

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»

Авторы: Ю.Б. Дворецкая  
Ж.Л.Цыкина

**Гидрогеология и инженерная геология**  
Учебное пособие по циклу лабораторных работ

Красноярск, 2008

УДК 551.49+624.131.1

Кратко изложены основные теоретические сведения, приведены методические указания, дан необходимый справочный материал по гидрогеологическим расчетам. Приведены основные сведения гидрогеологической стратификации, о водных свойствах горных пород и химическом составе подземных вод. Рассмотрены методы определения притоков воды в горные выработки и их применение на конкретных задачах.

Освещены современные методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород и основы прогноза инженерно-геологических явлений, возникающих в результате разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Все методы определения показателей состояния и свойств горных пород изложены в виде инструктивных указаний и сопровождаются описанием приборов и оборудования.

Для студентов специальности 130301 «Геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» очной формы обучения.

## Оглавление

	стр.
Введение .....	5
1. Общая гидрогеология .....	6
1.1. Гидрогеологические системы, их свойства .....	6
1.1.1. Понятие о гидрогеологических системах .....	6
1.1.2. Границы гидрогеологических систем .....	13
1.1.3. Основные элементы гидрогеологических систем .....	14
1.1.4. Исходные элементы гидрогеологической стратификации .....	19
1.2. Виды и законы движения подземных вод в горных породах .....	20
1.3. Построение и анализ карт пьезоизогипс .....	21
1.4. Пример выполнения задания .....	23
1.5. Химический состав подземных вод .....	25
1.5.1. Обработка химических анализов подземных вод .....	25
1.5.2. Определение минерализации воды и реакции по рН .....	26
1.5.3. Определение жесткости воды .....	27
1.5.4. Агрессивность воды .....	28
1.5.5. Выражение химического состава воды в виде формул ...	30
1.5.6. Оценка качества воды для питьевого и хозяйственного назначения .....	30
2. Динамика подземных вод .....	33
2.1. Определение притоков воды к водозаборным сооружениям .....	33
2.1.1. Движение гравитационных вод .....	33
2.1.2. Движение подземных вод к водозаборным и дренажным сооружениям .....	35
3. Методика гидрогеологических исследований .....	39
3.1. Определение водопритоков к горным выработкам .....	39
4. Инженерная петрология .....	44
4.1. Использование показателей физико-механических свойств для характеристики грунтов .....	44
4.1.1. Определение гранулометрического состава песчаных пород .....	59
4.1.2. Определение пористости рыхлых несвязных пород .....	60
4.1.3. Определение влажности горных пород .....	61
4.1.4. Определение пределов пластичности горных пород .....	62
4.1.5. Определение консистенции глинистых пород методом пенетрации .....	63

	стр.
4.1.6. Определение величины и влажности набухания глини- стых пород .....	65
4.1.7. Определение водопроницаемости пород в трубке СПЕЦГЕО .....	67
4.1.8. Компрессионные испытания пород нарушенного строе- ния .....	68
4.1.9. Определение сопротивления сдвигу песчаных пород .....	70
4.2. Расчет устойчивого профиля откоса .....	73
5. Инженерная геодинамика .....	77
5.1. Характеристика инженерно-геологических явлений в до- лине реки (на примере оползней) .....	77
Список литературы .....	85

## Введение

Курс «Гидрогеология и инженерная геология», читаемый студентам геологических специальностей, охватывает в общем обозрении почти все разделы гидрогеологии и инженерной геологии.

Для закрепления теоретических знаний и выработки навыков работы студентов с фактическим материалом предусмотрены лабораторные работы, охватывающие вопросы, с которыми инженер-геолог сталкивается на производстве. Лабораторные работы расположены в такой последовательности, в какой решаются вопросы при изучении гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых.

В основе изучения гидрогеологии лежит выделение гидрогеологических структур с пластовыми и трещинными водами, установление границ между ними, а также преобладающего типа вод. Студенты работают с фрагментами карт гидрогеологических съемок масштаба 1:200 000, 1:500 000, которые сопровождаются фактическим материалом, полученным в результате бурения и опробования гидрогеологических скважин, учатся определять гидрогеологическую обстановку и, оценивая параметры водоносных горизонтов и комплексов, рассчитывать естественные ресурсы. Кроме того, студенты приобретают навыки работы с химическим анализом подземных вод, знакомятся с формами его выражения, графическим изображением и оценивают пригодность воды для использования в различных целях.

Почти все месторождения полезных ископаемых в той или иной степени обводнены и разработка их требует предварительного или одновременного с эксплуатацией осушения. В процессе изучения курса «Гидрогеология и инженерная геология» студенты знакомятся с методами определения притоков воды в горные выработки и их применением на конкретных задачах.

Изучение условий строительства на горных предприятиях является задачей инженерной геологии. При этом решаются вопросы не только изучения физико-механических свойств пород, но и прогноза инженерно-геологических явлений, возникающих в результате инженерной деятельности человека. Особое значение приобретает прогноз геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых. Большая часть проблем, связанных с оценкой и прогнозом устойчивости горных сооружений, решается в период их строительства и эксплуатации, поэтому исследования проводятся целенаправленно. Горному инженеру-геологу необходимы знания об определяющей роли геологических условий месторождений как среды горных работ и горных сооружений, то есть об инженерно-геологических (горно-геологических) условиях месторождений полезных ископаемых.

В связи с этим на лабораторных занятиях студенты-геологи знакомятся с инженерно-геологическим оборудованием, учатся определять на нем показатели физико-механических свойств пород и использовать их для оценки устойчивости пород.

## Раздел 1. Общая гидрогеология

### 1.1. Гидрогеологические системы, их свойства

#### 1.1.1. Понятие о гидрогеологических системах

В земной коре существуют разнообразные по происхождению и условиям залегания толщи пород, в разной степени насыщенные подземными водами и по-разному взаимодействующие с ними. Выделяются пласты хорошо проницаемых пород, с которыми могут быть связаны водоносные горизонты и комплексы, и слабопроницаемые породы, играющие роль водоупоров (рис. 1).

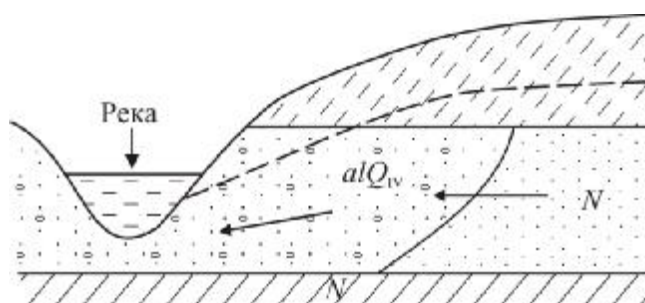


Рис. 1. Модель водоносного горизонта:

современные аллювиальные отложения: 1 – суглинки, 2 – песчано-галечниковые отложения; неогеновые отложения: 3 – водоупорные глины, 4 – водоносные пески; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – направление движения грунтовых вод

Совокупность водоносных горизонтов и комплексов с преобладающим типом пластовых вод образуют гидрогеологический бассейн, а в разной степени обводненные зоны трещиноватых изверженных и метаморфических пород – гидрогеологический массив.

*Гидрогеологическая система (ГГС)* – это совокупность геологических тел, в которых подземные воды связаны между собой и движутся по единым законам. Гидрогеологический бассейн и массив представляют собой самостоятельные гидрогеологические системы с характерными для них условиями формирования и распространения подземных вод. Таким образом, водоносная система является обособленным и содержащим воду геологическим телом; характеризуется общностью пространственного распределения, перемещения и формирования подземных вод. ГГС объединяет области питания, накопления и разгрузки подземных вод.

По геолого-структурному принципу и преобладающему в них типу подземных вод выделяются ГГС с преобладанием поровых коллекторов – артезианские бассейны и с преобладанием трещинных коллекторов – гидрогеологи-

ческие массивы. Формирование и распределение воды в выделенных системах обусловлено этажностью строения верхней части земной коры [17].

В разрезе **артезианского бассейна** выделяются осадочный чехол и фундамент. *Осадочный чехол* представлен чередованием водопроницаемых и водоупорных пород. Для него характерно развитие поровых и трещинных коллекторов, в которых формируются порово-пластовые и трещинно-пластовые преимущественно напорные воды, образующие водоносные горизонты и комплексы.

*Фундамент* артезианских бассейнов сложен преимущественно магматическими и метаморфическими комплексами пород, сильно дислоцированными и нередко нарушенными разломной тектоникой. В породах фундамента преобладают пластово-трещинные и трещинно-жильные воды.

**Гидрогеологические массивы** представляют собой горные поднятия или выходы на поверхность земли пород фундамента.

В платформенных регионах типично преобладание артезианских бассейнов и подчиненных им гидрогеологических массивов. Складчатым областям свойственно широкое развитие гидрогеологических массивов и ограниченное – небольших артезианских бассейнов.

Артезианские бассейны отвечают отрицательным тектоническим формам – мульдам, впадинам, синклиналиям с прилегающими склонами. Они содержат водоносные пласты. Для верхних горизонтов характерны грунтовые порово-пластовые воды, в зонах разломов, интрузивных телах и неглубоком фундаменте встречаются напорные жильно-трещинные воды, но преобладают напорные пластовые воды. По ведущим водно-коллекторским свойствам пород артезианский бассейн представляет резервуар *пластовых вод*.

Гидрогеологические массивы относятся к положительным тектоническим формам. Это поднятия складчатых сооружений. Водопроницаемость пород определяется трещиноватостью и разрывными нарушениями. Преимущественным развитием пользуются грунтовые трещинные и напорные трещинно-жильные воды. Следовательно, по характеру распределения подземных вод гидрогеологический массив представляет резервуар *трещинных и жильно-трещинных вод*.

