов применяются нейлоновые ткани, полипропиленовое волокно, полиэфирное волокно (холст "бидим"), холсты "тинар", "мирафи 140" и др. По данным специалистов ФРГ большинство фильтров из синтетических материалов подвержены кольматации солями железа в большей степени, чем гравий, песок, солома. По данным американских фирм холсты типа "мирафи 140" и "тинар" кольматируются в меньшей степени, чем разнозернистые песчаные фильтры. Нетканый фильтрующий материал "файтербекс", состоящий из полипропиленового (95 %) и полиэфирного (5 %) волокон, эффективен при дренировании грунтов, содержащих железистые воды. С позиций использования опыта осушения слабопроницаемых грунтов для дренирования пород при ведении горных работ на предприятиях РФ можно сделать выводы:

1. Применимы общие принципы и критерии подбора гранулометрического состава обсыпок дрен.

2. При сооружении для осушения слабопроницаемых пород узкотраншейных дрен, горизонтальных и лучевых скважин применимы конструктивные разработки по предотвращению заиления дрен, кольматации солями железа и суффозии.

3. В качестве материала обсыпки может использоваться полистирол и вспененный полистирол.

4. В конструкциях иглофильтров целесообразно использовать синтетические материалы.

5. В конструкциях узкотраншейных дрен могут найти применение гибкие пластмассовые фильтры.

6. При сооружении горизонтальных лучевых скважин для осушения слабопроницаемых грунтов целесообразно использовать фильтры на основе полиэтиленовых, поливинилхлоридных труб с покрытием фильтрующими элементами из полиэтилена.

7. Для осушения слабопроницаемых грунтов применимы иглофильтровые установки, скважины большого диаметра, колодцы из перфорированных бетонных колец. Необходимы опытные работы по использованию геодрен для осушения слабопроницаемых грунтов на объектах горных предприятий.

ГЛАВА 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ЛУЧЕВЫХ ДРЕНАЖЕЙ

Ранее отмечалось, что для осушения подтопленных территорий и решения других инженерно-технических задач, связанных с водопонижением в строительстве, перехватом загрязнённых подземных вод хвосто-шламохранилищ, водоснабжением населённых пунктов и предприятий, защитой бортов карьера от обводнения институтом ВИОГЕМ была разработана технология отбора подземных вод из водоносных горизонтов горизонтальными скважинами, сооружаемыми из шахтных стволов глубиной до 20 м. Метод был назван лучевым дренажом. Исследования велись по направлениям:

– разработка технических средств и технологий сооружения горизонтальных дренажных скважин в различных гидрогеологических условиях;

- разработка технических средств и технологий сооружения шахтных стволов в различных гидрогеологических условиях;

- теоретическое обоснование параметров лучевого дренажа (количество лучевых дренажей на защищённом объекте, лучевых скважин, ярусов, длина, угол заложения скважин).

Исследования по первому и второму направлениям решили задачу по оптимизации конструкции буровой установки, позволяющей с учётом мировых технологий вести бурение скважин в шахтном стволе диаметром 4,0 м в свету. При разработке технических средств по сооружению шахтных колодцев важное место занимали вопросы компактности оборудования, за счёт которых в условиях плотной городской застройки решаются задачи размещения его и ведения строительно-монтажных работ на площадке размером не более 30х30 м.

С целью исключения зависимости от климатических условий, возможности ведения горных работ в любых широтах и в любое время года для крепления стволов была выбрана разборная железобетонная крепь круглого сечения, собираемая из железобетонных сегментов в кольца высотой 0,9 м. Ножевое кольцо большего диаметра также разборное и состоит из 6 сегментов. Для стеновых и ножевых блоков была разработана опалубка, позволяющая вести их изготовление на любом заводе железо-бетонных конструкций.

Для проходки шахтных стволов был предложен горный способ с креплением пройденной выработки опускной крепью из железобетонных сборных колец в тиксотропной рубашке. Разрушение породы внутри опускной крепи на начальном этапе внедрения осуществлялось установкой УШК-4, принцип действия которой был основан на методе планетарного

фрезерования забоя и транспортировки разрушенной породы в бадью, которая поднимается и спускается в ствол козловым краном, смонтированным над шахтным стволом. Козловой кран служит для выполнения всех грузовых работ, связанных с монтажом железобетонных блоков, погрузкой разрушенной породы в автосамосвал, производством монтажных и демонтажных работ при бурении, водоотливе и т.д.

В дальнейшем метод планетарного фрезерования забоя был заменён более прогрессивным с использованием в качестве породоразрушающего устройства рабочего органа экскаватора ЭО-153 с ёмкостью ковша 0,18 $м^3$ [282].

Разрушение грунтов этими технологиями возможно только в условиях «сухого» забоя или очень малых водопритоков (до 3-5 $м^3$/ч). При проходке шахтных стволов, в разрезе которых встречаются высокопроницаемые и обводнённые пески, супеси, применение этих комплексов возможно только с водопонижением.

Практика сооружения шахтных стволов с применением установок УШК оправдала себя при сооружении лучевых дренажей на промплощадках, геологический разрез которых представлен лессовидными и суглинистыми грунтами, обладающими сцеплением и имеющими низкие коэффициенты фильтрации.

Метод проходки шахтных стволов комплексами УШК неэффективен для шахтных стволов в обводнённых песках из-за необходимости водопонижения, которое требует дополнительных материальных затрат и значительно удлиняет сроки строительства объекта. Анализ выявленных недостатков проходки шахтных стволов горным способом с применением различных приёмов разрушения породы, а также изучение опыта различных горнопроходческих организаций [283-285] показал:

1. Горный способ проходки не имеет резервов повышения производительности в скорости проходки шахтных стволов и будет целиком зависеть от гидрогеологических условий ведения работ. Чем они сложнее, тем дольше и затратнее будут работы при сооружении ствола.

2. Основные варианты повышения производительности горных работ лежат в области сооружения шахтных стволов в любых гидрогеологических условиях без применения водопонижения. Наиболее приемлемым является способ разрушения грунта грейферами с управлением им с поверхности, в т.ч. и разработки грунта под водой, когда уровни грунтовых вод близки к поверхности земли.

В специализированном горном технологическом управлении (СГСТУ) ВИОГЕМ в 1994-1995гг. были проведены конструкторские работы по созданию двухчелюстного грейфера для разрушения грунтов под водой. Грейфер имеет пригрузочный узел, повышенные усилия при сжатии

челюстей, геометрия челюстей адаптирована для работы в цилиндрическом пространстве, в том числе и под ножом, при расширяющейся конусной поверхности. Объём ковша - 0,25 м^3. Параллельно с созданием грейфера, включающего маслостанцию, пульт управления, решались вопросы выбора технических средств для его доставки на забой и подъёма из ствола. Используемый ранее для этих целей козловой кран ККС-3,2 из-за низких скоростей спуска и подъёма не отвечал требованиям разработки грунта. Для этих целей были использованы автомобильные краны разной грузоподъёмности, зависящей от глубины ствола. Помимо решения технических задач, связанных с созданием средств разрушения породы на забое ствола и её удаления, решались технологические вопросы по бетонированию днища ствола под водой, устройству дренажа в днище, управлению гидростатическим давлением жидкости за крепью и внутри ствола, при котором исключаются процессы выпора породы с забоя, обрушение стенок колодца и другие вопросы.

Первые опытные работы по сооружению шахтных стволов в пос. Оля Астраханской области, проведенные в 1995-1996 гг., показали, что скорость проходки шахтных стволов этим способом даже в самых сложных гидрогеологических условиях, когда геологический разрез представлен песками с уровнем стояния грунтовых вод в полуметре от поверхности земли, в несколько раз выше, чем при использовании горного способа с водопонижением. После успешно проведенных испытаний в пос. Оля все вновь построенные лучевые дренажи (их более 150) в гг. Казани, Москве, Омске, Оренбурге, Нижнем Новгороде, Санкт-Петербурге, Северодвинске, Саратове, Липецке и других городах, а также на отдельных предприятиях были сооружены по этой технологии.

Учитывая прогрессивность заложенных технических и технологических решений, эффективность ведения строительно-монтажных работ по сооружению шахтных стволов в различных гидрогеологических условиях, ниже изложены основные технологические моменты их возведения, которые заинтересуют специалистов соответствующих отраслей.

ГЛАВА 8

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО СООРУЖЕНИЮ ШАХТНОГО СТВОЛА МЕТОДОМ ОПУСКНОГО КОЛОДЦА С ПОДВОДНЫМ СПОСОБОМ РАЗРАБОТКИ ГРУНТА

Шахтный ствол является сложным инженерным сооружением, его глубина, конструктивные параметры определяются проектом. Основными элементами шахтного ствола являются: ножевое и стеновые кольца, форшахта и днище.

На основные его конструктивные элементы: стеновые и ножевые блоки, перекрытия, армокаркас днища с дренажным устройством, которые определяют механическую прочность крепи шахтного колодца, была разработана соответствующая конструкторская и проектная документация. На базе конструкторской документации составлен каталог типовых элементов и деталей шахтных колодцев.

В основу составления альбома положены требования СНиП 203.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции», СНТ 2.01.08-99 и СНТ 2.01.08-2001- «Строительство в сейсмических районах» и материалы ОКР и НИР.

При изготовлении блоков применяются бетоны марки В30W6, в качестве арматуры - арматура класса AIII-Ø12; Ø9 и AI- Ø16 мм и закладные из проката С235S 10 мм. Масса ножевого блока 984 кг, масса стенового блока - 960 кг.

При сборке ножевое кольцо имеет внешний диаметр 4540 мм и высоту от 0,9 м, а стеновое - внешний диаметр 4400 мм и высоту 0,9 м. Благодаря разнице в диаметрах ножевого и стенового колец создаются условия для создания тиксотропной рубашки в кольцевом пространстве между внешней поверхностью крепи и внутренней поверхностью стенок ствола. После завершения строительства ствола тиксотропный раствор может быть заменён на песчано-цементный раствор.

Основными этапами строительства ствола являются:

- подготовительный, включающий в себя обустройство строительной площадки с местами складирования материалов, оборудования; подключение электрического щита к источнику энергоснабжения;
- сооружение форшахты;
- монтаж ножевого и 1-го стенового колец;
- проходка шахтного ствола;
- устройство днища;

Форшахта является очень важным элементом ствола, в функциональное назначение которой входит:

- исключение от обрушения верхней, наиболее неустойчивой толщи горных пород под влиянием работающего оборудования, поверхностных вод и других неблагоприятных воздействий;
- обеспечение условий создания гарантированного кольцевого пространства для устройства тиксотропной рубашки;

- удержание крепи шахтного ствола от перекосов.

Предварительно под форшахту выкапывается котлован. Внутри него устанавливается опалубка по окружности диаметром 4,65-4,75 м. Внутри созданного кольцевого пространства устанавливается стальная арматура и производится бетонирование.

После бетонирования опалубка снимается, прочищаются наплывы, убираются неровности, выравнивается внутренняя поверхность форшахты, ведутся контрольные замеры диаметра, который должен быть равен 4750,0 мм. Выполнение этих требований обязательно, т.к. это гарантирует беспрепятственный спуск ножевого кольца. Подготовив форшахту, свободный объём котлована заполняют песком, песок уплотняют, и на созданной песчаной подушке по периметру ножевого кольца укладывают шпальный брус сечением 100х200 мм.

Выровняв верхнюю поверхность бруса по горизонтали, приступают к выполнению следующего этапа работ.

На выровненную поверхность деревянных подкладок устанавливают предварительно собранное ножевое кольцо (или сегменты ножевого кольца, которые собираются в кольцо по месту) рис 8.1.

На собранное ножевое кольцо устанавливается резиновое кольцо из транспортной ленты с внутренним диаметром 4,4 м и наружным – 5,0 м.

Крепление резинового кольца к горизонтальной поверхности верхнего торца ножевого блока осуществляется анкерными болтами. Для более надёжного закрепления к бетону под гайки анкеров устанавливают металлические пластины размером 70х150х10 (ширина х длина х толщина). Анкеры устанавливаются по окружности, переходящей через середину кольца бетонной поверхности ножевого блока через 650-700 мм друг от друга. После монтажа ножевого блока приступают к сооружению шахтного ствола.

При проходке шахтного ствола должны выполняться следующие основные требования к качеству работ:

1. Обеспечить монтаж стеновых блоков по диаметру, близкому к диаметру окружности. Допустимая эллипсность ствола – не более 1,5 %.
2. Полная герметичность соединений стеновых блоков по вертикальным и горизонтальным швам.
3. Отклонение оси ствола от вертикали не более 9-10 см на 10 м ствола.
4. Высокое качество сварки при монтаже блоков.
5. Управление процессом погружения ствола, недопустимость прорывов водопесчаной смеси из-за крепи ствола.
6. Управление качеством тиксотропного раствора от начала до конца проходки.

7. Технология подводного бетонирования днища должна обеспечить его монолитность, исключение всплытия, образования свищей при опорожнении ствола.

Соблюдение этих требований должно осуществляться с самого начала проходки ствола.

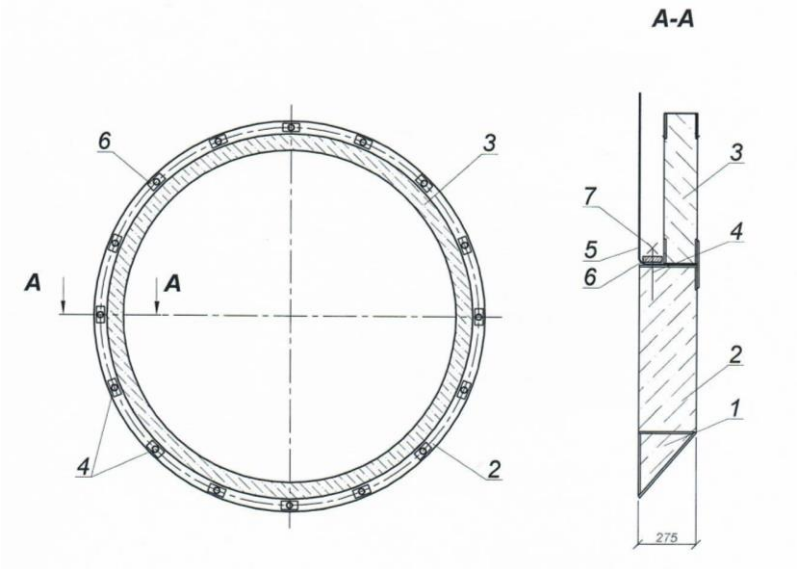


Рис.8.1. Схема закрепления резиновой манжеты на ножевом блоке:
1- металлический нож; 2 - ножевое кольцо; 3 - 1-й стеновой блок;
4 - анкеры Ø16 мм, L=200 мм; 5 - резина (транспортная лента, δ=10-12 мм);
6 - прижимная пластина; 7- гайка анкера

Грунт внутри ствола разрабатывается грейфером, подвешенным на автокран, с погрузкой на автотранспорт и складированием в заранее отведенных местах.

После опускания ножевого кольца на глубину, превышающую верхнюю отметку форшахты на 300-400 мм, над уплотнительной манжетой устанавливают водонепроницаемый замок из глины, которую предварительно замачивают до состояния пластичности, после чего ею заполняют полость, образованную резиновой манжетой и боковой поверхностью крепи, и трамбуют. Затем приступают к монтажу 2-го стенового кольца.

Схема монтажа стеновых блоков, система перевязки швов, установка накладок приведена на рис.8.2.

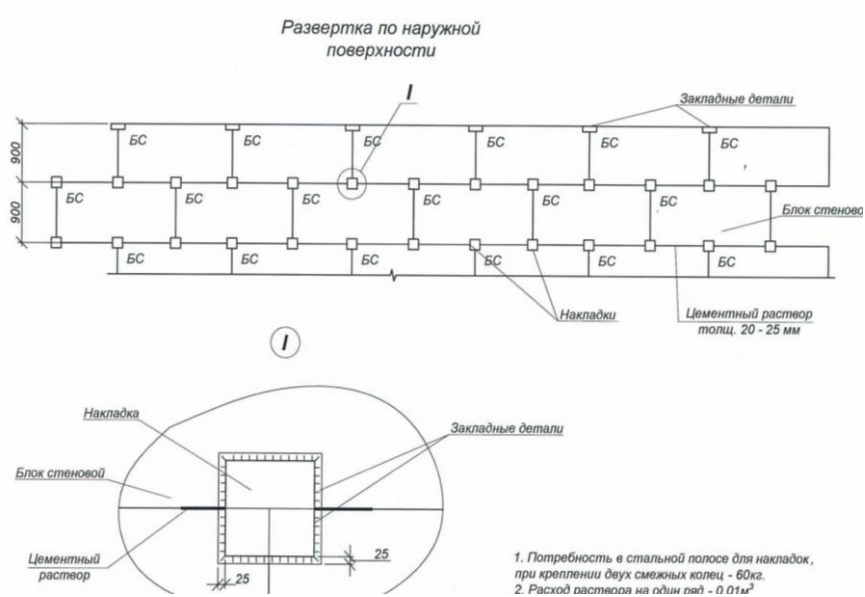


Рис.8.2. Схема монтажа стеновых блоков

Герметизация стыков блоков осуществляется песчано-цементным раствором, укладываемым по горизонтальным и вертикальным швам с последующим оштукатуриванием швов изнутри и снаружи.

Наружная поверхность крепи покрывается битумной мастикой.

После монтажа 2-го стенового блока к верхним закладным привариваются раствороподающие трубки Ø 42,0 мм. Устанавливаются они через 60° по периметру кольца. Нижние концы этих трубок должны располагаться на 400-500 мм выше верха глиняного замка. По ним закачивают глинистый раствор, выполняющий функцию тиксотропной рубашки. По мере наращивания стеновых колец наращивают и раствороподающие трубки.

Технология разработки забоя при проходке шахтного ствола грейфером оказывает существенное влияние на производительность, некоторые её особенности необходимо учитывать для предотвращения возникновения осложнений при посадке крепи. На начальном этапе проходки ствола, когда удельное давление режущих кромок ножа на грунт минимальное, правильная организация разработки забоя имеет решающее значение для скорости проходки.