Питание, сток и разгрузка в каждом из них имеют свои особенности. Для артезианских бассейнов в целом характерна центростремительная направленность подземного стока. Обычно из областей питания напор передается на громадные расстояния и значительную глубину. Артезианские бассейны – аккумуляторы подземных вод. Дренаж, за исключением самых верхних горизонтов, затруднен и осуществляется локально по гидрогеологическим «окнам» (тектонически ослабленным зонам, разрывным нарушениям и т.д.). В недрах артезианских бассейнов сосредоточены главным образом статические (геологические) запасы подземных вод, которым подчинены динамические (естественные) ресурсы.

Подземный сток гидрогеологических массивов ориентирован от центра к периферии. Питание происходит практически по всей площади. Вследствие сильной расчлененности рельефа массивы глубоко дренированы. Область разгрузки располагается по периферии массива. Хорошая дренируемость обеспечивает преобладание естественных ресурсов над геологическими запасами.

Подземные воды артезианских бассейнов и прилегающих гидрогеологических массивов гидравлически тесно взаимосвязаны. Массивы по отношению к бассейнам играют роль внешней области питания. Подземные воды массива переливаются в бассейн и аккумулируются там.

В табл. 1 приведена систематизация основных факторов, при анализе которых выделяются гидрогеологические системы по условиям залегания, а в табл. 2 приведены основные виды гидрогеологических систем с грунтовыми и напорными водами.

Одной из основных закономерностей пространственного распределения подземных вод является зональность.

В широком смысле зональными будут все природные воды с разделением их на атмосферные, поверхностные и подземные. Зональность подземных вод проявляется в обособлении естественно – исторических зон в зависимости от широты местности или вертикального положения подземных вод. Поэтому различают: 1) широтную зональность, отмечаемую главным образом в верхних горизонтах, 2) вертикальную зональность, которая свойственна всему геологическому разрезу. Вертикальная зональность может быть глубинной (бассейны пластовых вод) или высотной (массивы трещинных вод). В случае последней удобнее говорить о высотных поясах подземных вод.

**Широтная зональность** присуща главным образом грунтовым водам. Грунтовые, как и неглубокие напорные подземные воды находятся в тесной взаимосвязи с атмосферными и поверхностными водами. Влияние географической широты на жизнь грунтовых вод сказывается особо сильно, поэтому им свойственны черты широтной зональности: зоны грунтовых вод отвечают определенным ландшафтам и сменяют друг друга с севера на юг.

В образовании широтной зональности грунтовых вод основная роль принадлежит климату. С учетом агрегатного состояния воды, степени увлажнения территории и температурных изменений в северном полушарии по мере движения на юг последовательно сменяются следующие макрзоны грунтовых вод:

1) Ледовая (мерзлая), в пределах которой грунтовые воды полностью или частично заморожены и в жидкой фазе существуют только в течение короткого лета; питание их затруднено, а среднегодовая температура имеет отрицательные значения.

2) Гумидная (влажная) – характеризуется, как правило, избыточным увлажнением из-за преобладания осадков над испарением, что приводит к ин-



Таблица 1

## Факторы, определяющие выделение гидрогеологических систем по условиям залегания

Зона	Виды подземных вод	Признак				
		гидрогеологический	структурный	морфологический	литолого-генетический	гидротермогенетический
Аэрации	Инфильтрационная, физически связанная	Локальные зоны, потоки	-	-	-	Влагоперенос
Насыщения	Грунтовая (гравитационная)	Бассейны, потоки	Платформы, геосинклинали Впадины, прогибы, щиты, синклинали, антиклинали, антиклинали, разрывные структуры и др.	Речные долины, междуречья, конусы выноса, предгорные равнины, мелкосопочник, озы, камы	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы Недислоцированные породы, дислоцированные Терригенные, карбонатные Аллювий, пролювий, делювий	Фильтрация Миграция а) конвекция б) гидродисперсия в) диффузия г) сорбция д) растворение и др.
	Напорная (гравитационная)	Бассейны, склоны, потоки	Платформы, геосинклинали Впадины, прогибы, щиты, синклинали, антиклинали, антиклинали, разрывные структуры и др.	Виды складчатых структур Виды разрывных нарушений	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы Недислоцированные породы, дислоцированные Терригенные, карбонатные Аллювий, пролювий, делювий	Фильтрация Миграция а) конвекция б) гидродисперсия в) диффузия г) сорбция д) растворение и др.
	Глубинная (физически, химически связанная, свободная)	Потоки	Крупные разломы, линеаменты и др.	-	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы	Миграция

Таблица 2

## Систематизация гидрогеологических систем по условиям залегания

Зоны	Виды подземных вод	Виды гидрогеологических систем по условиям залегания				
Неполного насыщения	Инфильтрационная, капиллярная и гравитационная	Инфильтрующая вода (локальные потоки) Зона с капиллярно-подвешенной водой Верховодка (локальный бассейн)				
Полного насыщения	Грунтовые (гравитационные)	А. Грунтовые потоки и бассейны вне криолитозоны и молодой вулканической деятельности			Б. Грунтовые бассейны и потоки криолитозоны	В. Грунтовые бассейны и потоки зон молодой вулканической деятельности
		I. Потоки речных долин: 1) потоки в аллювии равнинных рек; 2) подрусло-вые потоки; 3) потоки в погребенных долинах	II. Бассейны и потоки междуречных пространств: 1) в осадочных отложениях, недислоцированные; 2) то же, дислоцированных; 3) в изверженных и метаморфических породах; 4) то же, с зонами разломов; 5) в вулканических лавах	III. Потоки конусов выноса, предгорных равнин: 1) поток грунтовых вод в головной части конуса выноса; 2) поток грунтово-напорных вод слоистых толщ	IV. Бассейны синклинальных структур: 1) горных сооружений; 2) мелкосопочника	V. Бассейны и потоки с линзами пресных вод: 1) подпесчаными; 2) подтакрытыми; 3) прикальными, приречными

Зоны	Виды подземных вод	Виды гидрогеологических систем по условиям залегания						
Полного насыщения	Напорные (гравитационные)	<p>I. Артезианские бассейны:</p> <p>1) платформ;</p> <p>2) межгорных впадин, краевых прогибов;</p> <p>3) наложенные бассейны;</p> <p>4) бассейны горных сооружений в осадочных отложениях, лагунах, вулканогенах</p>	<p>II. Артезианские склоны:</p> <p>1) моноклиналей;</p> <p>2) асимметричных структур;</p> <p>3) выклинивания</p>	<p>III. Субартезианские бассейны:</p> <p>1) в осадочных отложениях на щитах;</p> <p>2) в осадочных отложениях на платформах;</p> <p>3) в дислоцированных породах горных сооружений</p>	<p>IV. Бассейны между речных пространств с межпластовыми напорными водами:</p> <p>1) в четвертичных ледниковых отложениях;</p> <p>2) в горизонтально залегающих четвертичных и более древнего возраста осадочных отложениях</p>	<p>V. Потоки напорных вод крупных разломов:</p> <p>1) вне криолитозоны и молодой вулканической деятельности;</p> <p>2) в криолитозоне;</p> <p>3) в зоне молодой вулканической деятельности</p>		

тенсивному вымыванию солей из пород и благоприятствует пополнению ресурсов грунтовых вод; среднегодовая температура положительная.

3) Аридная (сухая), для которой величина испарения превышает количество осадков, вследствие чего происходит засоление грунтовых вод (вплоть до выпадения солей в осадок) и замедляется возобновление их ресурсов; температура подземных вод достигает более 20°C.

Зональным закономерностям подчиняются также изменения ионно-солевого состава грунтовых вод. В пределах Европейской части России с севера на юг сменяются ультрапресные гидрокарбонатные воды (с кремниевой кислотой) через пресные гидрокарбонатные на соленые сульфатные и хлоридные воды.

В вертикальном разрезе бассейнов пластовых вод хорошо прослеживается изменение сверху вниз скорости движения, степени минерализации, ионно-солевого состава, температуры подземных вод.

**Гидродинамическая зональность** заключается в последовательной смене по вертикали зон с различным темпом водообмена. В артезианских бассейнах выделяют три зоны: верхнюю, среднюю и нижнюю [17].

Верхняя зона, находящаяся в сфере дренажа местной гидрографической сети и воздействия современных климатических факторов, является *зоной интенсивного (активного) водообмена*. Благодаря повышенной трещиноватости пород, подземные воды перемещаются со значительной скоростью. Здесь протекают процессы окислительного выветривания с вымыванием солей из пород.

Средняя зона представляет *зону медленного (затрудненного) водообмена*. В ней значение дренажа уменьшается, и проявляются только вековые климатические циклы. Вследствие затухающей трещиноватости пород скорость движения подземных вод подавлена.

Нижняя зона охватывает наиболее глубокие части разреза бассейнов пластовых вод, в пределах которых дренаж сказывается весьма слабо, и почти не отражается влияние климатических факторов. Возобновление ресурсов подземных вод происходит в масштабе геологического времени. Эта зона называется *зоной весьма затрудненного водообмена* и отличается проявлением восстановительных процессов.

**Гидрогеохимическая зональность.** В бассейнах пластовых вод сверху вниз наряду с интенсивностью водообмена изменяются также степень минерализации и ионно-солевой состав подземных вод. Глубинная гидрогеохимическая зональность выступает более рельефно, чем характер изменения интенсивности водообмена.

Выделено три основные зоны:

1) Зона пресных вод с минерализацией до 1 г/л. мощность пресных вод изменяется от 0–10 до 300–600 м, а в некоторых районах может достигать 1000–2000 м и более. Мощная зона пресных вод встречается в краевых частях

артезианских бассейнов, куда легко проникают воды из прилегающих горных сооружений.

2) Зона соленых вод с минерализацией от 1 до 35 г/л. Мощность зоны от десятков метров до 1000–2000 м. Особо велика она в бассейнах пластовых вод Предкавказья и Западно-Сибирской платформы, выполненных мощной толщей морских отложений нормальной солености.

3) Зона рассолов с минерализацией более 35 г/л. Мощность зоны изменяется в широких пределах. В бассейнах пластовых вод с пресноводными фациями она вовсе отсутствует (Прибайкалье, Дальний Восток и т.д.). Наибольшие мощности (1500–2000 м и более) наблюдаются в артезианских бассейнах Сибирской и Русской платформ, в геологическом разрезе которых существенную роль играют галогенные формации.

Массивам трещинных вод свойственна раскрытая гидрогеологическая структура. Подземные воды находятся в верхней трещиноватой зоне, мощность которой составляет 60–80 м, иногда до 200 м. Ниже, за исключением тектонических разломов, кристаллические породы практически безводны. По существу в гидрогеологических массивах происходит только свободный водообмен с поверхностью.

В массивах трещинных вод в зависимости от отметок рельефа различаются три гидродинамических и гидрогеохимических пояса.

*Высотная гидродинамическая поясность* заключается в изменении пористости и характера движения подземных вод по мере снижения абсолютных отметок. В высокогорном поясе из-за большой крутизны склонов и хороших фильтрационных свойств горных пород скорость движения изменяется сотнями метров в сутки. На отметках от 1500 до 800 м скорость заметно снижается. В низкогорной зоне фильтрационные свойства еще более ухудшаются вследствие кольматации трещин глинистыми продуктами выветривания.

*Высотная гидрогеохимическая зональность* проявляется в увеличении степени минерализации и изменении ионно-солевого состава подземных вод от гребней водоразделов к подошвам склонов.

*Высотная гидрогеотермическая зональность* определяется климатическими условиями. В направлении от высокогорной зоны к низкогорной возрастает температура подземных вод.

### **1.1.2. Границы гидрогеологических систем**

Выделяемые гидрогеологические системы имеют границы: геологические, геоморфологические, литофациальные или тектонические. Границы могут быть представлены контурами урезов рек, озер; контурами, по которым водоносные породы отделяются от водоупорных; контурами, по которым водоносные породы отделяются от водоненасыщенных уровнем грунтовых вод; контурами инженерных объектов, по которым они граничат с водоносными или водоупорными породами.

Нижней границей ГГС являются водоупорные породы, подстилающие водоносные. Внешняя граница зависит от того, какие воды (грунтовые или напорные) содержит система.

Грунтовыми называются воды, приуроченные к первому от поверхности земли регионально выдержанному водоносному пласту, имеют свободную поверхность, на которой давление равно атмосферному и характеризуются активной связью с гидросферой и атмосферой (рис. 2а) [2].

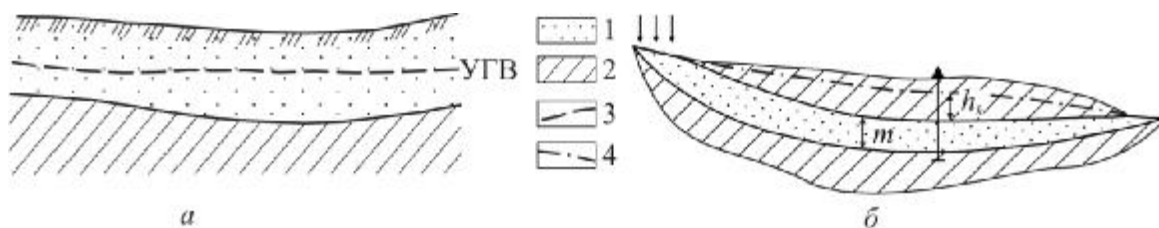


Рис. 2. Схемы водоносных горизонтов грунтовых (а) и напорных (б) вод: 1 – водоносный пласт; 2 – водоупор; 3 – уровень грунтовых вод; 4 - пьезометрический уровень

Напорными называются воды, приуроченные к водоносному пласту, залегающему между двумя регионально выдержанными водоупорами, движутся под давлением и при вскрытии поднимаются до условной поверхности, называемой пьезометрической (рис. 2б).

Для грунтовых вод верхней границей может быть уровень водоносного пласта, если рассматривать только водонасыщенную часть пласта. Если в ГГС включить зону аэрации, то верхней границей будет являться земная поверхность.

Для напорных вод верхней границей является водоупорная кровля пласта. В случае гидравлической связи с вышележащими водоносными горизонтами внешняя граница зависит от того, какие воды (грунтовые или напорные) содержат верхний водоносный горизонт.

### 1.1.3. Основные элементы гидрогеологических систем

Оценка условий формирования подземных вод в ГГС базируется на характеристике слагающих ее элементов, основными из которых являются [3]:

1. внешние границы и область распространения;
2. область питания и создания напора;
3. область разгрузки (стока);
4. пьезометрическая поверхность.

Рассмотрим характеристику ГГС с трещинно-пластовыми водами на примере Салбатской мульды Минусинского межгорного прогиба (рис. 3). Область распространения конкретной ГГС – геологическая среда, которую она

занимает в пределах принятых границ. Описываемая ГГС выделяется на площади распространения средне-верхнедевонских и нижнекаменноугольных терригенно-карбонатных пологозалегающих отложений.

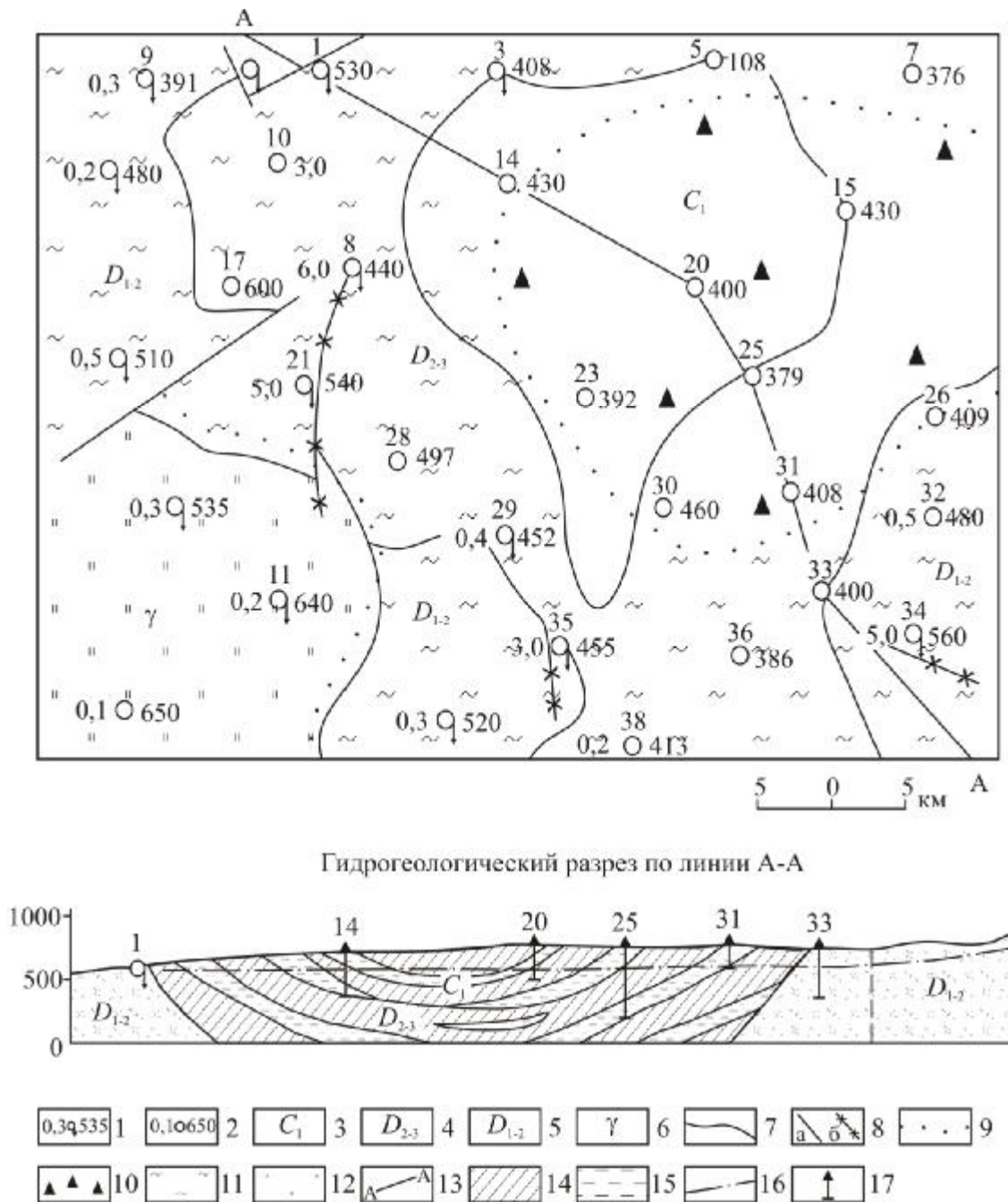


Рис. 3. Гидрогеологическая карта:

водопункты: 1 – родник нисходящий, цифра справа – абсолютная отметка выхода подземных вод, слева – дебит, л/с; 2 – скважина, цифры: справа – абсолютная отметка установленного уровня, слева – водопроницаемость пласта, м<sup>2</sup>/сут. Водоносные комплексы трещинно-пластовых вод: 3 – нижнекаменноугольных отложений, 4 – отложения верхнего и среднего девона; водовмещающие породы: песчаники, алевролиты, конгломераты, извест-

няки. Водоносные зоны трещинных вод: 5 – ниже-среднедевонских отложений, водоносные породы: диабазы, порфириты, туфы, песчаники; 6 – интрузивных пород: гранитов, гранодиоритов, граносиенитов. Границы: 7 – геологические; 8 – тектонические: а – установленные, б – обводненные; 9 – воды различной минерализации: 10 – от 0,5 до 1,0 г/л; 11 – от 0,3 до 0,5 г/л; 12 – от 0,1 до 0,3 г/л; 13 – линия разреза. На разрезе: 14 – водоупорные пласты; 15 – водопроницаемые породы; 16 – пьезометрический уровень, 17 – скважина, вскрывающая напорные воды

ГГС Салбатской мульды ограничена снизу геологическим контуром между нижним и средним девоном быскарской серии (Д<sub>1-2</sub>) и средним и верхним девоном. Внешние боковые границы проходят также по контакту с быскарской серией, местами по контакту с интрузией. Внешняя верхняя граница очень сложная, так как напорные воды вскрываются на различных глубинах: от 10 до 120 м (табл. 3). Однако, учитывая гидравлическую связь между водоносными горизонтами ГГС, за верхнюю границу можно принять уровень грунтовых вод.