В связи с этим в начальный момент площадь забоя должна быть максимальной и может приближаться к площади, образованной режущей кромкой ножа. Непосредственно под ножом по всему периметру оставляется лента целика шириной до 0,2 м. С углубкой ствола, когда вес крепи увеличивается, ширина ленты может быть увеличена до 0,5 м. Данный целик служит для образования замка за стенкой ножа, за счёт которого удерживается глинистый раствор за крепью ствола.

При проходке связных грунтов (глин, суглинков) ширина защитной ленты целика уменьшается, а при проходке песчаных обводнённых пород она увеличивается и определяется опытным путём.

С учётом этих положений разработка грунта на забое ствола выполняется, как правило, по двум вариантам.

Вариант 1. Грунт разрабатывается вдоль стен колодца, диаметрально противоположными захватками с учётом размеров грейфера в раскрытом состоянии. По периметру колодца выполняется 6 захваток. Расположение захваток (высота опускания грейфера) фиксируется метками на крепи колодца. Центральная часть забоя разрабатывается после посадки колодца на 0,3-0,4 м. Очерёдность работ в забое по варианту 1 приведена на рис.8.3.

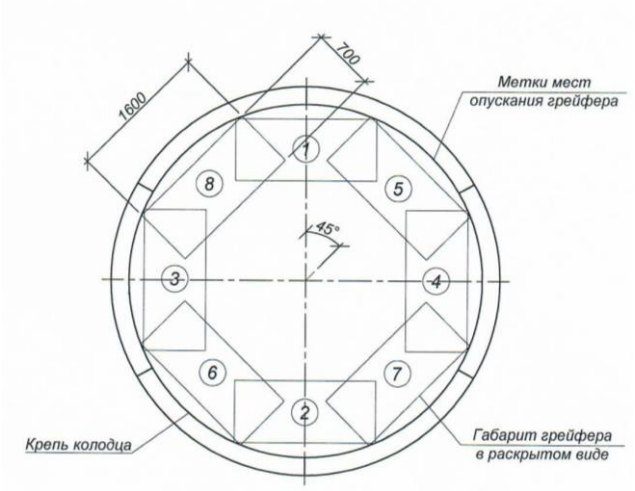


Рис.8.3. Очерёдность разработки забоя по варианту 1

Вариант 2. грунт разрабатывается в центре колодца. Постепенно очертания забоя принимают форму обратного конуса с вершиной в центре колодца. Нож его постепенно оголяется и происходит посадка колодца. Очерёдность работ по варианту 2 приведена на рис.8.4.

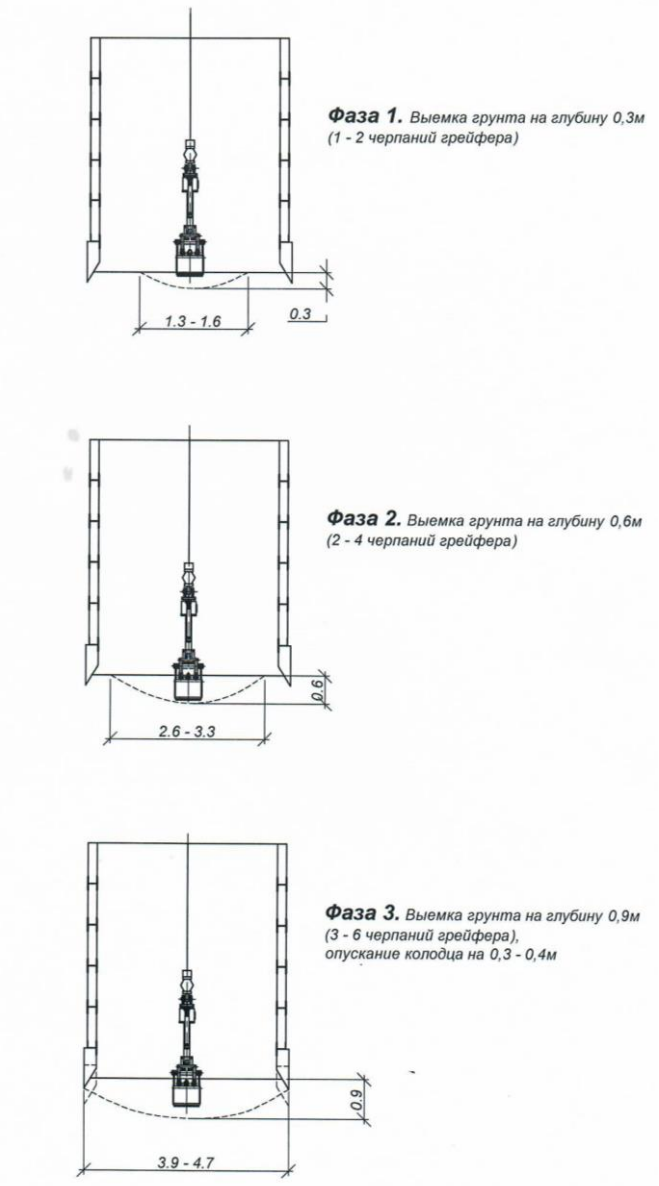


Рис.8.4. Очередность разработки забоя по варианту 2

Выбор варианта очерёдности разработки забоя осуществляется при производстве работ в зависимости от практических свойств грунтов и хода погружения колодца.

При проходке шахтных стволов с применением тиксотропной рубашки необходимо тщательно следить за тем, чтобы тиксотропная жидкость не прорвалась из-за ножа и не попала внутрь ствола. Практика проходки стволов показывает, что прорыв тиксотропной жидкости может произойти в двух случаях: если из-под ножа будет выбрано большое количество породы, вследствие чего может произойти обрушение грунта, находящегося над выбранной полостью. Этот грунт находится в прямом контакте с внешней поверхностью ножевого кольца. При его обрушении тиксотропный раствор через образовавшуюся пустоту под давлением собственного веса начнёт перетекать во внутреннюю полость шахтного ствола. Второй случай может быть вызван выпором грунта через забой ствола при значительном опорожнении ствола, когда гидростатическое давление жидкости за крепью значительно выше давления столба жидкости в стволе. Для исключения этих явлений необходимо при проходке ствола тщательно следить за положением забоя и за соотношением гидростатического давления столба жидкости в стволе к уровню грунтовых вод за крепью ствола. Для исключения выпоров грунта за счёт разницы в гидростатических давлениях целесообразно в стволе поддерживать уровень воды на 0,3-0,5 м выше положения уровня грунтовых вод.

Если после отработки грунта по всему периметру (вариант 1) или после выемки 2,5-3,0 $м^3$ грунта в центре колодца (вариант 2) посадка колодца не происходит, выполняется контрольный промер забоя. Целью контрольного промера является уточнение конфигурации забоя и обнаружение недоборов грунта.

Промеры осуществляются с помощью щупа, изготовленного из арматурной стали диаметром 20-22 мм длиной 10 м. Щуп подвешивается к крюку крана.

Глубина опускания щупа определяется по меткам на нём. Метки наносятся белой краской или скрутками из проволоки через 0,3 м. Шаг промеров – 0,5-1,0 м, перемещение щупа по площади забоя – передвижением только с применением автокрана.

Достижение щупом дна колодца фиксируется отклонением его от вертикали.

В местах обнаружения недоборов грунта выполняется дополнительная его выемка грейфером – доочистка забоя.

Глубина погружения колодца за один цикл опускания не должна превышать 0,5 м с условием соблюдения проектного положения в плане по вертикали. Горизонтальное смещение колодца – не более 0,001 глубины

погружения, а тангенс угла отклонения от вертикали -0,01.

В случае возникновения крена колодца, или самопроизвольного погружения крепи работы по выборке грунта необходимо прекратить до разработки специальных мероприятий по ликвидации указанных нарушений, связанных с опусканием крепи.

В процессе сооружения колодца надлежит вести журнал производства работ.

При проходке шахтного ствола следует помнить, что при входе ножа шахтной крепи под уровень грунтовых вод работы по углубке ствола необходимо увязывать с обеспечением безопасного их производства, связанных с деформацией (выпора) грунта в забое.

В горном деле понятие «выпор» ассоциируется с действием фильтрационного потока со стороны забоя вертикально вверх. Движение потока грунтовых вод к забою ствола возможно только за счёт разницы уровней грунтовых вод за крепью ствола (H_1) и уровнем грунтовых вод в стволе (H_2). Перепад давления (H_1 - $H_{2=}$ ΔH) создаёт движение фильтрационного потока вверх. Для того чтобы произошла деформация грунта, величина силы, создаваемая разницей напоров (ΔH), должна быть больше веса грунта, подверженного перемещению фильтрационным потоком. В общем случае фильтрационный поток направлен вверх, вес деформируемого грунта направлен вниз.

Выпор произойдёт, если

$$\Delta H \cdot F \cdot E > V\gamma_{взв}, \qquad (8.1)$$

Где, ΔH- перепад давления, м.вод.столба (кг/см^2, тс/ м^2);

F- площадь забоя, см^2 (м^2);

E- пористость;

V- объём перемещаемого грунта;

$\gamma_{взв}$- удельный вес грунта с учётом взвешиваемого действия воды, тс/ м^3.

$$\gamma_{взв=} \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon)}, \qquad (8.2)$$

где, γ- удельный вес скелета грунта, тс/ м^3;

ε- пористость грунта.

Таким образом, когда нож шахтного ствола ещё не вскрыл статический уровень грунтовых вод и когда $\Delta H = 0$, деформации грунта быть не может. Для предотвращения и даже исключения деформации грунта через забой необходимо принудительно обеспечить фильтрацию жидкости в пласт. Достигается это путём подачи жидкости в ствол с поддержанием превышения давления над статическим напором пластовой жидкости в пределах 0,1-0,5 м.вод.столба.

При проходке шахтного ствола методом опускного колодца необходимо в закрепное пространство подавать глинистый раствор. Глинистый раствор должен приготовляться на основе высококачественных глин, преимущественно бентонитовых, с удельным весом $\gamma_р$ =1,08 г/ см^3 –min и $\gamma_р$=1,15 г/ см^3 –max.

Расход глины на 1 м^3 раствора может быть подсчитан по известной формуле:

$$P_Г = \frac{\gamma Г(\gamma г.р. - \gamma в)}{\gamma г - \gamma в}, \text{ т/м}^3, \qquad (8.3)$$

где $\gamma_г$, $\gamma_{г.р.}$ $\gamma_в$ – удельные веса глины, глинистого раствора и воды соответственно, т/м^3.

Расчёт потребного количества воды и глины на приготовление 1 м^3 раствора в зависимости от влажности приведен в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Показатели для расчёта глинистого раствора

№ п/п	Удельный вес раствора, т/м^3	Потребное количество		Примечание
		Вода, л	Глина, кг	Состояние глины
1	$\gamma_р$ =1,09-1,10	932	163	Глина в воздушно-сухом состоянии
		900	195	Глина влажностью 20 %
2	$\gamma_р$ =1,13-1,14	910	225	Глина в воздушно-сухом состоянии
		865	270	Глина влажностью 20 %

Для повышения качества глинистого раствора в него добавляют 1-2 % кальцинированной соды (она повышает pH воды и способствует ускорению диспергации глинистых частиц) и 0,5÷1,0 % КМЦ (последний улучшает структурную прочность раствора и предотвращает его преждевременную коагуляцию).

Параметры глинистого раствора определяются с помощью лаборатории глинистых растворов (ЛГР). Данные замеров удельных весов, вязкости, водоотдачи, толщины корки записываются в Журнал производства работ.

Нагнетание раствора в кольцевое пространство необходимо вести только по трубам. Во избежание загустевания раствора внизу, возможного его расслоения необходимо периодически, раз в сутки, создавать циркуляцию (движение) раствора в закрепном пространстве. Делается это путём нагнетания раствора в каждую трубку по 30-40 мин. При этом всасывающий шланг бурового насоса следует опускать как можно ниже. Последовательно

передвигаясь от одного сегмента кольцевого пространства к другому, обеспечивается циркуляция всей массы глинистого раствора.

Наращивание тампонажных трубок ведётся по мере опускания крепи. Соединение секций между собой на сварке.

После погружения ножа шахтного ствола на проектную глубину приступают к операциям, связанным с бетонированием днища.

Опыт сооружения шахтных стволов в различных гидрогеологических условиях показал, что днище ствола является важнейшим элементом его конструкции. Особенно важное значение оно приобретает при сооружении стволов в обводнённых песчаных отложениях с высокими гидростатическими напорами грунтовых вод. Практика выявила, что основным, часто встречающимся осложнением после бетонирования днища, является суффозионный вынос песка через мелкие каверны и трещины, обнаруженные при опорожнении ствола и образующиеся, как правило, вследствие некачественного производства работ. При наличии суффозии через днище ствола дальнейшие работы по сооружению лучевых дренажных скважин, эксплуатации его, невозможны из-за угрозы заполнения нижней рабочей части ствола поступающим из-под днища песком.

Ликвидация суффозионных выносов осуществляется, как правило, лишь повторным бетонированием днища при затопленном стволе.

В связи с этим днище должно отвечать следующим требованиям:

- днище должно быть прочным, исключающим его разрушение фильтрационным потоком при опорожнении ствола;

- днище должно быть монолитным, без каверн, пустот и трещин, через которые возможен суффозионный вынос песка при опорожнении ствола;

- днище должно содержать зумпф (отстойник) для размещения в нём погружного насоса для производства откачки воды до отметки уровня днища;

- для снятия напора фильтрационного потока, действующего на нижнюю поверхность днища, последнее должно иметь дренажный узел, позволяющий без суффозии осуществлять отвод поступающих к днищу подземных вод.

С учётом предъявленных к днищу требований разработана конструкция днища, технология его бетонирования, обеспечивающая их надлежащее качество. Одновременно с этим создана упрощённая методика определения возможности «всплытия» ствола при его проходке под защитой тиксотропной рубашки.

Прежде, чем перейти к описанию конструкции днища и технологии производства работ при его создании, необходимо оценить влияние гидростатического давления на возможность «всплытия» монолитной конструкции шахтного ствола. Определим силу всплытия, действующую на

монолитную конструкцию шахтного ствола после строительства днища и выполнения работ по его полному опорожнению.

Расчётная схема действия сил на крепь ствола для определения взвешивающего действия гидростатического давления пластовых вод приведена на рис.8.5.

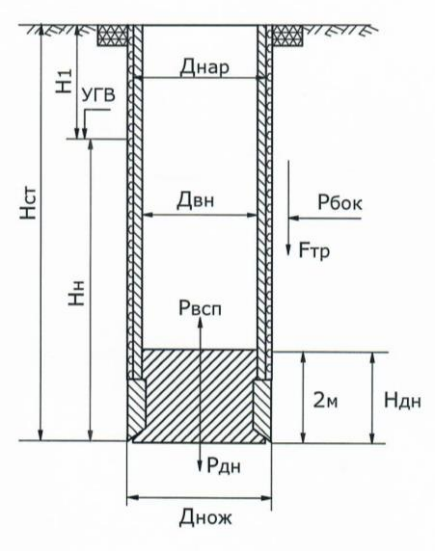


Рис.8.5. Схема действия сил на крепь ствола для определения взвешивающего действия гидростатического давления пластовых вод

При отсутствии дренажа грунтовых вод через днище ствола величина сил всплытия в общем виде определяется из выражения

$$P_{всп}=S_д \cdot \sigma_{чет}\,, \qquad (8.4)$$

где $\sigma_{чет}$ – удельное давление гидростатического столба жидкости на днище, кгс/см^2 или т/м^2;

$S_д$ - площадь днища по внешнему диаметру ножевого кольца, м^2.

В условиях отсутствия обжатия крепи шахтного ствола горным давлением, которое обеспечивает находящаяся за крепью тиксотропная жидкость, всплытию ствола препятствует собственный вес крепи ствола. Его величина определяется из выражения

$$P_{кр} = P_{кр1} + P_{кр2} + P_н + P_{дн}\,, \qquad (8.5)$$

где $P_{кр}$- вес ножевого кольца с учётом взвешивающего действия воды, тс;

$P_{кр1}$- вскрытие ствола выше уровня грунтовых вод, тс;

$P_{кр2}$- вес крепи ствола ниже УГВ с учётом взвешивающего действия воды, тс;

$P_н$ – вес ножевого кольца с учётом взвешивающего действия воды, тс;

$P_{дн}$- вес железобетонного днища с учётом взвешивающего действия воды, тс;

$$P_{кр1}=0,785(Д_{нар}^2 – Д_{вн}^2) \cdot P1 \text{ , } тс;$$

H_1 – расстояние от поверхности земли до уровня грунтовых вод, м;

$Д_{нар}$, $Д_{вн}$ - соответственно - наружный и внутренний диаметры ствола, м;

$P_{кр2}$ с учётом взвешивающего действия определится из выражения

$$P_{кр2} = S_{кр2} \cdot H_2 (\gamma_б - \gamma_в), \; тс,$$

где $S_{кр2}$ – площадь бетонных конструкций ствола, расположенного ниже УГВ, $м^3$;

H_2 – высота столба воды в стволе (отсчитывается от поверхности днища);

$\gamma_б - \gamma_в$ – соответственно удельные веса бетона и воды, $тс/м^3$;

$$P_н = G_н (\gamma_б - \gamma_в), \; тс,$$

где $G_н$ – вес ножевого кольца (паспортные данные).

Вес бетонного под водой определится днища из выражения:

$$P_{дн} = S_{дн} \cdot H_д (\gamma_б - \gamma_в),$$

где $S_{дн}$ – площадь днища, $м^2$

$H_д$ – высота днища, м.

При опорожнении ствола величины H_1 и H_2 меняются, соответственно меняется величина силы собственного веса конструктивных элементов ствола. При полном его опорожнении взвешивающее действие на конструктивные элементы ствола исчезнет и тогда $P_{кр2} = S_{кр2} \cdot H_2 \cdot \gamma_б$ и $P_н = G_н \cdot \gamma_б$

$$P_{дн} = S_{дн} \cdot H_д \cdot \gamma_б \; .$$

Производя расчёты сил, вызванные собственным весом конструкций ствола при заполнении его до уровня грунтовых вод и при полном его опорожнении, определяют минимальную величину силы $P_{кр\,min}$.