Таблица 3

Характеристика водоносных комплексов

№ водо-до-пунк-та	Абсолютная отметка, м	Описание водовмещающих пород	Мощность, м	Появление воды, м	Установившийся уровень, м	Водопроницаемость Т, м <sup>2</sup> /сут
<b>Водоносный комплекс отложений нижнего карбона</b>						
5	422,6	Песчаники	18	14,6	14,6	90
14	490	Песчаники, известняки	30	95	60	90
20	514,7	Песчаники	16	136	114,7	96
15	448	Песчаники, алевролиты	21	18	18	20
<b>Водоносный комплекс отложений среднего-верхнего девона</b>						
10	400	Песчаники	18,5	35,5	29	25
28	509,8	Песчаники, алевролиты	85,2	12,8	12,8	640
30	475	Алевролиты	33	15	15	20
33	421	Порфириты, конгломераты	58	21	21	29
26	459,5	Песчаники	4,5	71	50,5	10
7	390	Песчаники	59	31	12	60
17	632	Песчаники	74	32	32	30

Область питания и создания напора – это площадь наивысшего гипсометрического положения выходов водосодержащих пород на земную поверхность (или под хорошо проницаемые породы другого состава и возраста), где в систему поступает питание, и наблюдаются максимальные отметки пьезометрических уровней. Питание может осуществляться за счет инфильтрации атмосферных осадков, фильтрации речных вод в паводок, поступления воды из соседних ГГС и т.п. (рис. 4). В данном примере ГГС Салбатской мульды



питается за счет поступления воды с площади гидрогеологического массива, т.е. соседней ГГС, где развиты трещинные и трещинно-жильные воды в эффузивных образованиях быскарской серии и интрузивном комплексе пород.

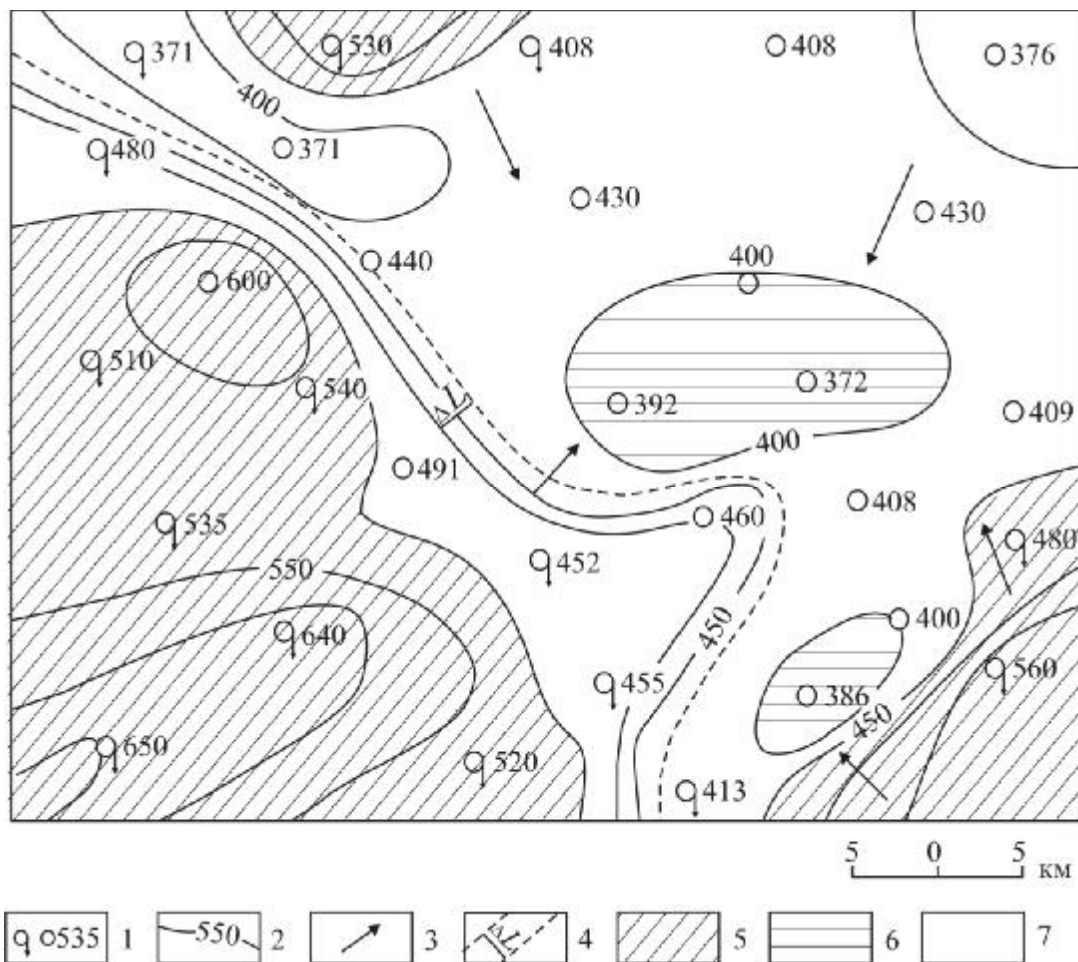


Рис. 4. Гидродинамическая карта:

1 – водопункты с абсолютной отметкой уровня воды; 2 – гидроизопезы; 3 – направление движения подземных вод; 4 – расчетная полоса; 5 – область питания подземных вод; 6 – область разгрузки; 7 – область распространения напора

Область разгрузки – это площадь с низшим гипсометрическим положением выходов водосодержащих пород на земную поверхность, где наблюдаются выходы воды из системы и создаются минимальные отметки пьезометрических уровней. Разгрузка может осуществляться в виде родников, подземного стока в реки, перетекания через слабопроницаемые породы в подошве или кровле водоносных пластов путем вертикальной фильтрации и т.п. (рис. 5).

По местоположению области питания и разгрузки в пределах ГГС делятся на внешние и внутренние. Внешние области располагаются на периферии ГГС и являются одновременно элементами соседних с ней систем. Чаше

всего это основные области питания. Внутренние области находятся внутри данной системы и являются локальными областями питания и разгрузки.

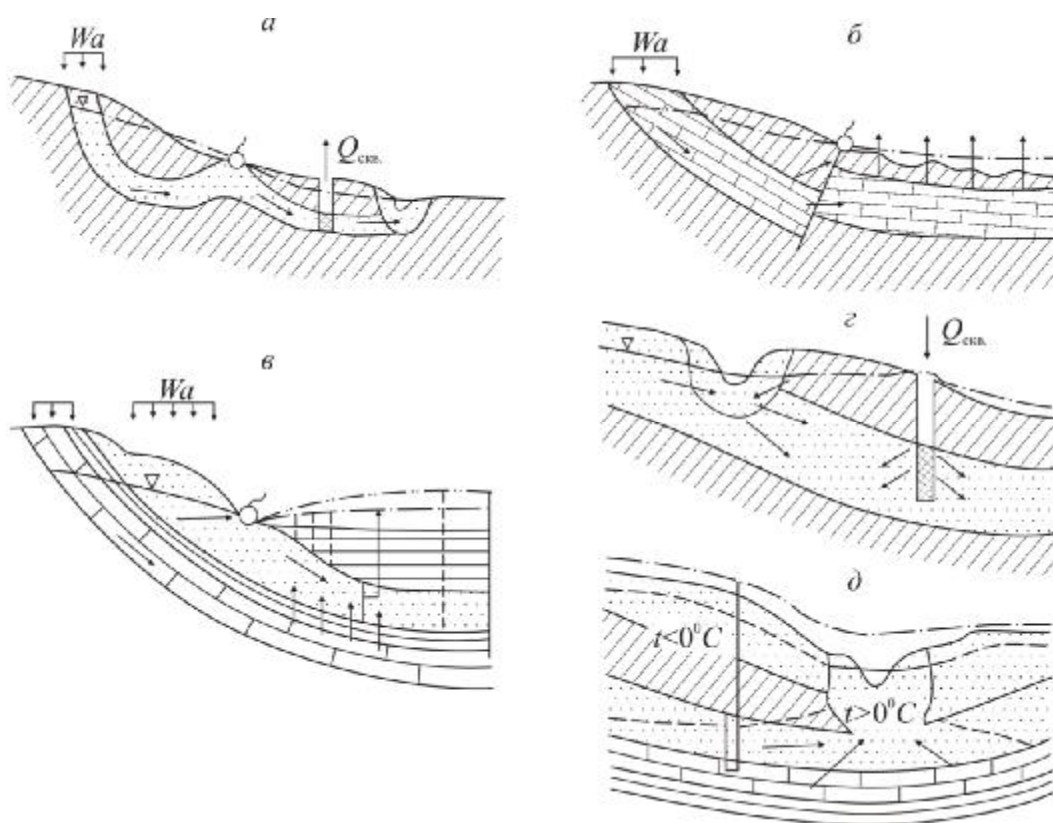


Рис. 5. Виды областей питания и разгрузки для ГГС с напорными водами [3]: открытые области питания: *а, б* – инфильтрация атмосферных осадков; *в* – то же, и поглощение поверхностного стока. Закрытые области питания: *г* – поглощение речного стока и нагнетание в скважину. Открытые области разгрузки: *а* – сосредоточенный восходящий эрозионный источник и откачка из скважины; *б* – барьерный источник в зоне разлома; *в* – линейная система (в плане) контактовых источников. Закрытые области разгрузки: *а* – подземный сток в речную долину; *б, в* – вертикальная фильтрация через кровлю пласта с испаряющей поверхности в аридном климате, а также рассеянное глубинное перетекание через разделяющий слой; *г* – частичный сток в речную долину (краевая зона разгрузки); *д* – подземный сток в речную долину через сквозной талик

Пьезометрическая поверхность характеризует распределение гидро- и геостатических напоров или давлений в пределах всей ГГС. Ее примерное положение определяется из соотношений отметок пьезометрических уровней и области питания и разгрузки ГГС.