Обязательным условием, при котором исключается всплытие, является:

$$P_{вск} < P_{кр\,min} \; .$$

Проведенные расчёты и большой объём работ при сооружении шахтных стволов в разных гидрогеологических условиях с учётом конкретных параметров элементов его конструкций (днища, ножевого и стенового колец) показывают, что даже при самых неблагоприятных условиях, когда уровень грунтовых вод находится у поверхности земли и когда ствол опорожнён до днища, суммарный вес его конструктивных элементов при расчётной глубине ствола в 20 м превышает силы всплытия. Кроме того, всплытию крепи препятствуют силы трения, вызванные горным давлением, действующим на боковую поверхность ножевого кольца в условиях отсутствия тиксотропной рубашки.

В общем случае вертикальная сила от горного давления вызывает боковое давление, которое определяется из выражения:

$$P_{бок} = f \cdot P_в \text{, тс/м}^2 \text{ (кгс/см}^2\text{)} \qquad (8.6)$$

где $P_в$ – вертикальное горное давление;

f -коэффициент трения породы о бетонную крепь (справочная величина);

$P_{бок}$ – величина горного давления, действующая на боковую поверхность ножевого кольца.

В настоящее время достаточно полно разработаны теоретические основы расчёта горного давления на боковую поверхность крепи шахтных стволов [286, 287]. Основной расчётной формулой для определения бокового давления грунта является формула [286].

$$P_{бок} = K_o \cdot \gamma_п \cdot H \text{, тс/м}^2 \text{,} \qquad (8.7)$$

где K_o– коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя, принимаемый для крупнообломочных грунтов K_o=3,0; для песков и супесей K_o=4,0; для суглинков K_o=5,0; для глин K_o=7,0;

$\gamma_п$ – приведенный удельный вес;

H – расстояние от поверхности грунта до рассматриваемого сечения колодца, м.

Наличие тиксотропной рубашки выше ножевого кольца при сооружении шахтных стволов лучевого дренажа позволяет успешно решать задачи по исключению воздействия горного давления на крепь, которое может привести к зависанию, перекосам ствола и другим осложнениям.

С учётом вышеназванных требований разработана конструкция днища шахтного ствола, представленная на рис.8.6.

Она включает дренажную подсыпку мощностью 1,0-1,2 м, фракционный состав которой выбирается в зависимости от гранулометрического состава пород днища. Соотношение $Д_{50}$ щебня к d_{50} подстилающих пород (ГПО) выбирается в пределах 8÷12. Дренажная

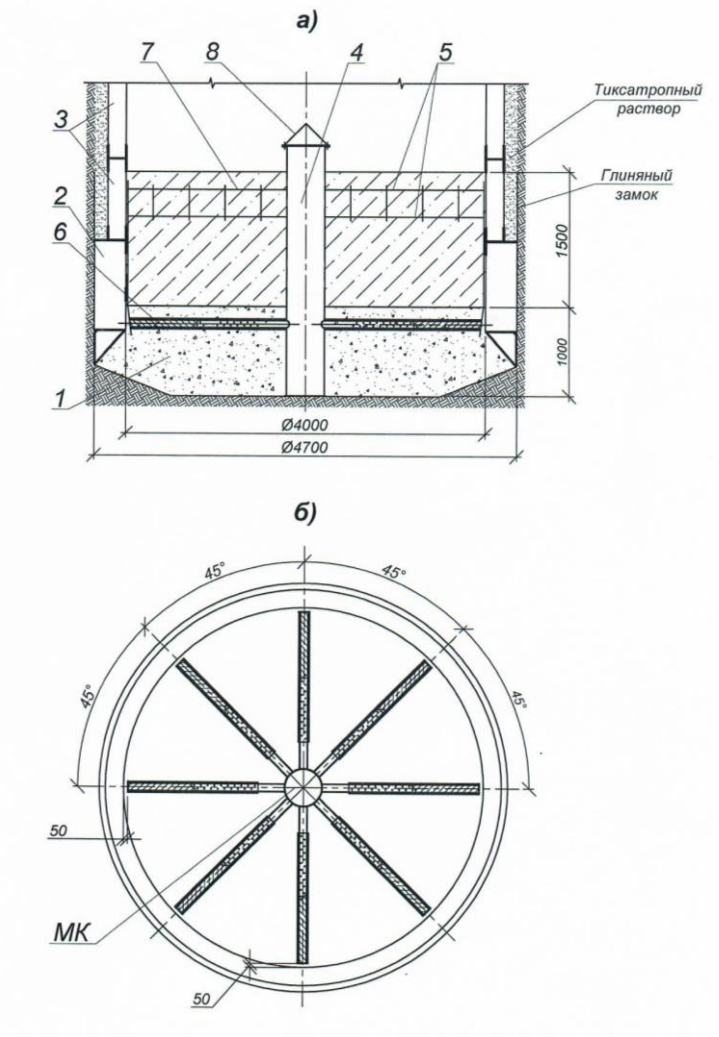


Рис. 8.6. Конструкция днища шахтного ствола с расположенным в нём дренажным устройством:
1 - дренажная подсыпка (щебень); 2 - ножевое кольцо; 3 - стеновые кольца; 4 - дренажная труба Ø426 мм; 5 - металлокаркас (арматура); 6 - дренажные фильтры; 7 - бетон; 8 - прицепное устройство со съёмным фланцем

подсыпка подаётся в ствол после установки в ней изготовленного на поверхности металлического каркаса (МК), состоящего из дренажной трубы Ø 426 мм, на которой смонтированы фильтры и пространственная решётка арматуры. Фильтры дренажного каркаса подбираются из расчёта исключения суффозионных явлений из подстилающих пород при производстве откачек жидкости из ствола.

Перед проведением работ по бетонированию днища ствола необходимо произвести контрольные замеры глубины и определить форму поверхности днища. Эта операция выполняется путём промеров глубины ствола по его периметру и по 3-4 точкам по диаметру.

На основании проведенных замеров устанавливается форма поверхности днища и принимается решение об её выравнивании. Выравнивание поверхности днища производится путём засыпки песком выявленных неровностей с последующей унификацией поверхности забоя грейфером при сомкнутых «челюстях».

На выровненную поверхность в шахтный ствол должен быть спущен металлический каркас (МК), включающий дренажный узел (ДУ), состоящий из горизонтальных фильтров, жёстко закрепленных в фильтровой колонне Ø 426 мм, арматурной сетки и других элементов.

Принципиальная схема устройства и расположения его в стволе приведена на рис.8.6. Основное назначение ДУ - снятие давления грунтовых вод на днище и исключение тем самым его всплытия и деформации после опорожнения ствола и повышения качества бетонирования. После установки ДУ на забой шахтного ствола производится его обсыпка щебнем. Высота обсыпки и фракционный состав щебня определяется проектом. Основное требование при выполнении этой операции создание слоя щебня над горизонтальными дренами толщиной не менее 150-200 мм. Засыпка щебня осуществляется грейфером путём равномерного распределения объёма по площади забоя ствола.

Бетонирование днища должно производиться с применением метода подачи бетона непосредственно на забой через вертикальные бетоноподающие трубы (метод ВПТ). Схема подачи бетона по трубам приведена на рис.8.7.

Порядок работы при бетонировании днища следующий:

- сборка на поверхности плетей бетоноподающего трубопровода, длина которого определяется глубиной расположения металлокаркаса, при этом торец нижней ВПТ должен быть выше ДУ на 0,5-0,6 м;

Спуск плети через монтажное отверстие в днище приёмной ёмкости на заданную глубину.

Процедура спуска, фиксации, удержания каждой последующей секции аналогична спуску 1-й секции. Опустив низ ВПТ на расчётную глубину, верх

её закрепляют на опорном фланце днища приёмной ёмкости. Верх ВПТ должен возвышаться над днищем приёмной ёмкости на высоту хомута. Подготовив таким образом ВПТ и приёмную ёмкость, приступают к подаче бетона в шахтный ствол. Приёмная ёмкость ВПТ может передвигаться по диаметру, а опорная рама может перемещаться краном по окружности. Таким образом, создаются все условия для равномерной подачи бетона по всей поверхности днища шахтного ствола.

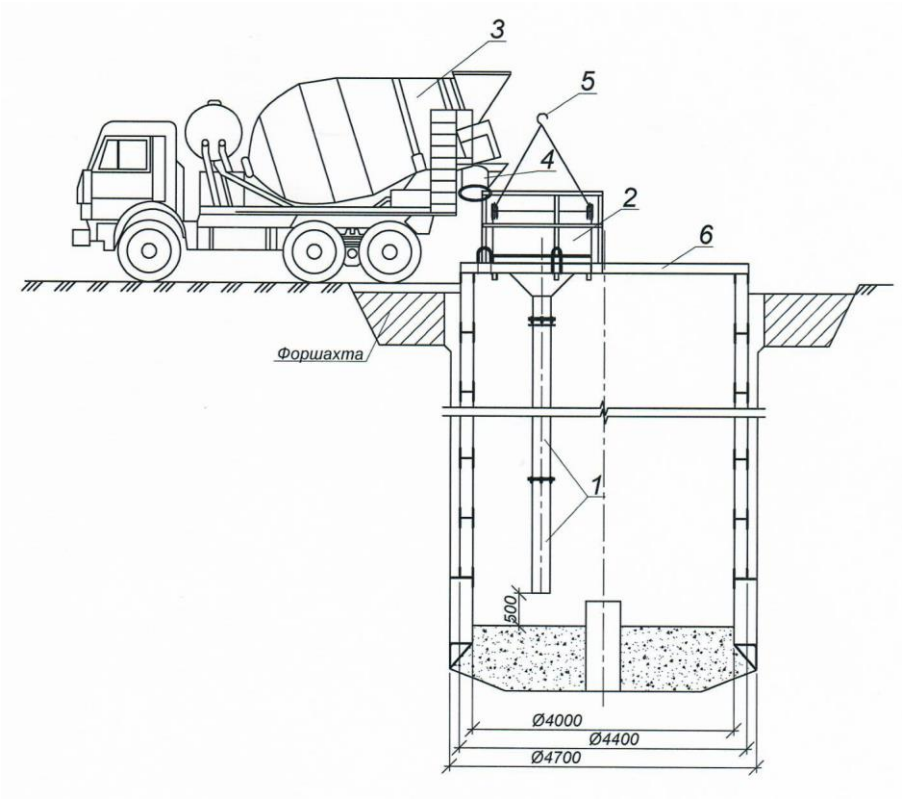


Рис.8.7. Схема подводного бетонирования днища методом ВПТ:
1 - секции водоподающих труб Ø 219 мм(273мм) с фланцевыми соединениями (длина секции 4 м, верхних 2 и 1 м); 2 - приёмная ёмкость с сечением днища 1х2 м и объёмом 1,0 м^3 -1,2 м^3; 3 - миксер; 4 - подводящие желоба миксера; 5 - крюк автокрана; 6 - опорная рама приёмной ёмкости

Поворачивая раму вместе с приёмной ёмкостью и ВПТ по окружности диаметром 3-2,8 м, сначала заливают периферийную часть, а потом - центральную. Желобная система миксера позволяет осуществить наполнение ёмкости в любой точке её нахождения на поворотной раме. Для выравнивания поверхности бетона применяют грейфер при сомкнутых челюстях. Предварительно с помощью плоского груза (листа металла Ø 250-300 мм, толщиной 15-16 мм) определяют примерную поверхность залитого бетона, после чего грейфером, ударяя по выступающей поверхности бетона и перемещая его горизонтально, разравнивают бетон по всей поверхности днища. Укладка всего расчётного количества бетона должна выполняться непрерывно, без остановок. Любые перерывы могут привести к неравномерному процессу схватывания бетона, потере подвижности и «разубоживанию» части объёма, что недопустимо.

После выравнивания поверхности бетона делают контрольные замеры и уточняют её форму. При выявлении понижений производят повторное бетонирование расчётным объёмом бетона с последующими операциями.

Забетонированное днище ствола оставляют в покое на период ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ), который должен составлять не менее 5 суток.

Затем необходимо произвести пробную откачку (опорожнение) воды из ствола и произвести его освидетельствование на предмет обнаружения дефектов (течи в стенах ствола, днище и т.д.) Для откачки воды из ствола применяются хорошо зарекомендовавшие себя центробежные насосы типа «ГНОМ» разной производительности. После проверки качества бетонирования днища проводятся работы по окончательному выравниванию его поверхности, ликвидация трещин, каверн.

Построенный ствол сдаётся по акту. После чего приступают к оборудованию его лестницами, рабочими полками, водоотливом, вентиляцией, в ствол спускается буровая установка, с помощью которой ведётся сооружение горизонтальных (лучевых) дренажных скважин. Типовая схема расположения бурового оборудования в шахтном стволе, схема монтажа его приведены на рис.8.8.

Опыт сооружения лучевых дренажных скважин в различных гидрогеологических условиях достаточно освещён в ряде работ [228, 288, 289 и др.].

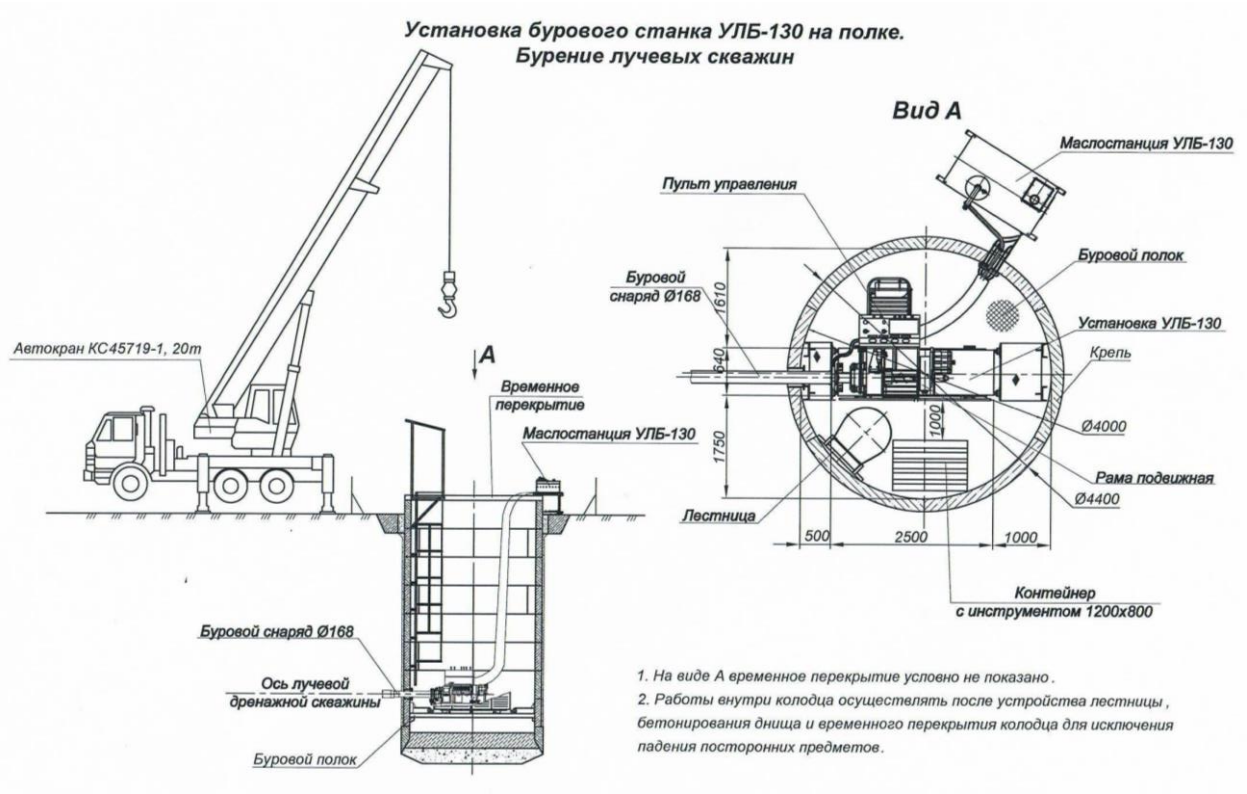


Рис.8.8. Схема расположения буровой установки в шахтном стволе

ГЛАВА 9

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ВОССТАЮЩИМИ ДРЕНАЖНЫМИ СКВАЖИНАМИ

Ранее отмечалось, что основным регионом добычи железных руд в России являются месторождения КМА, которые по гидрогеологическим условиям относятся, как известно, к категории очень сложных. На этих месторождениях отрабатывались основные технологические приёмы осушения, разрабатывались новые эффективные технические средства и технологии защиты горных работ от обводнения. Добыча руды на КМА ведётся открытым способом (3 карьера) и подземным (2 шахты).

На первой стадии строительства карьера, связанной с вскрышными работами, применялся способ осушения вертикальными водопонижающими скважинами. При этом отрабатывались рациональные конструкции скважин, эффективные способы вскрытия водоносных горизонтов, обеспечивающие сохранение естественной проницаемости пласта, создавались новые типы фильтров, оценивалась эффективность погружных насосов, развивалась теория гидрогеологических расчётов дренажных систем. В дальнейшем был осуществлён переход на подземный способ осушения с сооружением дренажного штрека с восстающими скважинами по периметру карьера и усиления внутри карьерного дренажа горизонтальными скважинами [11].

Бурение из дренажного штрека восстающих и наклонно-восстающих дренажных скважин, которые вскрывали на глубину 3-5 м водоносный горизонт (для Лебединского, Стойленского карьеров - это сеноман-альбский водоносный горизонт мощностью до 30 м и с напорами до 110 м вод. столба), обеспечивало отвод воды самотёком из скважин в подземную горную выработку.

Принципиальная схема осушения глубоких карьеров от подземных вод с помощью восстающих и наклонно-восстающих скважин, пробуренных из подземных горных выработок, поясняется на рис.9.1.

Дренажный комплекс включает шахтные стволы (17), которые располагаются за контуром осушаемого карьера (3) (рис.9.1а.).

Из стволов сооружается горизонтальная подземная горная выработка (16), глубина заложения которой выбирается из условий промышленной безопасности и необходимости осушения вышерасположенных обводнённых пород. Подземная горная выработка имеет выполненные в крепких породах водосборники (1,) для сбора дренажных вод, поступающих из наклонно-восстающих дренажных скважин (18,19), сооружённых в водоносные горизонты. Количество скважин определяется отдельным расчётом по известным методикам. Наклонно-восстающие дренажные скважины оборудуются задвижками, манометрами и расходомерами с водоотводами.

Из водосборников водоотливными насосами дренажные воды откачивают за пределы карьера для использования в технологических целях или восполнения запасов водных ресурсов.

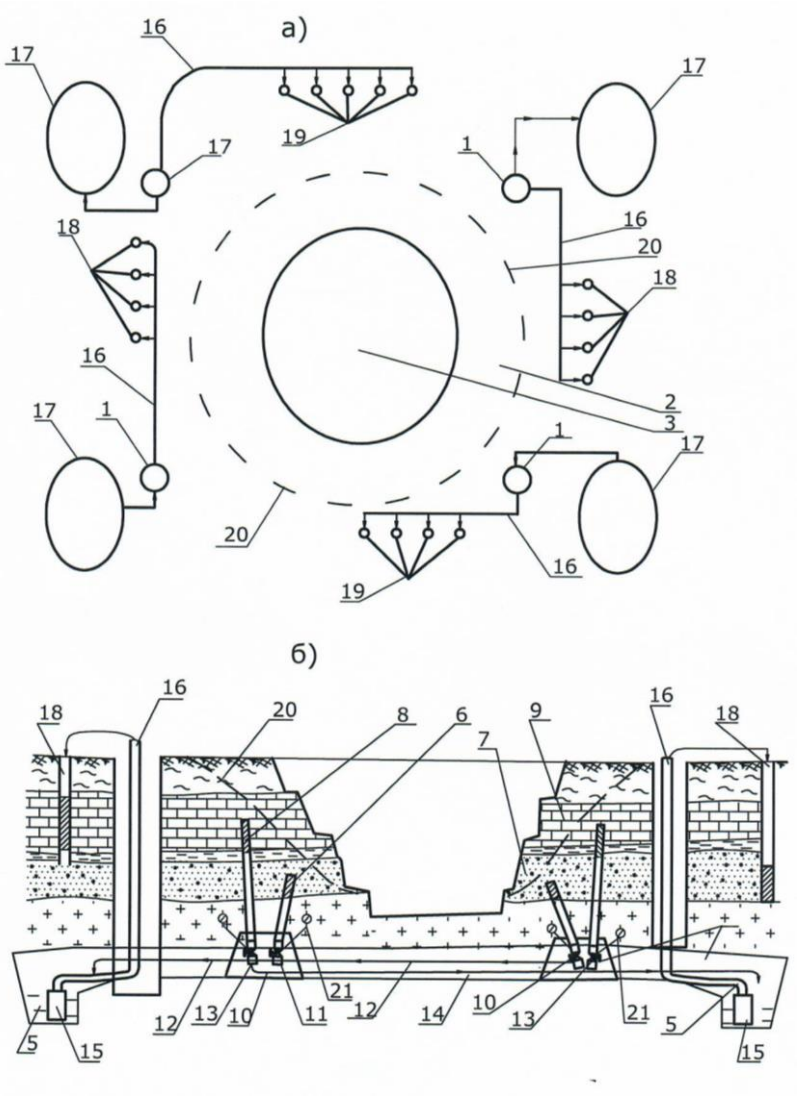


Рис.9.1. Основные элементы дренажного комплекса для защиты глубокого карьера от подземных вод восстающими и наклонно-восстающими скважинами:
2) вид сверху; б) в разрезе

Для решения задач по сооружению восстающих скважин в различных гидрогеологических и горно-технических условиях институтом ВИОГЕМ с середины 60-х годов XX столетия были поставлены и проведены научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по созданию буровой техники, компоновок буровых колонн для бурения и вскрытия водоносных горизонтов, созданию расчётной базы по определению притоков к восстающей скважине, технологии вскрытия водоносных горизонтов, обеспечивающих безопасное ведение горных работ, нормативной базы и ряд других задач. В результате проведенных исследований был создан параметрический ряд буровых установок для сооружения скважин в различных гидрогеологических и горно-технических условиях. Основные технические данные [290, 291, 292] приведены в таблице 9.1.

Состав буровой установки типа УДБ и схема её размещения в горной выработке приведены на рис 9.2.

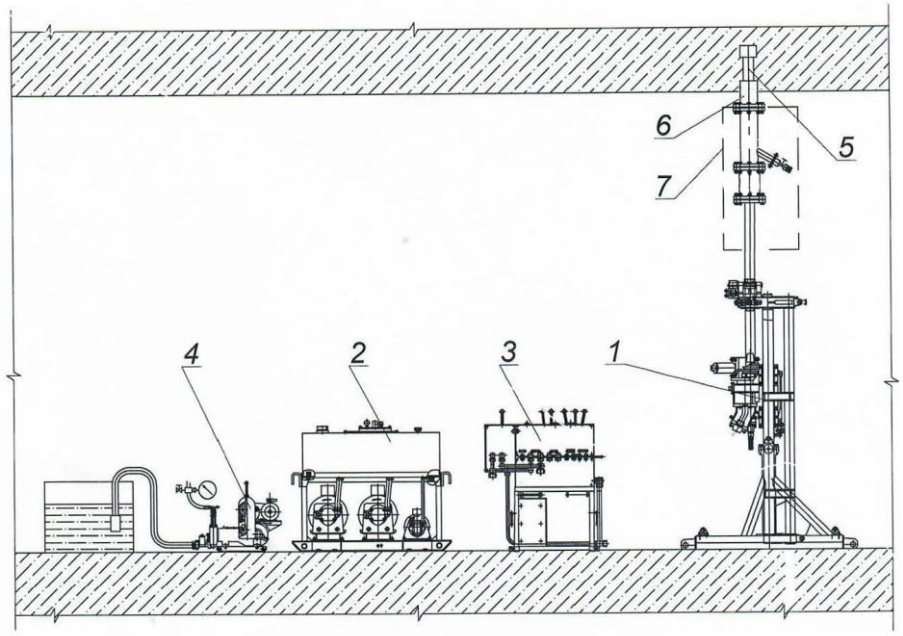


Рис. 9.2. Буровая установка типа УДБ в подземной горной выработке:
1 - буровой станок; 2 – маслостанция; 3 - пульт управления; 4 - буровой насос;
5 - буровой снаряд; 6 – кондуктор; 7 - герметизатор

Таблица 9.1 - Краткие технические характеристики буровых установок для сооружения восстающих дренажных скважин из подземных горных выработок

Параметры	УДБ-1	УДБ-8	УДБ-9	УДБ-12	УДБ-8-01	УДБ-8-02
1	2	3	4	5	6	7
Глубина бурения, м	30	150	150	150	300	Не менее 5
Диаметр бурения, м	112	190	151	190	151	245, 270
Угол бурения к горизонтали, град.	90±10	0-189	0-180	90±10	±10	16-21
Усилие подачи. кН	10	80	90	120	100	100
Ход подачи, мм	1000	1400	925	1400	1400	2840
Мощность привода на вращение, кВт	4	18	19	25	37	37
Частота вращения, мин$^{-1}$	0-42	0-140	0-140 0-200	0-100	0-170	15-170
Диаметр бурения трубы, мм	34	89	89	89	89	219
Габариты бурового станка, мм	569х575х х2200	2950х1010 х х1390	2400х986х х1415	1100х670х Х3200	3270х1010 х Х1545	4100х960х Х740
Габариты буровой камеры, м	Без камеры	6,0х3,0х3, 4	Без камеры	6,0х3,0х3, 5	6,0х3,0х2, 5	Без камеры
Масса, кг	300	1880	1650	2250	2300	2000

Установка подземного дренажного бурения типа УДБ (см. рис.9.2.) включает буровой станок 1, маслостанцию 2, пульт управления 3, буровой насос 4 (покупное изделие), буровой снаряд 5, кондуктор 6, герметизатор 7.

Конструкция бурового станка, снаряжённого для бурения восстающей дренажной скважины, приведена на рисунке 9.3.

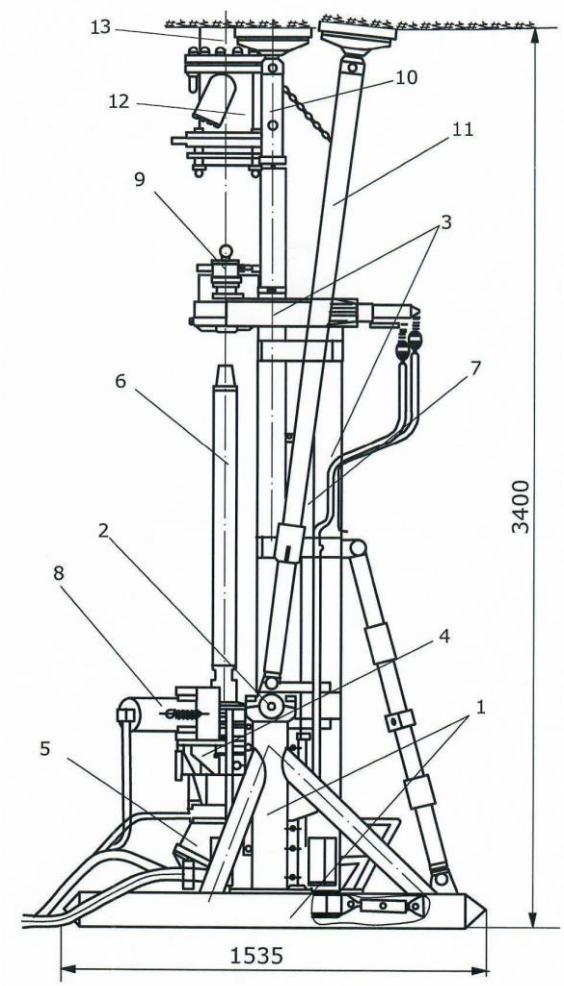


Рис.9.3. Буровой станок УДБ-8 в положении при бурении восстающей дренажной скважины

Буровой станок (см.рис.9.3) состоит из нижней рамы 1, на которой через шарнир 2 установлена поворотная рама 3. На поворотной раме 3 установлен редуктор 4 с гидромотором 5. Шпиндель редуктора 4 приводит во вращение буровой снаряд 6. Подачу редуктора вперед-назад осуществляет гидроцилиндр 7. Свинчивание - развинчивание бурового снаряда осуществляется механизмом разворота (гидрораскрепителем) 8. Захват буровых штанг, фильтровой колонны от поворота осуществляет гидрозахват (гидроключ) 9. Раскрепление бурового агрегата на точке ведётся неподвижными 10 и поворотными 11 винтовыми домкратами. На рис.9.3 показана также обвязка устья скважины: герметизатор 12, кондуктор 13.

Маслостанция служит для обеспечения рабочих приводов бурового агрегата: гидромотора, цилиндра подачи, гидрораскрепителя, гидроключа рабочей жидкостью (маслом) с параметрами (давлением, расходом), обеспечивающими достижение технических характеристик агрегата: частоты вращения бурового снаряда, крутящих моментов, осевого усилия в рабочих цилиндрах. Основными узлами маслостанции являются: маслобак, три насосных блока с приводами от электромоторов и с расчётной мощностью, рама и электрический щит управления электромоторами.

Пульт управления служит для передачи рабочей жидкости к гидроприводам бурового агрегата (гидромоторам, гидроцилиндрам) и поддержания параметров рабочей жидкости, обеспечивающих заданного режима бурения (осевого усилия, частоты вращения, крутящих моментов), оператором (буровым мастером). Пульт состоит из каркаса, регуляторов, распределителей потока рабочей жидкости и контрольно-измерительной аппаратуры (манометров).

Расчёт и подбор гидронасосов, электромоторов маслостанции производят для получения необходимых технических характеристик бурового агрегата: осевых усилий, частоты вращения бурового снаряда, крутящих моментов.

Подбор гидроагрегатов пульта управления осуществляют исходя из параметров выбранных гидронасосов и гидромоторов.

В состав установки входит комплект бурового снаряда. При сооружении восстающих дренажных скважин применяют в основном два типа буровых инструментов: буровые снаряды и фильтровые колонны. Буровые снаряды используются при бурении по породам, залегающим ниже водоносного горизонта, фильтровые колонны – для вскрытия и бурения в водоносном горизонте.

Обе конструкции разрабатывались применительно к особенностям бурения восстающих скважин и вскрытию водоносных горизонтов снизу вверх.

ГЛАВА 10

БУРЕНИЕ ВОССТАЮЩИХ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН И ВСКРЫТИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Кроме конструкторских решений на буровую установку в конструкторском отделе была разработана документация на технологическое оборудование для сооружения восстающих дренажных скважин, которое также выпускается в институте ВИОГЕМ. Технологическое оборудование предназначалось для обеспечения эффективного и безопасного выполнения следующих операций:

- бурения восстающих и наклонных дренажных скважин в условиях подачи на буровой инструмент промывочной жидкости и поступления подземной воды в скважину при вскрытии обводнённых пород;
- удержания фильтровой колонны в скважине;
- перекрытия в процессе бурения всех каналов поступления подземных вод, в том числе разжиженных рыхлых пород, в подземную горную выработку;
- бурения фильтровой колонной на один водоносный горизонт;
- бурения фильтровой колонной на два водоносных горизонта;
- обеспечения эффективной эксплуатации скважины, пробуренной на водоносный горизонт, сложенный обводнёнными песками, гравием, галечником, трещиноватыми породами;
- управление организованным отводом дренажных вод.

Технологическое оборудование для восстающих дренажных скважин включает в себя следующие узлы:

- обвязка устья скважины;
- буровой снаряд;
- фильтровая колонна;
- водовыпуск.

Восстающая скважина бурится из подземной горной выработки, расположенной ниже осушаемого водоносного горизонта, в связи с чем на её устье, от начала до конца бурения постоянно действует гидростатическое давление, величина которого в начальный период равна глубине скважин, а после вскрытия водоносного горизонта давление на устье возрастает на величину гидростатического давления пластовой жидкости. По соображениям безопасности вскрытие водоносного пласта скважиной должно осуществляться только в режиме управляемого отбора воды и выноса водопесчаной пульпы из пласта, т.к. свободный отток подземных вод через скважину может спровоцировать неуправляемый вынос смеси в выработку и привести к её затоплению.

Для разработки технических средств и технологий, обеспечивающих безопасное ведение буровых и горных работ, было проведено большое количество опытно-конструкторских и экспериментальных исследований. Особое место в разработках занимали вопросы герметизации устья скважины для обеспечения управлением выходящей из скважины промывочной

жидкости и водопесчаной смеси при вскрытии водоносного горизонта.

Вначале была создана сравнительно простая конструкция герметизирующего устройства [293], позволяющего осуществлять контроль за оттоком жидкости через кольцевое пространство, образованное бурильной колонной и стенками скважины, и герметизировать бурильную колонну.

Недостатками такого герметизатора бурильной колонны являлись его ненадёжность и ограниченность функциональных возможностей. Практика показала, что при сложном движении бурильной колонны (вращении и поступательном вверх), наличии вибрации бурового снаряда, пазов на его соединительных муфтах, уплотнительные элементы в виде набора резиновых колец быстро выходят из строя, что приводит к протечкам на контакте бурильная колонна – резиновое кольцо. Для их устранения нажимное кольцо подтягивают. При давлении на герметизирующий элемент столба пластовой воды мощностью до 200 м и более за счёт протечек воды создаются неблагоприятные условия для обслуживания буровой установки, приводящие к нарушению правил техники безопасности (работа в мокрой спецодежде на скользких поверхностях элементов бурового агрегата, с которых производится подтягивание нажимного кольца, работа на высоте 2,0-2,5 м).

При значительном износе резиновых колец уплотнительного элемента их замена невозможна, что приводит к поступлению через неисправный уплотнительный элемент большого количества пластовых вод и песка, а также разрушению и порче находящегося в подземной выработке оборудования.

С целью повышения надёжности работы буровой установки и эксплуатации герметизатора бурильной колонны в динамике, увеличения срока его использования и безопасности ведения горных работ при сооружении восстающих, наклонных и нисходящих дренажных скважин с высоким давлением на устье, улучшения условий труда обслуживающего персонала, обеспечения возможности ремонта герметизатора в технологическом процессе, механизации работ по герметизации кольцевого пространства были проведены исследования по совершенствованию этого узла.

Исходя из практического опыта, для выполнения требования, что обвязка устья скважины предназначена для регулируемого выпуска промывочной жидкости и дренажной воды из скважины и её перекрытия в случае аварийного поступления подземных вод с выносом породы в горную выработку, была в модернизированном варианте разработана конструкция, представленная на рисунке 10.1. Конструкция включала герметизатор с набором шайб и уплотнительных элементов для обжатия бурового снаряда и фильтровой колонны с использованием нажимного фланца 5 и стяжных болтов или гидроцилиндров 6. Вся жидкость, поступающая в скважину, отводится по патрубку 4.

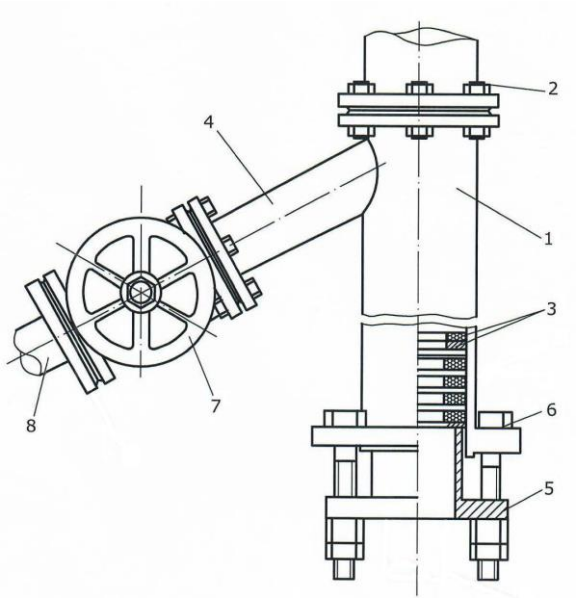


Рис. 10.1. Обвязка устья скважины:
1 – корпус герметизатора; 2 – кондуктор скважины; 3 – набор шайб и уплотнительных элементов; 4 – отводной патрубок; 5 – фланец нажимной; 6 – болты стяжные (или гидроцилиндры); 7 – задвижка; 8 - патрубок

Размеры уплотнительных элементов выбираются в зависимости от диаметра фильтровой колонны и внутреннего диаметра корпуса герметизатора.