Пьезометрическая поверхность в плане изображается в виде системы изолиний, соединяющих точки с одинаковыми отметками пьезометрических уровней. Для грунтовых вод такие линии носят название гидроизогипс, для напорных – пьезоизогипс (гидроизопьез) [2].

Для выделения областей питания и разгрузки в плане необходимо иметь: 1) гидрогеологическую карту, на которой показана вся площадь пространства ГГС и водопункты с указанием высотных отметок пьезометрического уровня; 2) карту пьезометрической поверхности ГГС в виде гидроизогипс для грунтовых вод и пьезоизогипс – для напорных; 3) карты глубин залегания от земной поверхности уровня грунтовых вод и кровли водоносных пород для ГГС с напорными водами; 4) гидрогеологические разрезы.

#### **1.1.4. Исходные элементы гидрогеологической стратификации**

Условия формирования подземных вод в ГГС в целом определяются гидрогеологическими условиями слагающих ее элементов. В зависимости от уровня ГГС элементы могут быть представлены для осадочных пород слоями, горизонтами, комплексами, простыми и сложными гидрогеологическими бассейнами; для изверженных и метаморфических пород – как локальными, так и региональными зонами, разломами, простыми и сложными гидрогеологическими массивами. Предложенные в вариантах задания ГГС представляют собой простые гидрогеологические массивы и бассейны, элементами которых являются соответственно зоны, разломы, водоносные горизонты и комплексы. Понятие «водоносная зона» относится к изверженным и метаморфическим породам с преимущественным развитием трещин выветривания, заполненных гравитационной водой. Разломы связаны с тектонической трещиноватостью, в них формируются трещинные воды.

Водоносный горизонт – это один или несколько водоносных слоев, гидравлически связанных между собой, характеризующихся общими условиями формирования и распространения подземных вод.

Водоносный комплекс – это несколько гидравлически связанных водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми слоями, имеющие близкие пьезометрические поверхности и характеризующиеся общностью формирования, движения, ресурсов и качества подземных вод.

Совокупность водоносных горизонтов, комплексов, а также водоупорных горизонтов образуют гидрогеологический бассейн, для которого характерна общность геологического развития и формирования гидрогеодинамических, гидрогеохимических и гидрогеотермических процессов [17].

Трещиноватые изверженные и метаморфические породы образуют массивы, блоки, тела внедрения изверженных пород. Подземные воды связаны с различными по происхождению видами трещин: 1) выветривания, охватывающими зону мощностью в основном до 100 м; 2) литогенетическими, связанными с процессом внедрения магматических пород и их остыванием; 3) тектоническими в виде различных разломов. Геологические тела с развитыми в них трещинными водами образуют гидрогеологический массив. Таким образом, гидрогеологический бассейн и массив являются исходными элементами гидрогеологической системы.

## 1.2. Виды и законы движения подземных вод в горных породах

В гидрогеологических системах основными видами движения подземных вод являются инфильтрация и фильтрация, к гидродинамическим характеристикам которых относятся расход потока подземных вод ( $Q$ ), скорость фильтрации ( $V$ ), гидростатический напор ( $H$ ), градиент напора ( $i$ ), коэффициент фильтрации ( $K$ ).

Геометрические характеристики потока подземных вод – площадь поперечного сечения ( $F$ ), мощность ( $m$ ), ширина потока в плане ( $B$ ).

Инфильтрация происходит в зоне аэрации, фильтрация – в зоне насыщения и характеризует перемещение гравитационных вод. Фильтрация описывается в общем виде законом Дарси, устанавливающим линейную зависимость между расходом потока и градиентом напора [20]:

$$Q = VF = KiF = KF \frac{\Delta H}{l} \quad (1)$$

Согласно уравнению (1), расход потока зависит от свойств среды, через которую идет фильтрация, пропорционален площади поперечного сечения потока и градиенту напора по направлению движения подземных вод.

Градиент напора определяется по формуле

$$i = \frac{H_2 - H_1}{l}, \quad (2)$$

где  $\Delta H$  – превышение между ближайшими гидроизогипсами (пъезоизогипсами);  $l$  – длина пути фильтрации, т.е. расстояние между гидроизогипсами.

Площадь поперечного сечения рассчитывается по формуле:

$$F = mB,$$

где  $m$  – мощность водоносного горизонта, м;  $B$  – ширина потока, м.

Скорость фильтрации выражается формулой:

$$V = \frac{Q}{F} \quad (3)$$

Если подставить в формулу (3) значение расхода потока по уравнению Дарси, то получим закон Дарси:

$$V = Ki.$$

Уравнение Дарси можно применять для определения естественного расхода потока, если считать фильтрацию на рассматриваемый момент времени установившейся:

$$Q = KiF = KmBi = T_{cp}B_{cp}i_{cp}. \quad (4)$$

где  $T_{cp}$  – водопроницаемость пласта, характеризующая свойство пород при условии их полного насыщения пропускать через себя некоторое количество свободной воды, м<sup>2</sup>/сут.

Расчетный участок выбирается в месте наилучшей изученности потока подземных вод и выделяется на карте путем проведения к этим изогипсам перпендикулярных линий тока (рис. 6).

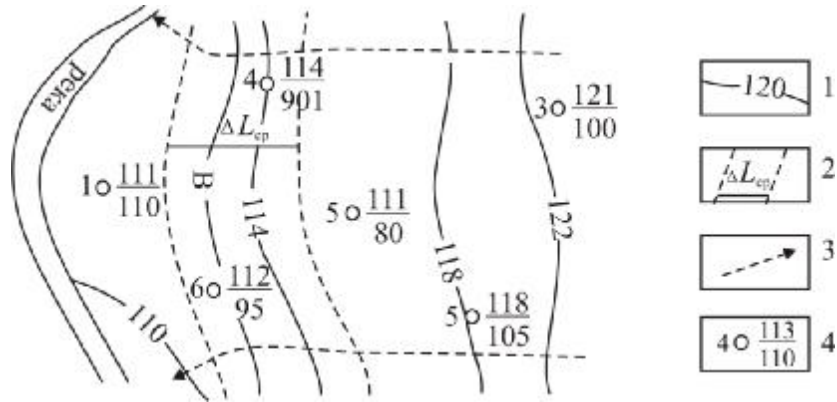


Рис. 6. Схема к определению естественного расхода водоносного горизонта по уравнению Дарси:

1 – гидроизогипса с отметкой уровня воды; 2 – расчетная полоса; 3 – граничные линии тока, показывающие направление движения воды; 4 – скважина (слева – номер, справа: в числителе – отметка уровня воды, м; в знаменателе – величина водопроницаемости пласта, м<sup>2</sup>/сут.

Средняя ширина потока ( $B_{cp}$ ) определяется по карте гидро- или пьезоизогипс как длина средней гидроизогипсы, расположенной перпендикулярно к направлению рассматриваемого потока подземных вод.

### 1.3. Построение и анализ карт пьезоизогипс

Для определения естественного расхода по уравнению Дарси необходимо иметь: 1) карту гидро- или пьезоизогипс со схемой расположения опробованных скважин; 2) данные по скважинам о показателях  $K$ ,  $m$  или  $T$ .

На предлагаемых студентам вариантах заданий изображены преимущественно напорные водоносные горизонты, особенности залегания, условия формирования, движения и разгрузки которых отображаются в форме пьезометрической поверхности. Пьезометрическая поверхность, отображенная в плане, характеризует гидродинамический режим ГГС. Изопьезами называют линии, соединяющие точки с одинаковыми отметками пьезометрических уровней. Совокупность таких линий образует карту изопьез (см. рис. 4).

Изопьезы являются линиями напоров, а линии, проведенные перпендикулярно к ним, показывают направление движения потока.

Исходными данными для построения карт изопьез служат отметки пьезометрического уровня родников, скважин и колодцев. В областях питания и разгрузки, где напорные воды переходят в грунтовые, используют отметки урезов рек, озер, болот, находящихся в гидравлической связи с водоносными горизонтами и комплексами. При построении карт изопьез можно использовать разновременные замеры уровней и проводить интерполяцию отметок в точках, расположенных на разных склонах речных долин, оврагов и п.т. Построение карты выполняется в следующей последовательности [3]:

1. Проводится общий геолого-структурный, геоморфологический, литолого-фациальный и гидрогеологический анализ с целью выявления ведущего фактора в формировании подземных вод.

2. Проводится отбраковка фактического материала для исключения недостоверной информации.

3. Путем анализа фактического материала устанавливают главные направления, по которым наблюдается максимальное изменение градиента потока. По этим направлениям строят гидрогеологические разрезы.

4. Сечение изопьез должно отвечать масштабу карты. Для среднемасштабных карт сечение изолиний составляет 2-5 – 10 м; для мелкомасштабных – 20-50 – 100 м.

При ручной интерполяции применяют метод треугольников. Точки замеров уровня соединяют линиями, образующими треугольники так, чтобы длинная его сторона была перпендикулярна к направлению падения потока (рис. 7а). При интерполяции пользуются масштабной сеткой (палеткой), вычерченной на кальке (рис. 7б). Она состоит из пронумерованных параллельных линий, заложенных на расстоянии 2–5 мм одна от другой. С ее помощью проводят пропорциональное деление отрезков, соединяющих точки, между которыми проводится интерполяция. Затем соединяют точки с одинаковыми отметками, получая изопьезы.

5. Разрабатывают условные обозначения, к главным из которых относят: пьезоизогипсы, направление движения воды, участки свободного самоизлива, области питания и создания напора, виды разгрузки. Остальные - второстепенные. Размещают условные обозначения в порядке убывания значимости.

Карта пьезоизогипс является основной характеристикой гидродинамической системы. Анализ и чтение карты выполняют в следующей последовательности:

- 1) Выявляют распространение напорных вод по площади и общий характер пьезометрической поверхности.

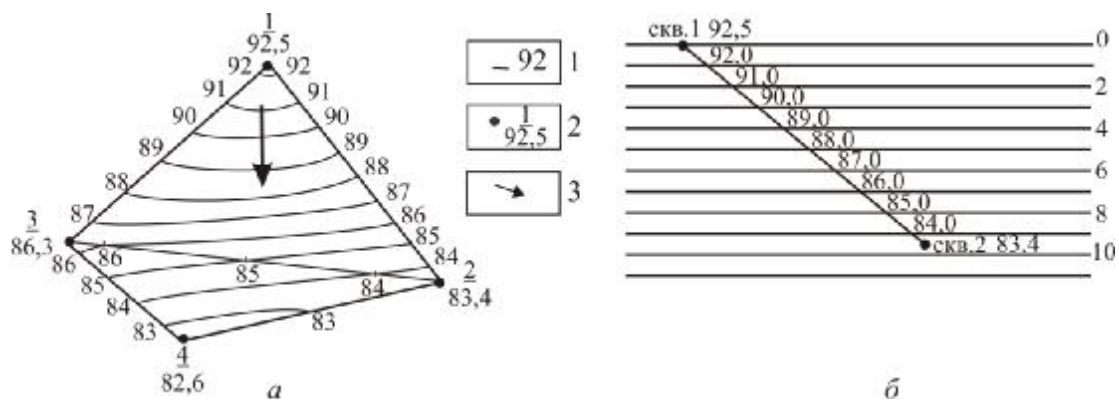


Рис. 7. Схема интерполяции методом треугольников с использованием палетки

- 2) Анализируют глубину залегания водоносного горизонта и ее изменение по площади.
- 3) Характеризуют состав водосодержащей толщи и изменение ее мощности.
- 4) Устанавливают направление движения подземных вод, описывают характер пьезометрической поверхности, указывают возможные причины, обуславливающие эти изменения. Определяют расход естественного потока.
- 5) Определяют области и виды возможного питания и разгрузки.
- 6) Оценивают связь напорных вод с речными долинами.
- 7) По результатам анализа составляют краткую записку в той же последовательности.

#### 1.4. Пример выполнения задания

Предлагаемые студентам варианты заданий представляют собой карту гидрогеологических условий, на которой отражены приуроченность подземных вод к отложениям разного геологического возраста, абсолютные отметки пьезометрического уровня, водообильность пород и качество подземных вод.

В условных обозначениях к карте охарактеризованы водовмещающие породы, тип подземных вод по условиям залегания. В таблице приводятся характеристики глубин залегания подземных вод, установившегося уровня, обводненности пород по результатам откачек, фильтрационные свойства пород и их мощность.

Рассмотрим выполнение задания на примере Салбатской мульды Минусинского межгорного прогиба. Салбатская мульда сложена нижнекаменноугольными и средне-верхнедевонскими терригенно-карбонатными потложениями, с которыми связаны трещинно-пластовые воды. Характеристика водовмещающих пород приведена в табл. 3. На карте показаны абсолютные отметки уровня подземных вод (см. рис. 3).

Рассматривая подземные воды по условиям залегания, на карте можно выделить ГГС с развитием преимущественно напорных вод, приуроченных к

палеозойским отложениям (артезианский бассейн) и ГГС с трещинными водами в отложениях быскарской серии нижнего-среднего девона и интрузивном комплексе пород. Граница между ГГС геологическая, проходит по контакту осадочного комплекса пород и эффузивами быскарской серии и интрузией. Так как в разрезе Салбатской мульды подземные воды гидравлически связаны между собой, верхней границей артезианского бассейна можно считать уровень грунтовых вод, совпадающий с пьезометрической поверхностью. Для массива верхней границей является уровень трещинных вод.

Анализируя построенную карту пьезоизогипс (см. рис. 4), можно сказать, что региональные области питания – внешние и расположены в ГГС трещинных вод. Максимальные отметки уровней приурочены к этим площадям и составляют 550–600 м. Общий подземный сток направлен от массива к бассейну, отражая в целом закономерности распределения подземных вод. Область разгрузки приурочена к центральной части бессточной впадины и оконтурена изопьезой 400 м. Разгрузка скрытая, элизионного типа, о чем свидетельствуют воды с повышенной минерализацией и сульфатным составом.

Основными гидрогеологическими элементами выделенного бассейна являются водоносные комплексы нижнекаменноугольных и средне-верхнедевонских отложений.

*Водоносный комплекс нижнекаменноугольных отложений.* Водовмещающие породы представлены преимущественно песчаниками, реже известняками и алевролитами. Мощность их изменяется от 16 до 30 м (скв. 5, 14, 20, 15).

Подземные воды вскрываются на самых разных глубинах в пределах 136 м. По гидравлическому признаку они относятся как к грунтовым (скв. 5, 15), так и к напорным (скв. 14, 20). Грунтовые воды вскрыты на глубинах до 20 м. Пьезометрический уровень напорных вод устанавливается на глубине от 60 м (скв. 14) до 136 м (скв. 20). Обводненность пород равномерная, коэффициенты водопроницаемости в основном составляют  $90 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

В химическом составе преобладают гидрокарбонатные ионы, и лишь в скважинах 23 и 25 вскрыты сульфатные воды с повышенной минерализацией.

*Водоносный комплекс средне-верхнедевонских отложений.* Водовмещающие породы: песчаники, алевролиты, конгломераты, известняки мощностью от 20 до 80 м. Они содержат трещинно-пластовые воды. Воды напорные, вскрываются на различных глубинах – от первых десятков метров до 70 м и более. На выходах водовмещающих пород на поверхность воды безнапорные (скв. 28, 30, 33). Пьезометрический уровень устанавливается на глубинах от 12 до 60 м.

Обводненность пород неравномерная, водопроницаемость изменяется от 10 до  $60 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в единичных случаях увеличивается до  $640 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

По химическому составу воды преимущественно гидрокарбонатные с минерализацией от 0,3 до 1 г/л.



В водоносных зонах вскрыты трещинные воды в эффузивных отложениях нижнего-среднего девона и интрузиях различного возраста. О характере движения вод и обводненности пород можно судить в основном по родникам. Они выходят на земную поверхность на высотах от 390 до 640 м. Дебиты родников невысокие, изменяются от 0,2 до 1 л/с, увеличиваясь в зонах разломов до 2–5 л/с.

Для оценки естественных ресурсов потока подземных вод, поступающих с региональной области питания, выбираем расчетную полосу между пьезоизогипсами 500 и 400 м. За ширину потока принимаем изопьезу 450 м. Определяем расход потока по уравнению Дарси (4):

$$Q = 30 \cdot 75000 \cdot 0,01 = 22500 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

### Лабораторная работа № 1

**Задание.** По предложенному преподавателем варианту выполнить:

1. На основании характеристики подземных вод по условиям залегания выделить ГГС пластовых (бассейны) и трещинных (массивы) вод.
2. Выделить и охарактеризовать границы ГГС.
3. Построить карту изопьез.
4. Выделить области питания, разгрузки на основе анализа пьезометрической поверхности.
5. Выделить основные гидрогеологические элементы (водоносные зоны, горизонты, комплексы и т.д.), дать их характеристику по следующей схеме: водовмещающие породы, их мощность; тип подземных вод (грунтовые или напорные); глубина вскрытия, установившейся уровень; обводненность пород, удельные дебиты скважин, коэффициенты фильтрации.
6. Определить основные гидродинамические элементы потока в целом для ГГС: направление движения воды, уклон потока, расход потока.
7. Составить пояснительную записку в такой же последовательности.

### 1.5. Химический состав подземных вод

Химический состав подземных вод необходимо учитывать при использовании их для всех видов водоснабжения (питьевого, технического, лечебного), различных сооружений (для защиты от коррозии бетона). Изучают химический состав воды при оценке возможности добычи солей йода, брома, бора, а также при гидрохимических методах поисков полезных ископаемых, для изучения условий происхождения и формирования подземных вод [4].

#### 1.5.1. Обработка химических анализов подземных вод

К главным химическим компонентам подземных вод относятся: хлор-ион  $\text{Cl}^-$ , сульфат-ион  $\text{SO}_4^{2-}$ , гидрокарбонатный  $\text{HCO}_3^-$  и карбонатный  $\text{CO}_3^{2-}$  ио-

ны, а также ионы щелочных и щелочноземельных металлов натрия  $\text{Na}^+$  и калия  $\text{K}^+$ , кальция  $\text{Ca}^{2+}$  и магния  $\text{Mg}^{2+}$ , железа и кремния (в коллоидном состоянии).