Показанная на рис.10.1 обвязка устья скважины предназначена для дренажных скважин, при сооружении которых используются одинарные фильтровые колонны. При использовании двойных фильтровых колонн в обвязке предусматриваются крепления и для наружной фильтровой колонны. При бурении восстающей скважины герметизатор крепится к кондуктору, который устанавливается после проходки скважины вращательным или ударно-вращательным способом на глубину 3-5 м от контура горной выработки. Основным способом крепления кондуктора в твёрдых породах является взрыв детонирующего шнура (ДШ) внутри кондуктора, в котором устанавливают две катушки с ДШ.

После крепления кондуктора и монтажа герметизатора выполняются работы по определению герметичности и страгивающей нагрузки кондуктора.

Введение в конструкцию герметизатора гидроцилиндров обеспечило исключение попадания холодной пластовой жидкости на обслуживающий буровую установку персонал. Кроме улучшения условий работы буровой бригады устройство позволяет увеличить глубину бурения по водоносному горизонту, осуществлять любые ремонты буровой установки без протечек жидкости через устье скважины. Конструкция позволяет на период прекращения бурения обжатие бурильной колонны уплотнительным элементом путём подачи масла в гидроцилиндры, в которых перемещаются штоки к оси скважины и установленные плашки.

Величина удельного давления на уплотнительный элемент определяется из выражения

$$\sigma_{сж} = \frac{Ргц}{Fпл} \text{ , кГс/см}^2 \text{ ,} \qquad (10.1)$$

где, $\sigma_{сж}$ – величина удельного давления, создаваемого двумя дополнительными гидроцилиндрами на плашку, кГс/см^2;

$F_{пл}$ – площадь плашки, см^2;

$P_{гц}$ - осевое усилие, создаваемое дополнительным гидроцилиндром, кГс/см^2.

$$P_{гц} = F_п \cdot g, \text{ кГс ,} \qquad (10.2)$$

где $F_п$ – площадь поршня гидроцилиндра, кГс/см^2;

g –величина давления масла, подаваемого под поршень дополнительного гидроцилиндра, кГс/см^2.

В зависимости от величины пластового давления, которое может создаваться в корпусе при неизменной площади поршня, выбирают давление масла, подаваемого к паре дополнительных гидроцилиндров.

Помимо гидравлического варианта привода гидроцилиндров имеется и вариант механического привода.

Герметизатор разработан под бурильную колонну Ø 89 мм и испытан на рабочее давление 63 атм.

Герметизатор крепится к кондуктору скважины. Для каждой скважины должны быть рассчитаны длина и диаметр кондуктора. Эта методика расчёта сводится к исключению страгивания зацементированного кондуктора от суммарного воздействия веса самой тяжелой бурильной или фильтровой колонны, подвешенной на нём, и давления созданного напором пластовых вод. Буровой снаряд ($G_{бс}$) вместе с гидростатическим столбом водяного пласта ($G_{вс}$) не вырвет кондуктор из массива горных пород при условии

$$к\tau_{сдв} \leq [\tau_{сдв}], \qquad (10.3)$$

где $\tau_{сдв}$ – допустимое сопротивление сдвигу между тампонажным камнем и

стенкой кондуктора или тампонажным камнем с горной породой (что меньше) при коэффициенте запаса κ=3±4, Н/м^2. Вес бурового снаряда равен

$$G_{бс} = g \cdot L, \qquad (10.4)$$

где g - вес 1 п.м. бурового снаряда, Н;

L – длина бурового снаряда, м.

Гидростатическое давление пластовых вод на кондуктор

$$G_{вс} = h \cdot F_{кол}\ , \qquad (10.5)$$

где h – напор водяного столба, Н/м^2;

$F_{кол}$ – площадь кольцевого сечения между бурильными трубами и кондуктором, м^2.

$$F_{кол} = = 0{,}785(d_{вн}{}^2 - d_{бт}{}^2), \qquad (10.6)$$

где: $d_{вн}$ – внутренний диаметр кондуктора, м;

$d_{бт}$ – диаметр бурильных труб, м.

Удельная нагрузка на контакте кондуктора с тампонажным камнем определяется по уравнению

$$\tau_{сдв} = \frac{G_{бс} - + G_{бс}}{S_{бол}} \qquad (10.7)$$

где, $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности кондуктора, м^2.

Площадь боковой поверхности равна:

$$S_{бок} = \pi D_{вн} \cdot l\ , \text{м}^2, \qquad (10.8)$$

Где, $D_{вн}$ – внешний диаметр кондуктора, м;

l -длина кондуктора, м.

Длина кондуктора может быть определена по уравнению:

$$l = \frac{gL + 0{,}785h(Dвн - d_{бт}\ )}{\pi Dвн\, \tau_{сдв}}\ , \text{м}. \qquad (10.9)$$

Приведенная методика позволяет определить длину кондуктора для цементации затрубного пространства при различных зазорах между кондуктором и скважиной. При малых зазорах и невысоких гидростатических напорах часто применяют метод взрыва детонирующего шнура для расклинивания кондуктора. Его длина на практике составляет 1,5-2,0 м.

Герметизатор устья скважины рассчитывают из условий прочности болтовых соединений на фланцах при воздействии на него всего веса бурового снаряда $G_{бс}$ и напора столба воды $G_{вс}$.

При высоких гидростатических напорах осушаемого водоносного горизонта, как, например, на Яковлевском руднике, когда давление достигает 600 м водяного столба, применяют комбинированный способ крепления

кондуктора. В целях безопасности ведения работ каждый кондуктор и устье скважины после его закрепления подвергают гидравлическим испытаниям на страгивание кондуктора и прочность резьбовых соединений при давлениях, превышающих пластовое на 25-30 %.

Наряду с разработкой технических средств по герметизации устья скважины велись работы по созданию рациональной конструкции восстающей дренажной скважины, технологии бурения до вскрытия и после вскрытия водоносного горизонта, определению притоков к скважине, конструкции фильтров, оценке параметров режима бурения, величины безопасной перемычки, оставляемой в породах перед вскрытием водоносного горизонта.

Для бурения скважины от кондуктора до защитной перемычки перед водоносным горизонтом применяют буровой снаряд, состоящий из гладкоствольных буровых штанг диаметром 89 мм с приварными наконечниками, имеющими замковую резьбу 3-66 или 3-76. На передней штанге устанавливают переходник с обратным клапаном. Переходник имеет резьбу под выбранный типоразмер шарошечного долота. Бурение скважины этим типом снаряда ведётся до защитного целика породы, находящегося в подошве водоносного горизонта.

Параметры бурения: осевое усилие, частота вращения, расход промывочной жидкости определяют по известным методикам с учётом применяемых породоразрушающих инструментов и физико-механических свойств пород. После определения расчётного осевого усилия на буровое долото необходимо вносить поправку на влияние собственного веса бурового инструмента. Так, например, расчётное осевое давление на долото должно быть $P_{ос} = кД$, где $к$=12±13 кН на 1 см диаметра долота; $Д$ – диаметр долота, см.

При бурении восстающих скважин осевое усилие в любой точке будет определяться

$$P_{ос.факт} = кД + gL_{н}. \qquad (10.10)$$

При подборе давления промывочного насоса необходимо учитывать, что кроме обычных гидравлических сопротивлений, создаваемых в циркуляционной системе (буровой насос-долото-устье скважины), при бурении восстающих скважин в нагнетательной линии давление увеличивается пропорционально глубине скважины на величину $\Delta P_1 = \gamma_{пс} \cdot L_{ск}$ Н/м^2, где $\gamma_{пс}$ - удельный вес промывочной жидкости, Н/м^3.

При вскрытии водоносного горизонта подачу промывочной жидкости к шарошечному долоту можно обеспечить только преодолением ещё и гидростатического давления столба воды в пласте

$$\Delta P_2 = \gamma h, \text{ Н/м}^2, \qquad (10.11)$$

где γ- удельный вес воды в пласте, Н/м^3;

h - гидростатическое давление столба воды в пласте, м. вод. ст.

Тогда окончательно давление на промывочном насосе должно быть

$$P_{нас} = P_{цс} + \Delta P_1 + \Delta P_2, \qquad (10.12)$$

где $P_{цс}$ – общее давление в циркуляционной системе, Н/м^2.

Бурение по вышеописанной технологии осуществляют до глубины, при которой забой скважины не доходит до вскрываемого водоносного пласта, как правило, на 3-5 м. После этого всю компоновку бурового снаряда извлекают из скважины и собирают фильтровую колонну, предназначенную для вскрытия водоносного горизонта.

На рис.10.2 показаны все конструкции буровых инструментов. Основным способом бурения дренажных скважин является вращательный с использованием шарошек и пневмоударников.

На рис. 10.2а показана конструкция бурового снаряда, предназначенного для бурения в породах, залегающих ниже водоносного горизонта. Буровой снаряд состоит из шарошечного долота 1, переводника с обратным клапаном 2, направляющих снарядов 3 и буровых штанг 4 диаметром 89, 73, 63 и 50 мм. Направляющие снаряды разработаны для следующих диаметров шарошечных долот: 151, 132, 112, 93 и 76 мм. Каждый направляющий снаряд имеет наружную и внутреннюю конусные резьбы. На наружной поверхности корпуса снаряда навариваются продольные планки, винтовые ленты или толстостенные трубы. Диаметр направляющего снаряда меньше диаметра шарошечного долота на 4-5 мм. Наличие в колонне буровых штанг направляющих снарядов, наружный диаметр которых близок диаметру шарошечного долота, позволяет сохранить заданное направление дренажной скважины. К направляющим снарядам предъявляются высокие требования по качеству изготовления.

Каждая буровая штанга представляет собой стальную трубу соответствующего диаметра (89, 73, 63 и 50 мм), к обоим концам которой приварены замки с наружной и внутренней конусными резьбами. Замок с внутренней резьбой имеет снаружи лыску для подкладной вилки, с помощью которой буровой снаряд удерживается вовремя спуско-подъемных операций.

Длина буровой штанги и направляющего снаряда для буровых станков УДБ-8, УДБ-12, УДБ-8-01, УДБ-8-01М – 1200 мм, для бурового станка УДБ-9 900 мм.

В состав бурового инструмента входят также переводники под шарошечные долота. Наружный диаметр переводников равен диаметру центрирующих снарядов, переводники выполняют роль центраторов.

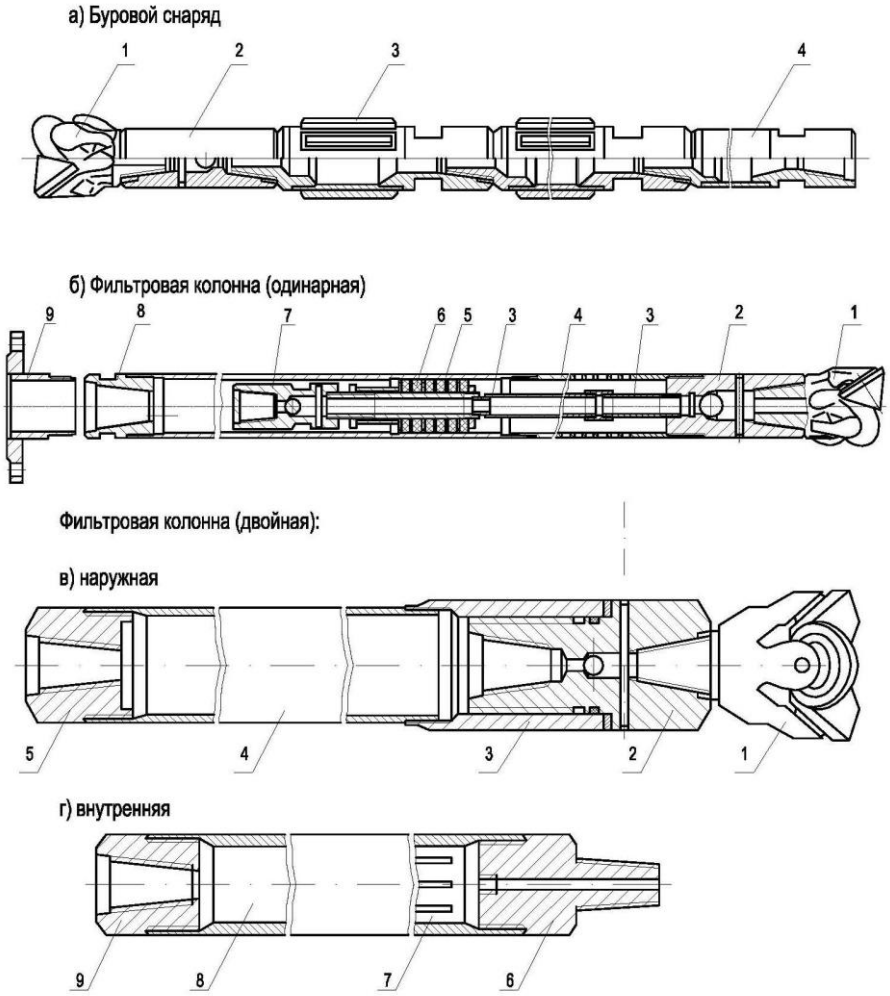


Рис. 10.2. Буровые инструменты для восстающих дренажных скважин

Буровой снаряд рассчитан на передачу осевой нагрузки и крутящего момента при бурении, а также крутящего момента при свинчивании и развинчивании буровых штанг. Так, например, буровой снаряд диаметром 89 мм рассчитан на передачу осевой нагрузки до 150 кН и крутящего момента до 2500 Нм при бурении и до 10000 Нм при свинчивании и развинчивании буровых штанг.

На рис.10.2б и 101.2в показаны фильтровые колонны, которые применяются для вскрытия водоносных горизонтов, сложенных обводнёнными песками, песчано-гравийными, гравийно-галечниковыми породами, обводнёнными трещиноватыми или разрушенными породами, и посадки фильтровой части колонны в интервал обводнённых пород. Разработаны, испытаны и используются два типа фильтровых колонн: одинарная и двойная.

На рис.10.2б показана конструкция одинарной фильтровой колонны, предназначенной для вскрытия одного водоносного горизонта. Она состоит из следующих узлов: шарошечное долото 1, переводник с обратным клапаном 2, пакерные трубы 3, фильтровые трубы 4, обсадные трубы 5, пакер 6, переводник с обратным клапаном 7, переводник 8, фланец 9.

Основным элементом фильтровой колонны являются фильтровые трубы. Практически используются фильтровые трубы диаметром 89, 108 и 114 мм. В последние годы выполнены разработки по использованию фильтровых труб диаметром 73 и 63,5 мм, что позволяет снизить затраты на выполнение буровых работ, уменьшить нагрузки на буровые станки и облегчить весь процесс бурения скважины фильтровой колонной. Толщина фильтровых труб от 6 до 8 мм, длина 1260 мм. Труба имеет наружную и внутреннюю конусные резьбы, перфорирована продольными пазами 150х2 мм. Скважность фильтра составляет не более 10 %. В состав фильтровой колонны входит несколько фильтровых труб, общая длина которых выбирается в зависимости от мощности водоносного горизонта или длины интервала вскрываемого пласта, из которого планируется отбор воды.

Возможна также перфорация фильтровой трубы круглыми отверстиями различным диаметром. В этом случае внутри трубы устанавливается дополнительный фильтр (синтетический, стеклопластиковый, металлический сетчатый или любой другой для конкретного гранулометрического состава пород водоносного горизонта и назначения дренажной скважины). Основными элементами такой фильтровой трубы являются наружная труба, перфорированная круглыми отверстиями, стопорные кольца и внутренний фильтр.

Переводник с обратным клапаном предохраняет поступление воды из водоносного горизонта через шарошечное долото внутрь фильтровой колонны и обеспечивает поступление промывочной жидкости из пакерных труб к шарошечному долоту. Он устанавливается в верхней секции фильтровой колонны и вместе с шарошечным долотом оставляется в скважине.

Пакер также предохраняет поступление воды из водоносного горизонта через фильтровые трубы внутрь фильтровой колонны и обеспечивает проход промывочной жидкости к шарошечному долоту. Он состоит из корпуса,

клапана и уплотнительных резиновых колец.

Пакерные трубы служат для подвода промывочной жидкости к шарошечному долоту.

Пакер и пакерные трубы устанавливаются в фильтровой колонне временно, и после посадки фильтровой колонны на заданную глубину они извлекаются.

Трубы обсадные имеют наружную и внутреннюю конусные резьбы. Длина этих труб обычно 1260 мм, толщина 7-8 мм.

Фланец служит для подвешивания фильтровой колонны к кондуктору.

Все элементы фильтровой колонны рассчитаны на передачу крутящего момента и осевой нагрузки для обеспечения процесса бурения скважины шарошечным долотом в мягких и твёрдых породах.

На рис.10.2 в, г показана конструкция двойной фильтровой колонны, предназначенной для вскрытия двух водоносных горизонтов или одного водоносного горизонта большой мощности, когда требуется установить фильтр на всю мощность пласта. Основные узлы наружной (в) и внутренней (г) колонн: шарошечное долото 1, переводник с обратным клапаном 2, корпус 3, обсадные трубы 4, переходник 5, переходник 6, фильтровые трубы 7, обсадные трубы 8, переходник 9.

Наружная колонна диаметром 114 мм показана без фильтров, пакера и пакерных труб. Такая колонна перекрывает определенный интервал скважины и не предназначена для забора воды из водоносного горизонта. Если есть необходимость использования её для отвода подземных вод из водоносного горизонта, в состав её включаются фильтры, пакер и пакерные трубы. После посадки наружной колонны на заданную глубину пакер и пакерные трубы извлекаются, что обеспечивает работу фильтровой части колонны.

Внутренняя фильтровая колонна состоит из переходника 6 для соединения с долотом, фильтровых труб 7, переходника 9 на вращатель бурового станка, а также пакера и пакерных труб (на рисунке не показаны).