Химический анализ воды выражают в трех формах: ионной, миллиграмм-эквивалентной и процент-эквивалентной. В природной воде молекулы солей почти полностью диссоциированы на ионы, поэтому основной формой выражения результатов анализа воды является ионная форма. Содержание каждого иона в лабораторных условиях определяют в граммах или миллиграммах в объеме 1 л. Для выяснения ряда показателей химического состава воды данные ионной формы пересчитывают в миллиграмм-эквивалентную и процент-эквивалентную. Для пересчета данных анализа из ионной формы в миллиграмм-эквивалентную необходимо количество миллиграммов каждого иона в 1 л воды разделить на его эквивалентную массу (ионная масса, деленная на валентность).

Результаты определений для массовых анализов рекомендуется выражать в ионной и процент-эквивалентной форме целыми числами, а миллиграмм-эквивалентную – с точностью до второго десятичного знака.

Для пересчета результатов анализа из миллиграмм-эквивалентов в процент-эквиваленты сумму миллиграмм-эквивалентов анионов и катионов принимают порознь за 100 % и вычисляют процентное содержание каждого иона в отдельности (табл. 4)

Таблица 4

Пример выражения результатов химического анализа воды в трех формах

Ион	мг/л	мг-экв/л	%-экв/л
Катионы			
$\text{Na}^+$	246	10,4	62
$\text{Ca}^{2+}$	77	3,8	22
$\text{Mg}^{2+}$	34	2,8	16
Итого	357	17,15	100
Анионы			
$\text{Cl}^-$	265	7,5	45
$\text{SO}_4^{2-}$	218	4,5	27
$\text{HCO}_3^{2-}$	286	4,7	28
Итого	769	16,7	100

Имея химический анализ воды в трех формах, можно определить основные показатели химического состава воды: минерализацию, жесткость, составить формулу химического состава, определить агрессивность.

### 1.5.2. Определение минерализации воды и реакции по pH

*Минерализация* характеризует общее содержание в воде растворимых солей, а также веществ, находящихся во взвешенном и коллоидном состоя-

нии. Для определения минерализации необходимо взять сумму анионов (А) и катионов (К) в ионной форме:

$$M = \sum \text{мг/л}(A + K).$$

Существуют различные классификации подземных вод по минерализации. Ниже приводится классификация В.И.Вернадского, соответствующая требованиям практического использования подземных вод:

<i>Группы</i>	<i>Минерализация, г/л</i>
Пресные	до 1
Слабосоленоватые	1 – 3
Сильносоленоватые	3 – 10
Соленые	10 – 50
Слабые рассолы	50 – 100
Крепкие рассолы	> 100

Согласно данным табл. 4, минерализация составляет: 246 + 77 + 34 + + 265 + 218 + 286=1126 мг/л или 1,1 г/л.

Вода относится к слабосоленоватым.

*Реакция воды* выражается показателем рН, который представляет собой десятичный логарифм концентрации водорода Н<sup>+</sup>, взятый с положительным знаком:

$$pH = -\lg [H^+].$$

По величине активной реакции рН воды делятся следующим образом:

<i>Наименование воды</i>	<i>рН</i>
Очень кислая	5
Кислая	5 – 7
Нейтральная	7
Щелочная	7 – 9
Высокощелочная	> 9

### 1.5.3. Определение жесткости воды

Под жесткостью понимают свойство воды, обусловленное присутствием в ней солей кальция и магния. Выражается жесткость в мг-экв/л.

Различают следующие виды жесткости: общая, устранимая (временная), неустраиваемая (постоянная), карбонатная и некарбонатная.

Устранимая (временная) и карбонатная жесткости обусловлены одними и теми же гидрокарбонатными и карбонатными солями кальция и магния. Устранимая жесткость – величина экспериментальная. Она показывает, на-

сколько уменьшается общая жесткость воды после кипячения. Карбонатная жесткость – величина расчетная, численно равна количеству миллиграмм-эквивалентов гидрокарбонатных и карбонатных ионов, содержащихся в воде. Если это количество больше, чем общая жесткость, карбонатную жесткость считают равной общей жесткости.

Неустраняемая жесткость обусловлена хлоридами, сульфатами и другими некарбонатными солями кальция и магния. Определяется по разности между общей и карбонатной жесткостью.

Природные воды по общей жесткости О.А. Алекин подразделяет на следующие группы:

<i>Группы</i>	<i>Жесткость, мг-экв/л</i>
Очень мягкая	до 1,5
Мягкая	1 – 3
Умеренно жесткая	3 – 6
Жесткая	6 – 9
Очень жесткая	> 9

Пример. Вычислить все виды жесткости по данным табл. 4.

1. Общая жесткость:

$$G_{\text{общ}} = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] = 3,8 + 2,8 = 6,6 \text{ мг-экв/л.}$$

По степени жесткости (по классификации О.А. Алекина) вода относится к жесткой.

2. Карбонатная жесткость равна 4,7 мг-экв/л.

3. Некарбонатная жесткость равна  $6,6 - 4,7 = 1,9$  мг-экв/л.

#### **1.5.4. Агрессивность воды**

Подземные воды обладают в той или иной степени свойством агрессивности по отношению к бетону, железобетону и металлам. Агрессивность вод обусловлена присутствием ионов водорода, свободной углекислоты, сульфатов и магния. Различают следующие виды агрессивности: агрессивность выщелачивания, общекислотная, углекислая, сульфатная.

Агрессивность выщелачивания определяется по величине карбонатной жесткости воды. Вода считается агрессивной по отношению к бетону при карбонатной жесткости свыше 0,54–2,14 мг-экв/л в зависимости от типа цемента в составе бетона.

Агрессивность общекислотная определяется по количеству водородных ионов (по pH). Вода считается агрессивной для всех видов цементов в пластах высокой проводимости: а) при  $pH < 7$  и карбонатной жесткости меньше 8,6 мг-экв/л; б) при  $pH < 6,7$  и карбонатной жесткости больше 8,6 мг-экв/л. Для слабопроницаемых пластов вода считается агрессивной при  $pH \leq 5$ .

Углекислая агрессивность устанавливается в воде по содержанию свободной углекислоты. Для большинства цементов в пластах высокой водопроницаемости воды считаются агрессивными, если выражение  $a[Ca^{2+}] + b$ , будет больше содержания свободной углекислоты, где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые в зависимости от величины карбонатной жесткости и количества ионов  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$  в мг/л. Значения коэффициентов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для определения углекислой агрессивности воды

Карбонатная жесткость, мг-экв/л	Суммарное содержание $Cl^-$ и $SO_4^{2-}$ , мг/л											
	0 - 200		201 - 400		401 - 600		601 - 800		108 - 1000		> 1000	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
1,4	0,01	16	0,01	17	0,01	17	0,00	17	0,00	17	0,00	17
1,8	0,04	17	0,04	18	0,03	17	0,02	18	0,02	18	0,02	18
2,1	0,07	19	0,06	19	0,05	18	0,04	18	0,04	18	0,04	18
2,5	0,10	21	0,08	20	0,07	19	0,06	18	0,06	18	0,05	18
2,9	0,13	23	0,11	21	0,08	19	0,08	18	0,07	18	0,07	18
3,2	0,16	25	0,14	22	0,11	20	0,10	19	0,08	18	0,08	18
3,6	0,20	27	0,17	23	0,14	21	0,12	19	0,11	18	0,10	18
4,0	0,24	29	0,20	24	0,16	22	0,15	20	0,13	19	0,12	19
4,3	0,28	32	0,24	26	0,19	23	0,17	21	0,16	20	0,14	20
4,7	0,32	34	0,28	27	0,22	24	0,20	22	0,19	21	0,17	21
5,0	0,38	36	0,32	29	0,25	26	0,23	23	0,22	22	0,19	22
5,4	0,40	38	0,36	30	0,29	27	0,26	24	0,24	23	0,22	23
5,7	0,44	41	0,40	32	0,32	29	0,29	25	0,27	24	0,25	24
6,1	0,48	43	0,44	34	0,36	30	0,33	26	0,30	25	0,28	25
6,4	0,54	46	0,47	37	0,40	32	0,36	28	0,33	27	0,31	27
6,8	0,61	48	0,51	39	0,44	33	0,40	30	0,37	29	0,34	28
7,1	0,67	51	0,55	41	0,48	35	0,44	31	0,41	30	0,38	29
7,5	0,74	53	0,60	43	0,53	37	0,48	33	0,45	31	0,41	31
7,8	0,81	55	0,63	45	0,58	38	0,53	34	0,49	33	0,44	32

Агрессивность сульфатная оценивается по содержанию в воде ионов  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$ , мг/л. В породах высокой водопроницаемости для бетона на портландцементе вода считается агрессивной при следующих содержаниях  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$ , мг/л:

$Cl^-$	$SO_4^{2-}$
0–3000	250–500
3001–5000	501–1000
> 5000	> 1000

В породах слабой проводимости вода считается агрессивной при содержании иона  $SO_4^{2-}$  до 1000 мг/л, для бетонов на пуццолановом, шлаковом и песчано-пуццолановом портландцементе – при содержании иона  $Cl^-$  - 400 мг/л независимо от содержания иона  $SO_4^{2-}$ .

### 1.5.5. Выражение химического состава воды в виде формул

Для выражения химического состава воды часто используют формулу М.Г. Курлова, которая представляет собой псевдодробь. В числителе в процент-эквивалентной форме расположены анионы в убывающем порядке, а в знаменателе – в таком же порядке катионы. Ионы, содержание которых не превышает 10 %-экв/л, в формулу не включаются. Слева от дроби указывается количество газов и активных элементов, минерализация воды (М) до первого десятичного знака (г/л), справа – температура воды (°С), реакция воды рН и дебит скважины или расход родника (м<sup>3</sup>/сут).