Собранная внутренняя фильтровая колонна подаётся к корпусу 3, соединяется с ним по резьбе, и бурение скважины осуществляется такой фильтровой колонной до проектной отметки.

После посадки в скважину фильтровой колонны, извлечения пакера и пакерных труб устье скважины оборудуется водовыпуском, в конструкцию которого входят запорная задвижка, 2-3 отводных патрубка со своими задвижками. Иногда водовыпуск укрепляют подпорной стойкой.

По разработанной конструкторской документации, изготавливается и используется двойная фильтровая колонна 114/89 мм, которая имеет наружную колонну диаметром 114 мм и внутреннюю диаметром 89 мм.

По условиям безопасности ведения буровых работ в горных выработках, исключающих возможность прорыва водопесчаной смеси из

водоносного горизонта в горную выработку и её затопление, бурение вторым типом снаряда с момента вхождения его в целик до окончания бурения должно производиться одним рейсом. В связи с этим к материалам и конструктивному исполнению как отдельных деталей и узлов, так и изделию в целом предъявляются особые требования:

- коррозионная стойкость к воздействию дренажных вод;
- высокая механическая прочность материалов фильтровой колонны, способной выдерживать максимальные нагрузки, развиваемые буровым агрегатом (осевое усилие 8,0 тс и крутящие моменты 150-170 кгс/м);
- высокая надёжность работы всех его деталей и узлов;
- ресурс породоразрушающего инструмента, применяемого для бурения должен обеспечить проходку скважины от входа в целик до завершения бурения скважины.

Важнейшим элементом компоновки конструкции восстающей скважины, обеспечивающей долговременный высокопроизводительный отбор воды, является фильтр. От его физико-механических, фильтрационных свойств, стойкости к химической и механической кольматации зависит дебит скважины и срок её службы. В основном для восстающих скважин используются фильтры на трубчатом каркасе. Весьма интересной выглядит запатентованная институтом ВИОГЕМ конструкция фильтра [294, 295]. По данному техническому решению фильтр обладает высокой механической прочностью, что сопоставимо с трубчатым каркасом, а по гидравлическим показателям и устойчивости к кольматажу не уступает высокоэффективным каркасно-стержневым, которые используются при сооружении скважин с поверхности земли.

Фильтр характеризуется высокой надёжностью, его конструкция показана на рис. 10.3 и 10.4. Он состоит из каркаса 1, выполненного из неразъёмно соединённых между собой кольцевых секторов, обращённых вогнутой стороной к центральной части фильтра, на торцах секторов размещены пазы 2 и 3, которые выполнены с чередованием глубины. В пазы 2 уложена проволочная спираль 4, а в пазы 3 – спираль 5, образующие фильтрующую поверхность.

Фильтрующая поверхность может быть образована путём намотки и одной проволоки, пазы 2 и 3 могут быть выполнены разной глубины. Разность между глубинами соседних пазов может быть методом подбора определена по зависимости

$$h = \sqrt{ad_{50}(ad_{50} + 2dnp) - b(b + 2d_{np})}, \qquad (10.13)$$

где d_{50} – средний диаметр частицы дренируемой породы (фильтрующей обсыпки), мм;

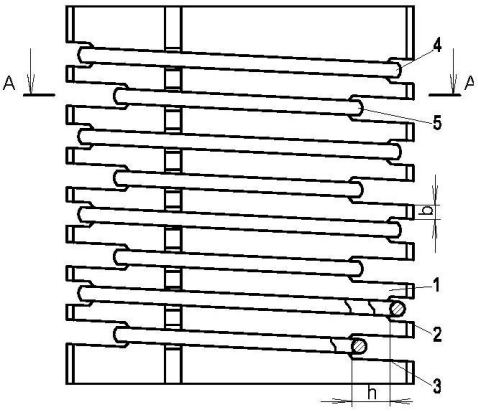


Рис. 10.3. Фильтр восстающих скважин, общий вид

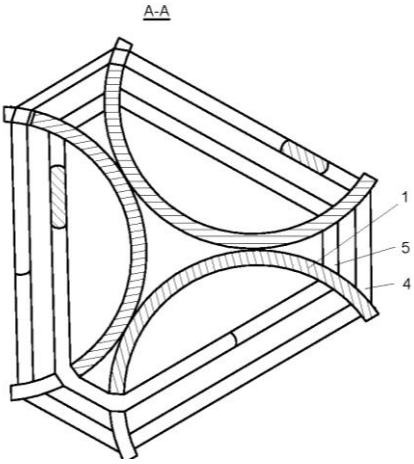


Рис. 10.4. Фильтр восстающих скважин, разрез

b - расстояние между пазами, мм;

$d_{пр}$ – диаметр уложенной проволоки, мм;

a- эмпирический коэффициент, равный 1,5 - 4 (определён экспериментально только для высокодебитных скважин). Коэффициент *a* должен исключать избыточное пескование скважины.

Фильтр используют при бурении восстающей скважины следующим образом.

При посадке фильтра в водоносный горизонт путём бурения восстающей скважины фильтровой колонной (не показано) силовой каркас 1 воспринимает нагрузку со стороны водовмещающей породы и передаёт нагрузку от бурового станка на режущий орган (не показано).

После посадки фильтра в водоносный горизонт начинается взаимодействие между фильтрующей поверхностью и контактирующей с ней водоносной породой. Так как витки 4 и 5 спиральной обмотки, образующей водоприёмную поверхность, смещены один относительно другого за счёт неодинаковой глубины пазов 2 и 3, то создаются благоприятные условия для образования сводовых структур из крупных частиц водовмещающей породы на зазорах между витками, и тем самым уменьшаются контактные гидравлические потери напора.

Вследствие отсутствия тупиковых участков между силовым каркасом 1 и водоприёмной поверхностью и наличии между ними зазора, превышающего по размерам наиболее крупные размеры частиц водоносной породы,

исключается накопление частиц породы между проволочной обмоткой и каркасом, что также повышает гидравлические свойства фильтра. Каркас фильтра, образованный кольцевыми секторами, способствует сохранению естественного направления фильтрационного потока подземных вод в водоносных породах к сооружённой скважине и не вносит дополнительных искажений в его структуру, тем самым снимается часть потерь напора в прифильтровой зоне прилегающих пород, приходящаяся на конструкцию каркаса. Поток жидкости из прилегающей породы по поровым каналам, созданным перемещением частиц относительно отверстий между витками проволочной обмотки, поступает на водоприёмную поверхность и беспрепятственно принимается секторными элементами каркаса, и самотёком или принудительно откачивается по стволу скважины. Минимальная площадь контакта между водоприёмной поверхностью и каркасом фильтра практически исключает накопление кольматирующих солей на фильтрующей поверхности, длительную эффективную эксплуатацию фильтра.

Возможный вариант данной конструкции фильтра рассмотрим на примере дренажной восстающей скважины Соколовского подземного рудника. Каркас фильтра выполнен из обсадной трубы диаметром 127 мм. Труба разрезана по осевой линии на три части и полученные трубчатые секторы жёстко соединены сваркой выпуклыми сторонами к центру фильтра, на продольных торцах рёбер выполнены фрезеровкой пазы с чередованием глубины. Для условий дренажа крупнозернистых песков с d_{50} =1,5 мм при диаметре проволоки обмотки, равном 3 мм, и глубине наружных пазов, равной 1,2 мм, определяется, исходя из зависимости (13), разность между глубинами пазов для высокодебитной скважины составит h=3.0 мм.

Таким образом, глубина внутренних пазов составляет 3,0+1,2=4,2 мм.

При сооружении восстающей скважины фильтровой колонной благодаря жёсткости конструкции сохраняется каркас фильтра, следовательно, и размер, и геометрическая форма его водоприёмных отверстий, а также конфигурация водоприёмной поверхности, способствующая формированию естественного высокопроницаемого песчаного фильтра.

Модернизация конструкции фильтра связана с поиском вариантов изменения параметра b - расстояния между пазами [295]. Для увеличения скважности и уменьшения контактных сопротивлений параметр b можно изменять по длине фильтра. Один из вариантов его изменения показан на рис. 10.5 и 10.6.

В целом скважинный фильтр содержит каркас 1 с продольными рёбрами 2. Рёбра 2 имеют глубокие 3 и мелкие 4 пазы, расположенную в них проволочную обмотку 5, щели 6 и 7, образованные проволочной обмоткой 5, имеют неравную ширину. Причём ширина щели 6 по вертикали над

глубокими пазами 3 имеет больший размер, чем ширина щели 7, находящаяся под пазами 3, а расстояние b_1 и b_2 между пазами определяется по формулам

$$b_1 = \sqrt{d_{np}^2 + a_1 d_{50}(a_1 d_{50} + 2d_{np}) - h^2} - d_{np};$$

$$b_2 = \sqrt{d_{np}^2 + a_2 d_{50}(a_2 d_{50} + 2d_{np}) - h^2} - d_{np},$$

где b_1 — большее расстояние между пазами, м;

b_2 — меньшее расстояние между пазами, м;

d_{np} — диаметр проволочной обмотки, м;

d_1 — эмпирический коэффициент, равный 3,2-4,5 (определён экспериментально для высокодебитных скважин);

a_2 — эмпирический коэффициент, равный 2,0-3,5 (определён экспериментально для высокодебитных скважин);

d_{50} — средний диаметр частиц дренируемой породы, м;

h — разность глубины соседних пазов, м.

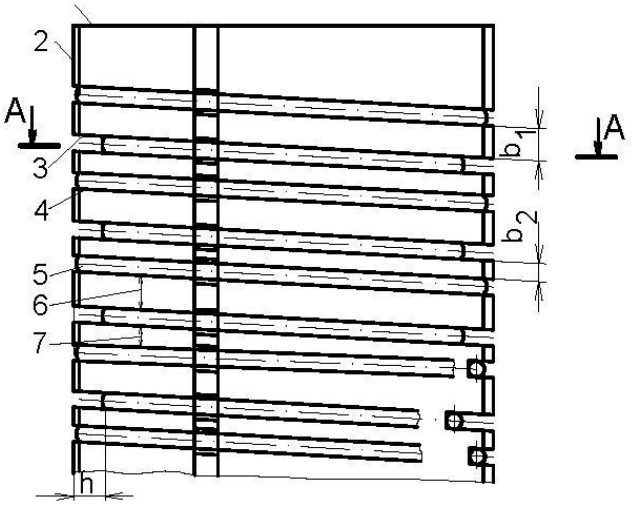


Рис.10.5. Общий вид фильтра

Разность глубин соседних пазов способствует созданию оптимальных условий для формирования сводовых структур 8 и 9 в приконтактной зоне и позволяет уменьшать контактные потери напора подземных вод и тем самым увеличивать производительность фильтра и степень осушения водоносного пласта (рис. 10.7).

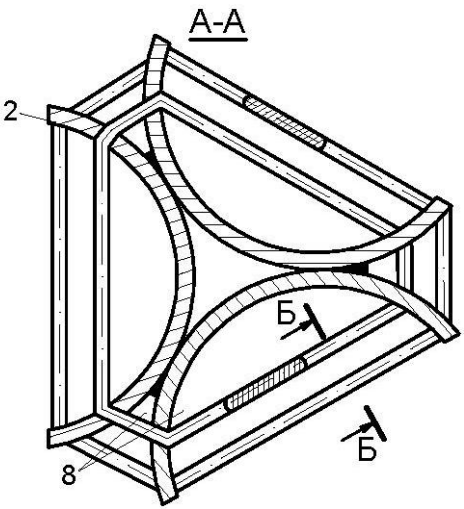


Рис. 10.6. Разрез фильтра по А-А

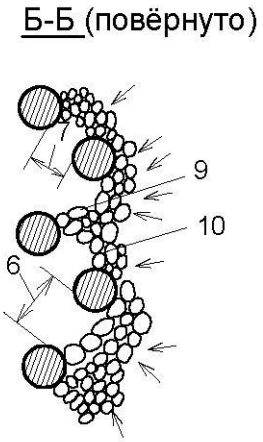


Рис. 10.7. Формирование сводовых структур

Формирование естественного фильтра происходит в результате сложного перемещения частиц породы в прифильтровой зоне, фильтрации жидкости в полость 8 фильтра, выноса мелких фракций на поверхность и образования сводовых структур 10 и 9 на пропускных отверстиях из крупных частиц. Описание математическими уравнениями сложных перемещений частиц невозможно, поэтому для его учёта вводится коэффициент, определяемый на основе экспериментов и по своему значению позволяющий создать высокопроницаемый естественный фильтр. С учётом этого коэффициента размер пропускной щели фильтра определяется выражением ad_{50} (a - эмпирический коэффициент). Коэффициент зависит от конструктивных особенностей водоприёмной поверхности фильтра и принимает различные значения.

По экспериментальным данным известно, что показателями, которые влияют на качественное образование сводов на пропускных щелях, являются также расстояние между осевыми линиями витков обмотки, равное $ad_{50}+d_{np}$ (где d_{np} — диаметр проволоки обмотки), разность h глубин между соседними пазами и расстояние между пазами b_1 и b_2.

Фильтр работает следующим образом. При вскрытии водоносного горизонта фильтровой колонной верхний торец каркаса 1 фильтра перекрывается заслонками (не показаны) во избежание попадания разрушенной породы в полость 8. После достижения проектной глубины

скважины осуществляется установка фильтра в водоносном пласте. После этого поток жидкости, проходя через проволочную обмотку 5, начинает выносить через фильтр мелкие фракции, а крупные задерживаются на контакте с витками проволочной обмотки 5. Частицы водовмещающей породы под влиянием потока фильтрующейся жидкости (на рис. 10.7 показана стрелками) перемещаются в приконтактной зоне сверху вниз. Частицы диаметром меньше и в пределах среднего диаметра d_{50} проходят через пропускные щели 6 и 7 и выносятся по стволу скважины, а из более крупных частиц образуются сводовые структуры10 и 9.

Так как наружный виток спиральной обмотки 5, размещённый в мелком пазу 4, находится по вертикали ближе к витку, расположенному в глубоком пазу 3, и выступает на величину h, то он является надёжной опорой для частиц водовмещающей породы. Частицы водовмещающей породы, опираясь на наружные витки спирали, образуют сводовую структуру 9 и не закупоривают пропускное отверстие между этими витками. Вследствие малого размера пропускных щелей 7 и в результате действия гидродинамических сил потока жидкости и силы тяжести сводовая структура 9 имеет устойчивую упаковку, являясь одновременно опорой для образования сводовой структуры 10. Снижение контактных потерь на фильтре позволяет во всех случаях увеличить производительность фильтра, степень осушения водоносного горизонта.

Пример. В дренажной восстающей скважине подземного рудника осушаемый водоносный горизонт представлен рыхлыми песчаными породами со средним размером частиц d_{50}= 1,0 мм. Коэффициент фильтрации водоносного горизонта достигает 5-7 м/сут, напоры составляют 10-15 м. Каркас фильтра выполнен из кольцевых секторов, получаемых из трубы диаметром 89 мм. Кольцевые сектора соединены между собой сваркой выпуклостью вовнутрь. На продольных рёбрах каркаса выполнены фрезерованием пазы с чередованием глубины - мелкий и глубокий. Глубина мелких пазов составляет 1,2, глубоких - 5,0 мм. Диаметр проволоки спиральной обмотки, укладываемой в пазы, равен 1,0 мм. Для дренирования песков с d_{50}= 1,0 мм принимаем эмпирические коэффициенты равные a_1= 4,2 и a_2= 3,2. Большее расстояние b_1 между пазами равно

$$b_1 = \sqrt{1^2 + 4{,}2 \cdot 1{,}0(4{,}2 \cdot 1{,}0 + 2 \cdot 1) - 3{,}8^2} - 1{,}0 = 2{,}5 мм.$$

Меньшее расстояние между пазами равно

$$b_2 = \sqrt{1^2 + 3{,}2 \cdot 1{,}0(3{,}2 \cdot 1{,}0 + 2 \cdot 1) - 3{,}8^2} - 1{,}0 = 0{,}8 мм.$$

Проволочная обмотка в пазы каркаса уложена двумя заходками. Общая длина фильтра составляет 2,0 м. На одном (верхнем) конце фильтра

устанавливается буровое долото, перекрывающее доступ разбуриваемой породы в пространство между каркасом и спиральной проволочной обмоткой.

При работе фильтра частицы породы на контакте с витками обмотки образуют сводовые структуры. Вследствие неравномерного по вертикали расположения пазов 3 и 4 между витками определены пропускные отверстия неодинаковой величины, что создаёт оптимальные условия для образования устойчивых сводовых структур и исключает закупоривание пропускных отверстий частицами породы. Параметры a_1 и a_2 уточняются по грансоставу осушаемых пород и могут быть несколько меньше рекомендуемых во избежание пескования скважин.

Одним из сложных вопросов является «пескование» скважин и оценка условий, при которых оно происходит, так при эксплуатации по этой причине выходит из строя до 20 % сооружённых скважин. Известно, что в основе «пескования» лежит явление переноса фильтрационным потоком жидкости мелких частиц песка. Для переноса частиц необходимо, чтобы энергия фильтрационного потока обеспечивала не только сдвиг частицы, но и перенос её со скоростью, равной средней скорости потока. Скорость движения потока, удовлетворяющая этим условиям, названа критической.

Методика её определения приведена в разделе 5.2. С целью уменьшения энергии потока и исключения условий, при которых происходит разрушение структуры скелета водоносного горизонта так же, как и при освоении любого типа водозаборных скважин, включение в работу восстающей дренажной скважины необходимо осуществлять плавно, начиная с дебитов, при которых градиент напоров в пласте остаётся ниже критического.

Вскрытие пласта является одним из ответственейших этапов в сооружении восстающей скважины. Этот этап выполняется в следующей последовательности. В подготовленную для вскрытия пласта скважину подают компоновку бурового снаряда с фильтровой колонной и приступают к бурению. Сначала разбуривается перемычка из подстилающих водоносный горизонт пород. Ее бурение должно вестись осторожно при невысоких осевых усилиях и скоростях бурения, тщательном контроле за расходом промывочной жидкости, характером выходящей из отводного патрубка пульпы, её объёмом. При резком увеличении механической скорости бурения, появлением в шламе песка необходимо поджать герметизатор, уменьшив максимально зазор между герметизатором и глухой частью фильтровой колонны и приоткрыть отводную задвижку. Вскрытие пласта осуществляется с минимальным расходом промывочной жидкости, частотой вращения бурового снаряда и максимальной подачей вперёд. После каждой пробуренной секции сбросная задвижка закрывается, выключается насос, быстро наращивается секция фильтровой колонны, включается промывочный

насос, приоткрывается задвижка на сброс, включается вращение и осуществляется подача фильтровой колонны.

После проходки скважины на длину, равную длине секции фильтровой колонны (1,2 м), цикл повторяется. Вскрыв дренируемый пласт на 3-5 м (до возрастания крутящих моментов, максимальных для буровой установки, и падения механической скорости бурения при максимально допустимой на фильтровую колонну подаче), процесс бурения фильтровой колонной заканчивается. После этого фильтровая колонна крепится к обвязке устья с помощью фланцев, на фланце фильтровой колонны ставится задвижка. В фильтровую колонну доставляется буровой снаряд диаметром 63 мм, соединяется с пакером, отворачиваются пакерные трубки от переводника и пакер с пакерными трубками извлекаются из скважины.

С помощью задвижки, установленной на фильтровой колонне, осуществляется заданный режим освоения скважины, рассчитанный на максимальную очистку прифильтровой зоны от мелких фракций песка, формирование эффективной прифильтровой зоны, исключающей пескование скважины, и обеспечение оптимального дебита скважины.

Подземный способ осушения является основным на Михайловском, Лебединском, Стойленском ГОКах, Яковлевском руднике. В настоящее время институт ВИОГЕМ совместно с ГОКами ведёт работы по совершенствованию техники и технологии бурения дренажных скважин, расширению области их применения.

Для работы в выработках, опасных по газу и пыли, создана буровая установка УДБ-12-РВ, нашедшая применение при ведении горных работ в объединении АК «АЛРОСА» (ПАО), разработаны способы вскрытия водоносных горизонтов с противодавлением, способ вскрытия водоносных горизонтов двумя колоннами. Способ и устройство для бурения горизонтальных и наклонных скважин в трещиноватых породах, разрабатываемых с помощью буровзрывных работ для разведки и осушения полезного ископаемого [296], заказчикам предлагаются документы с результатами практического опыта бурения дренажных скважин станками типа УДБ в различных гидрогеологических условиях.

В настоящее время отработан технологический регламент выполнения работ на каждом этапе сооружения восстающей дренажной скважины (ВДС), начиная от выпуска проектной документации до ввода скважины в эксплуатацию.

Работы по совершенствованию технических средств и технологий сооружения восстающих, наклонно-восстающих дренажных и иного назначения скважин в различных гидрогеологических условиях ведутся непрерывно в соответствии с заказами горных предприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ методов получения и обработки исходной информации, методики моделирования фильтрационных и миграционных процессов, технологии разработки проектно-сметной документации, оценки и адаптации того, что было создано на бумаге в проектной документации к реалиям природной обстановки при сооружении систем осушения, уровня развития технологического уклада, экономического спектра принимаемых решений, человеческого фактора и динамики изменения экологической ситуации позволяет наметить некоторые направления развития технологии осушения горных пород при разработке обводнённых месторождений полезных ископаемых.

1. Обилие как методов получения, так и объёма природной информации (геологической, геолого-структурной, гидрогеологической, геофизической, экологической) требует внедрения цифровых технологий её обработки и хранения. Целесообразно унифицировать имеющиеся цифровые методики и программное обеспечение, разработать новые на основе вероятностно-статистических методов для оценки количества и достоверности полученных параметров и показателей в исходной информации водно-физических и инженерно-геологических свойств горных пород, используемых при расчётах тех или иных технологий ведения горных работ.

2. Оценка уровня адекватности разработанной модели к имеющейся природной и техногенной обстановке, основывается на изменении входящих параметров и сравнении полученного результата с фактическими данными. Данный метод прошёл длительную апробацию и показал свою практическую эффективность на стадиях аналоговых моделей и на начальном этапе численного моделирования. Развитие цифровых технологий сделало доступным оценку чувствительности модели к изменению как одного, так и совокупности природных показателей к получаемым модельным результатам и сравнении их с фактическими данными. Дальнейшие разработки связаны с поиском методик автоматического изменения параметров самой модели и корректировки исходной информации, то есть использования искусственного интеллекта для адаптации модели и выбора оптимального

варианта как структуры дренажной системы, так и значений показателей, требуемых технологией защиты от обводнения горных выработок.

3. Приводимые в книге примеры разработки региональных и локальных моделей фильтрации и массопереноса для горных объектов, находящихся в различных природных условиях, однозначно свидетельствуют о необходимости максимального использования детерминированной информации. Однако, общий информационный поток о свойствах природной среды независимо от своего объёма всегда характеризует неполнозаданное пространство, особенно при создании региональной модели, что указывает на целесообразность придания модели для расчёта показателей дренажной системы вероятностного характера. Следовательно, перспективным является развитие направления с применением стохастического моделирования, накопления опыта разработки моделей на основе метода конечных объёмов и максимального использования достижений учения о фациях и формациях.

4. Накопленный опыт разработки проектно-сметной документации показывает, что технологически эффективным зачастую является применение не только устоявшихся традиционных технических решений, но и новых технологий, обоснование и внедрение которых в проектную документацию требует выполнения научно-исследовательских работ. При выборе структуры дренажной системы, технологических приёмов и технических средств в эскизном варианте нововведения проигрываются на этапе моделирования. Однако, в отдельных случаях, никакая детализация этих решений на локальных моделях в дальнейшем на стадии проектирования не позволяет учесть все особенности природной обстановки, поэтому требуется проведение экономически целесообразного опытно-промышленного внедрения на наиболее перспективном участке новых технических решений. В частности, это относится к применению технологии ГНБ, осушению пород нагнетанием в пласт газообразного флюида, а также других приведенных в монографии запатентованных технологий и технических средств.

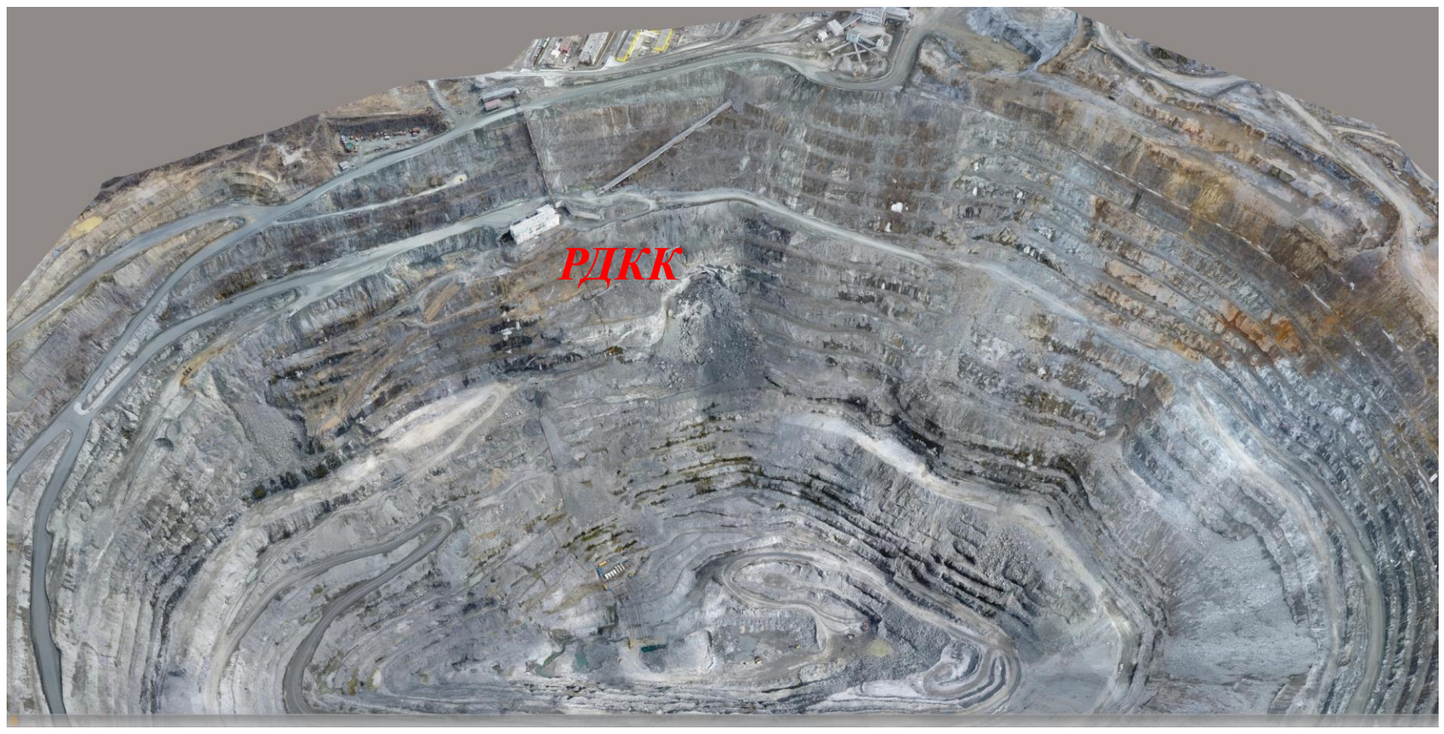
5. Техника и технические средства для защиты от обводнения горных выработок развиваются по двум основным направлениям: перехват большей части потока подземных вод до подхода его к зоне ведения горных работ, а также отвод воды непосредственно из этой зоны (1); создание слабопроницаемых барьеров в обводнённых породах (2). По первому направлению, кроме известных технических средств по сооружению скважин большого диаметра, явные перспективы имеют

технические средства, обеспечивающие перехват и отвод подземных вод на удалении 25-100 метров от горной выработки (например, с использованием буровых установок серии УДБ и УЛБ для сооружения горизонтальных скважин). Это приводит к снижению затрат на осушение и решению возникающих вопросов по охране водных ресурсов. Несомненно, повышенного внимания требует развитие технических средств для осушения слабопроницаемых грунтов, илистых естественных пород и техногенных отложений в отвалах и хвостохранилищах. Видится целесообразность развития технологий на базе иглофильтровых установок, обладающих высокой степенью мобильности и эффективности при осушении слабопроницаемых пород на небольшую глубину и в пределах развития ослабленных по прочностным свойствам плоскостей скольжения, в том числе на локальных оползнеопасных участках. При использовании разных технических средств и технологических приёмов защиты горных выработок от обводнения всегда необходимо учитывать уровень развития технологического уклада и текущую экономическую конъюнктуру вложения капитальных затрат и последующих эксплуатационных вложений на систему осушения.

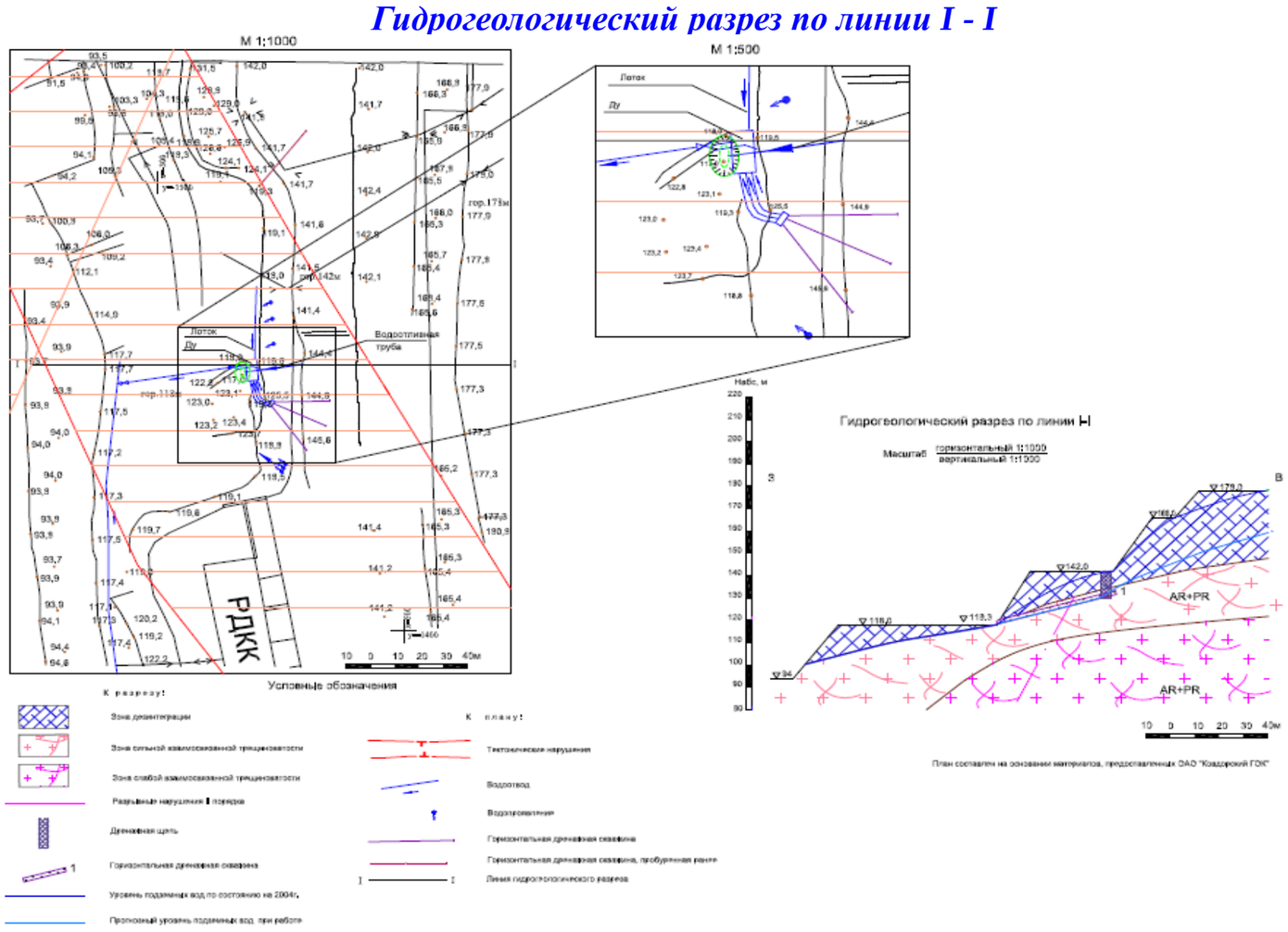
6. В отдельных специфических условиях конкурентоспособными осушению выступают технологии закрепления (например, цементация, замораживание и др.) водопроводящих трещин или массивов рыхлых пород, а также сооружения противофильтрационных завес. Данные технологии решают две задачи: предотвращение или в значительной степени уменьшение водопритока в горную выработку на заданном участке и одновременно повышение прочностных свойств горных пород. Экологически они обеспечивают охрану водных ресурсов как от истощения, так и от смешивания с загрязняющими компонентами. Комбинирование технологий закрепления и осушения горных пород позволяет получить новый синергетический эффект, обеспечивающий создание системы, гарантированно решающей вопросы защиты горных объектов от отрицательного влияния подземных вод и охраны окружающей среды.

ОСУШЕНИЕ ПРИБОРТОВОГО МАССИВА РУДНОГО ДРОБИЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО КОМПЛЕКСА (РДКК) ОАО «КОВДОРСКИЙ ГОК» И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ. РАБОЧИЙ ПРОЕКТ

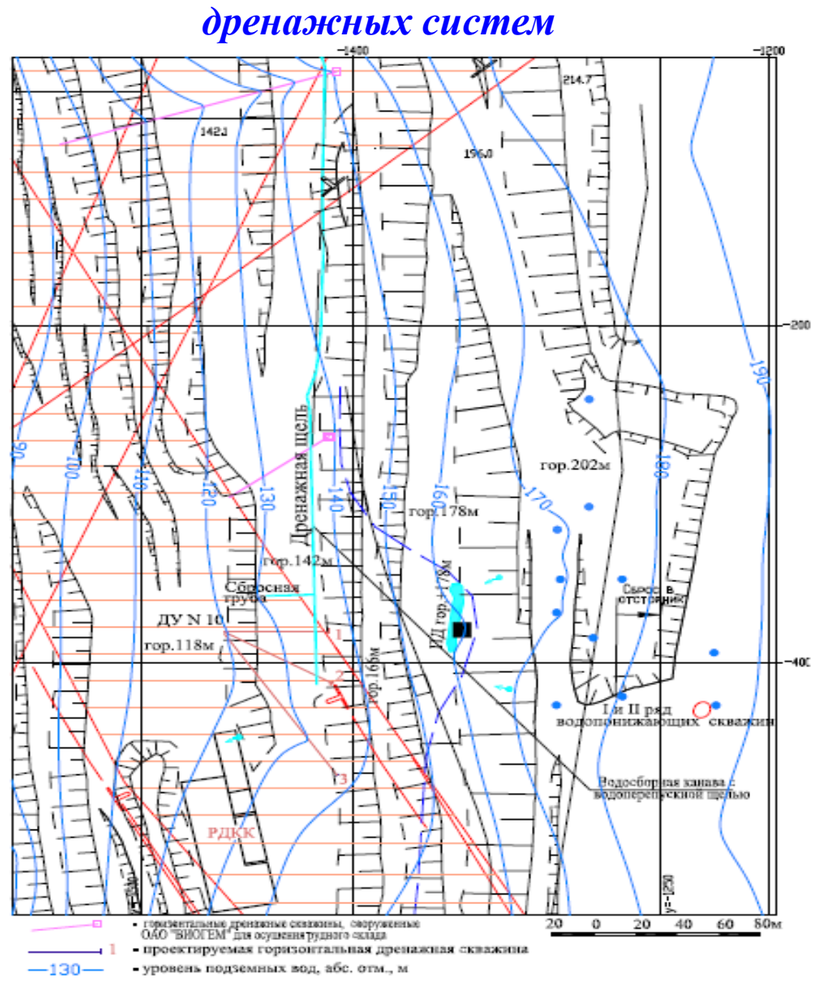
Карьер «Железный» Ковдорского ГОКа



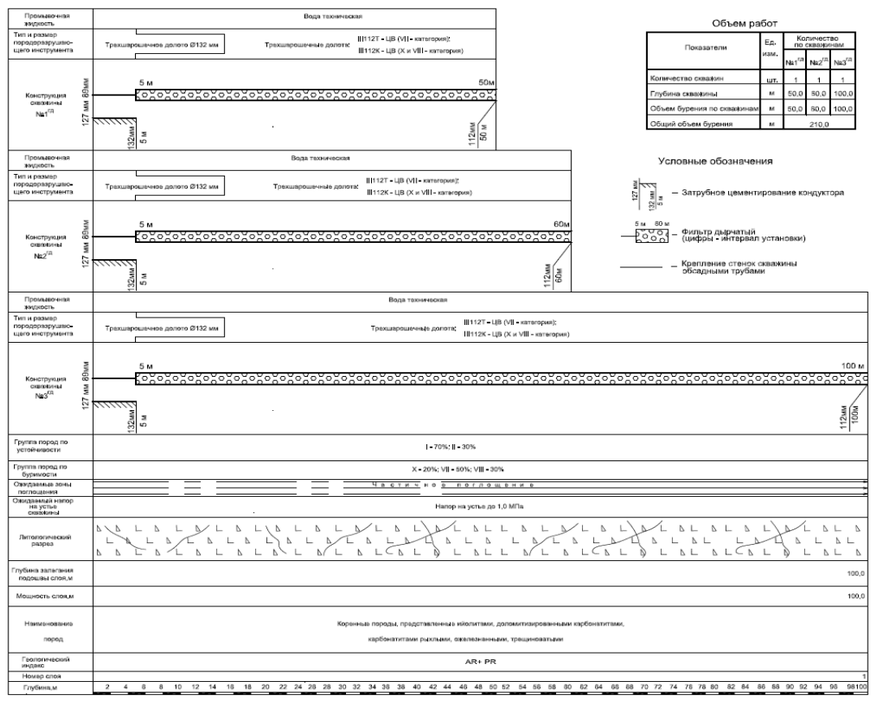
План расположения горизонтальных дренажных скважин. Гидрогеологический разрез по линии I - I



Прогнозная карта гидроизогипс при работе дренажных систем

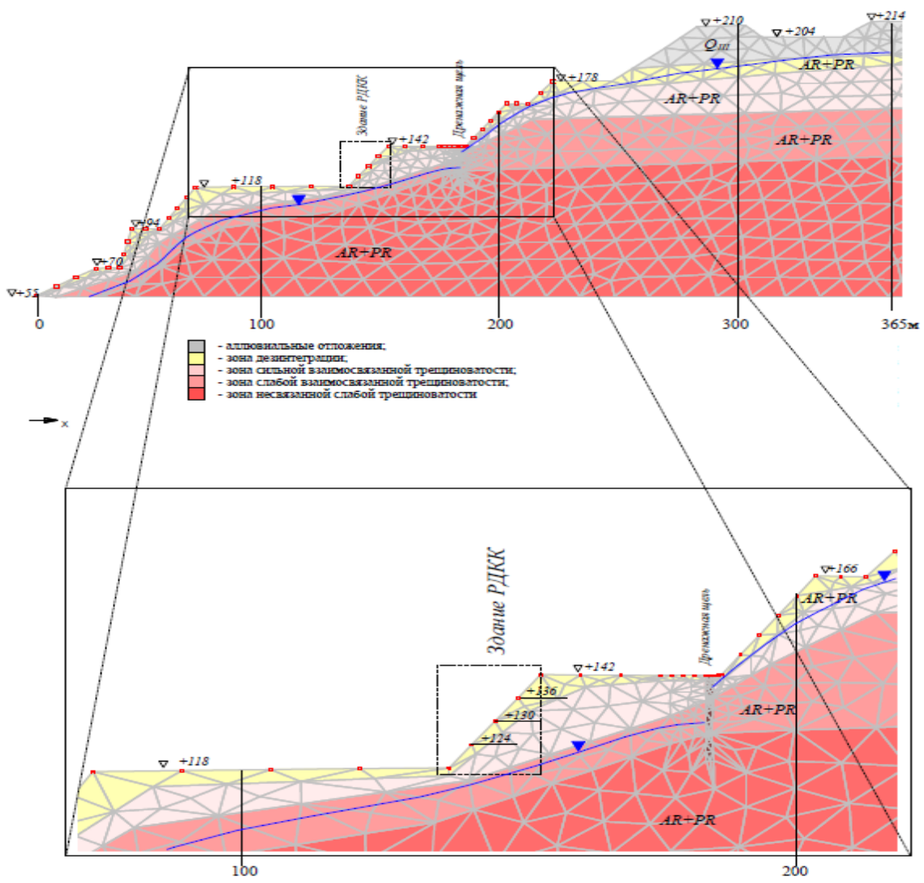


Конструкция ГДС и азимуты заложения



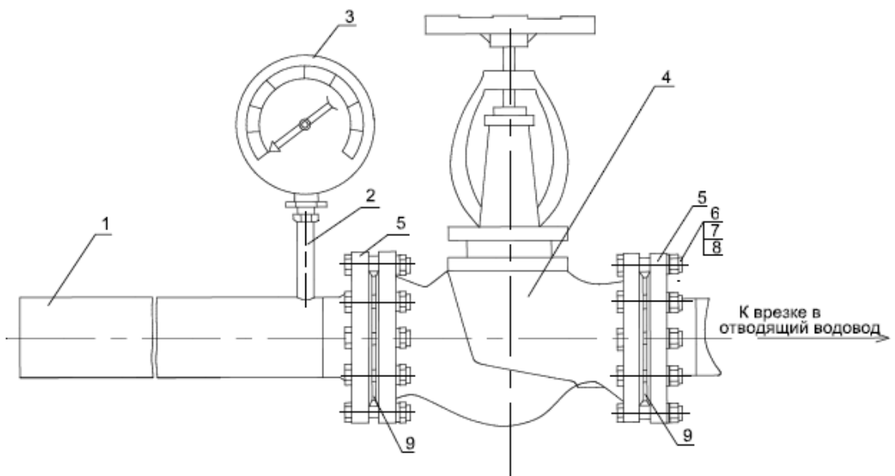
Бурение горизонтальной дренажной скважины (ГДС) установкой УДБ8-01 конструкции ОАО «ВИОГЕМ»

Профильная модель фильтрации подземных вод по линии: восточный узел ВПС - восточный борт карьера в районе РДКК при работе дренажных горизонтальных скважин №1-№3



Устье сооруженной ГДС

Обустройство водовыпуска ГДС



Технико-экономические показатели разработанного проекта

Капитальные затраты

№ п.п.	Виды работ	Капитальные затраты, тыс. руб. всего / в т.ч. оборудование В базисных ценах на 01.01.2001 г.
1	2	3
1.	Бурение горизонтальных дренажных скважин	254,4 / 0,81
2.	Напорный трубопровод	306,52 / -
3.	Электрооборудование и электроснабжение	473,45 / 11,62
4.	Механотехнологические решения	79,15 / 63,61
5.	Архитектурно-строительные решения	127,12 / -
6.	Отопление и вентиляция	0,88 / 0,53
	Итого:	**1241,16 / 76,57**
	в том числе: - объем строительно-монтажных работ (СМР)	1164,58

Годовые эксплуатационные расходы на 2006 г., тыс. руб.

№ п.п.	Наименование	Всего
1	2	3
1.	Расход электроэнергии, тыс. кВт·ч (1 кВт·ч = 0,682 руб.)	105,12
2.	Численность обслуживающего персонала (чел.), со ср. з/пл. 10 тыс. руб. в месяц	2
3.	Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	
	3.1. Заработная плата	486,416
	3.2. Единый социальный налог, 26,2%	127,44
	3.3. Стоимость электроэнергии	71,69
	3.4. Амортизационные отчисления:	
	на СМР-5%;	306,27
	на оборудование – 10%	18,99
	3.5. Разные цеховые расходы (1% от п. 3.4)	3,25
	Итого:	**1014,056**

ater Modeling System – система модели
подземных вод
(программа GMS версии 10.3)

кладных программ GMS представляет собой мощный элемент иску

интеллекта для решения задач фильтрации и массопереноса.

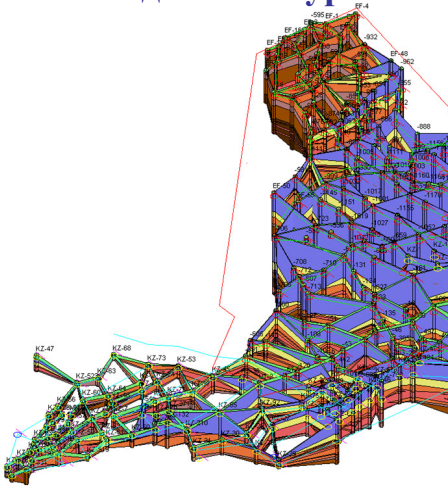
ческий пользовательский интерфейс, состоящий

ей, комбинация которых позволяет вводить и

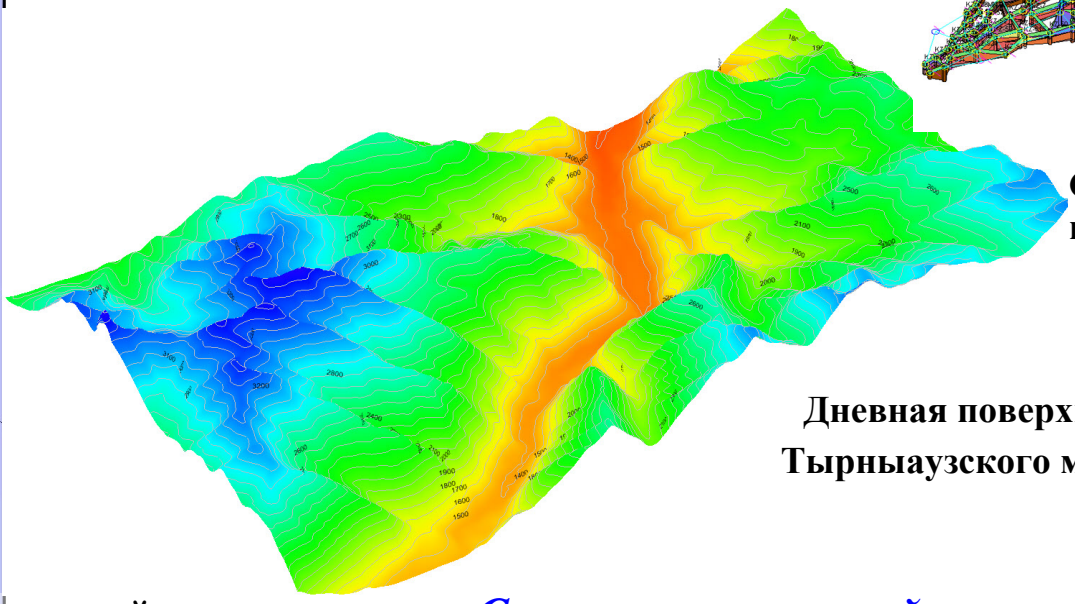
ходную геолого-гидрогеологическую информацию

и гидрогеологических моделей любой сложности.

Представление
по данным буровых с

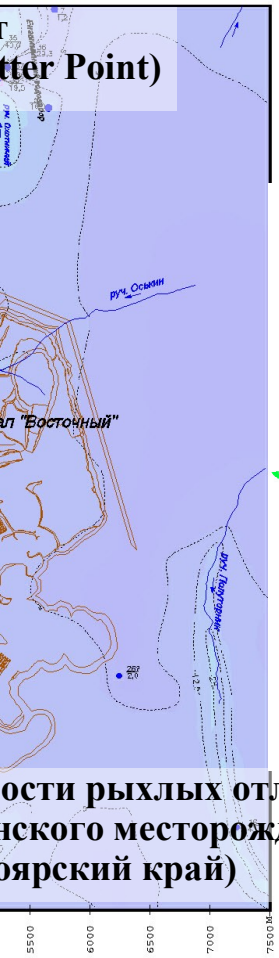


Построение любых поверхностей (модуль Tin)



Скважины и разр
геологической мо

Дневная поверхность района
Тырныаузского месторождения



ости рыхлых отложений
нского месторождения
ояpский край)

Состав комплексной программы GMS ве

расчетных прогр

(Modflow, Modpath, Femwater, SEEP2D, MT3

ровой практике гидрогеологических

решение широкого кла

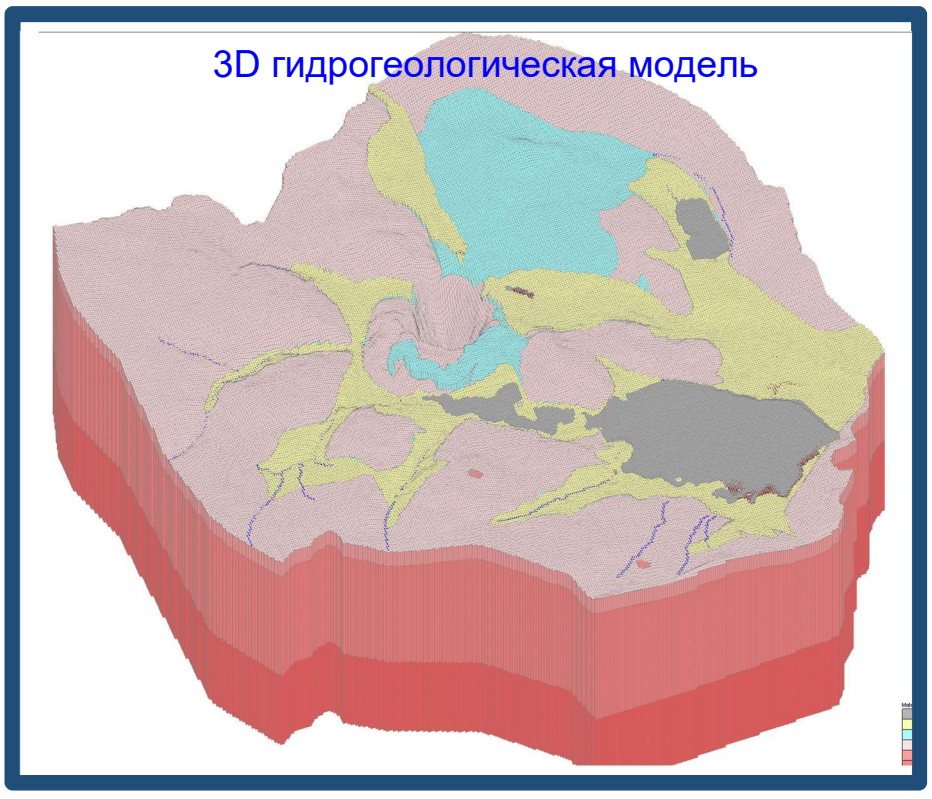
Фрагмент локальной геофил

амма Modflow -

ии фильтрации подземных вод в гетерогенной и

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

КАРЬЕР, ОТВАЛЫ И ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»



ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

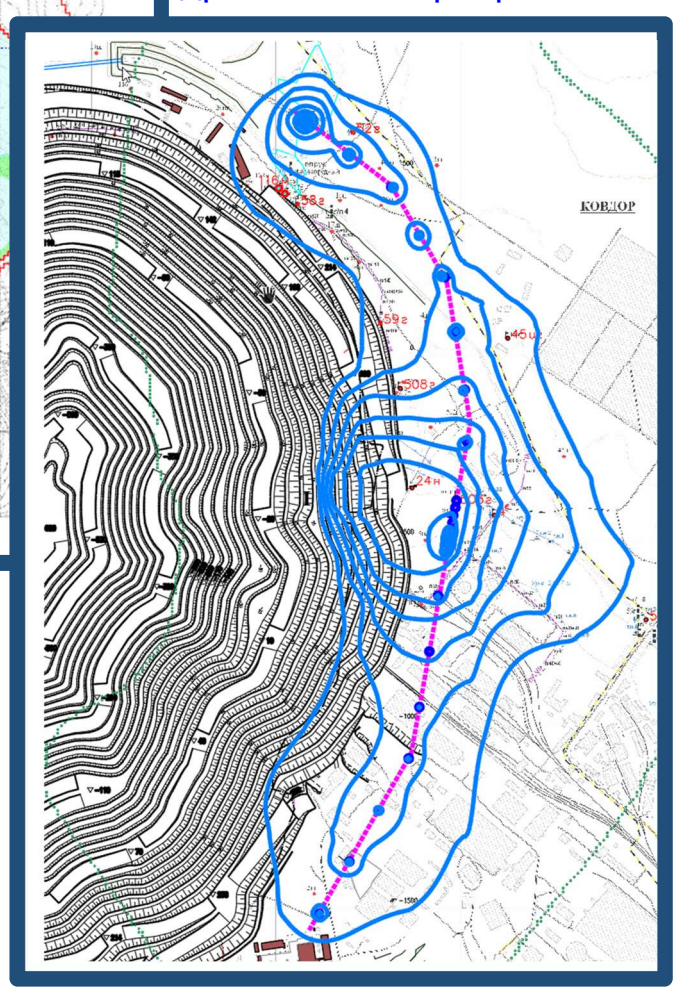
- Защита бортов карьера от подземных и поверхностных вод
- Прогноз положения уровней подземных вод в прибортовом массиве и на прилегающей территории при развитии горных работ
- Расчёт дополнительных дренажных мероприятий для предотвращения влияния гидростатических напоров на деформацию уступов бортов карьера
- Загрязнение подземных вод в зоне влияния объектов ГОКа
- Проектирование системы мониторинга подземных вод

МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

- Использование ГИС технологий
- Геофильтрационное и геомиграционное моделирование на базе комплексной программы GMS 10.3 (модели регионального и локального масштабов в программах MODFLOW-2005, MT3D, SEEP2D)

Загрязнение подземных вод верхнего водоносного горизонта

Снижение уровня подземных вод при реализации дренажных мероприятий



Уровни подземных вод в прибортовом массиве