Согласно данным табл. 4, химический состав воды в виде формулы представляется следующим образом:

$$M_{1,1} \frac{Cl\ 45\ HCO_3\ 28\ SO_4\ 27}{Na\ 62\ Ca\ 22\ Mg\ 16}$$

Название воды дается в следующем порядке: сначала читается числитель от меньшего содержания к большему, затем в таком же порядке читается знаменатель.

Название воды, изображенной формулой, читается так: сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридная магниевая-кальциевая-натриевая.

### 1.5.6. Оценка качества воды для питьевого и хозяйственного назначения

Питьевая вода должна быть бесцветной, прозрачной, иметь температуру от 4 до 15<sup>0</sup>С, не иметь неприятного запаха и вкуса, не содержать болезнетворных бактерий, солей тяжелых металлов.

При выборе и оценке воды источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения пользуются государственными стандартами (СанПиН).

По СанПиН 2.1.4.1074-01 сухой остаток не должен превышать 1000 мг/л, общая жесткость должна быть не выше 7 мг-экв/л. Употребление воды с большим сухим остатком и жесткостью устанавливается органами государственной санитарной инспекции в зависимости от местных условий.

Совершенно не допускается присутствие в питьевой воде аммиака и азотистой кислоты, указывающих на загрязнение воды продуктами разложения органических веществ.

Питьевая вода, подаваемая без очистки, должна содержать свинца не более 0,03 мг/л, мышьяка – 0,05 мг/л, фтора – 1,5 мг/л, меди – 1,0 мг/л, цинка – 5,0 мг/л, железа – 0,3 мг/л.

Загрязненность воды оценивается присутствием патогенных бактерий, показателями являются coli-титр и coli-тест. Coli-титр – это объем воды в кубических сантиметрах, в котором содержится одна кишечная палочка. В при-

годной для питья воде допускается  $\text{col}_i$ -титр  $300 \text{ см}^3$  и более.  $\text{Col}_i$ -тест выражает количество кишечных палочек в одном литре воды, он не должен превышать трех.

К технической воде также предъявляются определенные требования. Вода, идущая на питание паровых котлов, оценивается накипеобразованием, вспениванием и коррозией стенок котла. Для питания котлов вода должна иметь сухой остаток не более  $300 \text{ мг/л}$ , содержать хлора менее  $200 \text{ мг/л}$ , агрессивная кислота должна отсутствовать, жесткость должна быть менее  $2,9 \text{ мг-экв/л}$  (для легкоочищаемых котлов) и  $1,8 \text{ мг-экв/л}$  (для трудноочищаемых котлов).

## Лабораторная работа № 2

**Задание.** По результатам опробования водоносного горизонта с высокой проводимостью (табл. б):

1. Выразить химический состав воды в трех формах: ионной, миллиграмм-эквивалентной и процент-эквивалентной;
2. Определить минерализацию воды;
3. Определить виды жесткости воды: общую, карбонатную и некарбонатную. Определить группу воды по общей жесткости по классификации О.А. Алекина.
3. Определить реакцию воды;
4. Выразить химический состав в виде формулы М.Г. Курлова и дать название воды;
5. Определить агрессивность воды: выщелачивания, общекислотную, углекислую и сульфатную.
6. Оценить бактериальную загрязненность воды и пригодность для питьевых целей.

Таблица 6

## Химические анализы подземных вод

№ п/п	Физические свойства воды (рН)	Свободная СО <sub>2</sub> , мг/л	Окисляемость О <sub>2</sub> , мг/л	Катионы, мг/л						Анионы, мг/л					Coli-титр
				Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$\frac{Fe^{2+}}{Fe^{3+}}$	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
1	Прозрачная, без цвета, запаха (7,4)	17,6	5,8	26,3	7,0	25,9	17,0	-	1,0	18,0	11,5	15,2	3,5	0,08	-
2	Прозрачная, без цвета, запаха (7,6)	15,4	3,1	46,3	-	35,3	6,0	$\frac{0,05}{0,3}$	0,4	9,0	1,0	29,0	-	-	-
3	Прозрачная, без цвета и запаха (7,3)	52,8	2,9	55,7	-	96,4	24,9	-	-	6,8	42,8	500,2	-	-	-
4	Прозрачная, без цвета и запаха (7,5)	55,3	1,8	52,5	4,0	76,6	1,2	$\frac{0,3}{-}$	0,05	13,6	28,0	305,0	2,2	0,7	-
5	Прозрачная, без цвета и запаха (7,6)	5,9	-	58,4	-	56,1	29,6	$\frac{0,3}{0,1}$	0,1	12,5	100,4	307,3	18,0	0,3	-
6	Прозрачная, без цвета и запаха (7,6)	-	-	10,6	0,71	0,22	0,2	-	-	1,3	1,5	15,67	-	-	-
7	Прозрачная, без цвета и запаха (7,6)	-	1,8	5,0	-	91,0	32,0	-	-	6,0	69,0	353,0	-	-	-
8	Цвет 4, прозрачность 30 (7,9)	-	0,75	5,2	-	37,4	9,0	-	0,25	2,9	8,2	158	-	0,02	200
9	Цвет 8 (7,7)	-	1,6	7,6	-	59,2	25,1	-	0,61	4,3	28,2	282,5	0,67	0,01	-
10	Цвет 7,7, прозрачность 30 (7,7)	-	3,03	7,0	-	59,0	15,7	-	0,15	19,5	62,9	163,0	-	0,01	500
11	Цвет 13,6, прозрачность 30 (7,6)	-	2,03	35,6	-	117	32,9	$\frac{0,3}{-}$	0,8	76,5	149,5	390,0	0,03	0,01	500
12	Цвет 2 (7,9)	-	2,5	14,0	-	45,2	33,8	-	0,59	89,1	48,0	242,0	0,77	0,8	500
13	Без цвета и запаха (7,0)	34,5	3,0	93,1	-	195	44,9	-	0,2	24,1	76,4	930,0	-	-	300



## Раздел 2. Динамика подземных вод

### 2.1. Определение притоков воды к водозаборным сооружениям

#### 2.1.1. Движение гравитационных вод

На основе опытов по фильтрации воды через песок, засыпанный в трубки, французский гидравлик А. Дарси установил зависимость (1) [6]:

$$Q = KF \frac{\Delta H}{l},$$

где  $Q$  – расход воды через трубку;  $K$  – коэффициент фильтрации;  $F$  – площадь поперечного сечения трубки;  $\Delta H$  – потеря напора при фильтрации воды, отнесенная к длине пути  $l$ .

Как указывалось выше, потеря напора  $\Delta H$  к длине фильтрации  $l$  характеризуется напорным градиентом или уклоном потока. Разделив обе части уравнения на площадь поперечного сечения, А. Дарси установил линейную зависимость скорости фильтрации от напорного градиента:

$$V = Ki$$

Закон Дарси применим для ламинарного движения воды.

Турбулентное движение подчиняется закономерности А.А. Краснопольского:

$$V = K\sqrt{i}$$

Законам А. Дарси и А.А. Краснопольского подчиняется движение гравитационных вод.

Разнообразные условия залегания подземных вод, литологическая неоднородность водовмещающих пород требует схематизации природных условий и приведение их к типовым расчетным схемам. Эти схемы многообразны и учитывают установившееся и неустойчивое движение воды. При выполнении задания 1 студенты рассчитывают расход потока подземных вод при условии установившегося движения в однородных пластах при горизонтальном залегании водоупора.

Единичный расход потока грунтовых вод (расход, приходящийся на единицу ширины потока) определяется по формуле Ж. Дюпюи:

$$q = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент фильтрации водовмещающих пород. Остальные буквенные выражения см. на рис. 8.

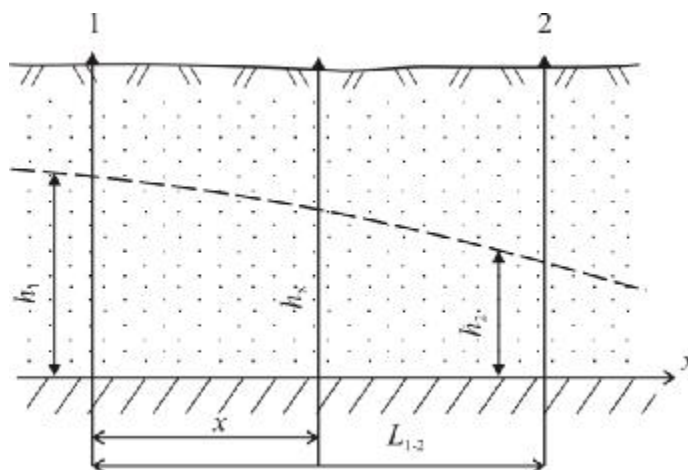


Рис. 8. Схема грунтового потока при горизонтальном залегании водоупора

Расход потока шириной  $B$  равен произведению ширины потока на единичный расход:

$$Q = Bq = BK \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}}$$

*Задача.* Грунтовые воды содержатся в разномзернистых песках. Отметка уровня воды в скв. 1 (верхней по потоку) – 130,4 м, в скв. 2 – 122,6 м. Расстояние между скважинами 2000 м. Водоупорный слой горизонтальный, отметка его поверхности 112,6 м. Коэффициент фильтрации водоносного пласта равен 16,2 м/сут. Определить единичный расход и расход грунтового потока шириной 500 м.

*Решение.* По разности отметок уровней воды в скважинах и водоупора находим мощности  $h_1$  и  $h_2$ :

$$h_1 = 130,4 - 112,6 = 17,8 \text{ м}$$

$$h_2 = 122,6 - 112,6 = 10,0 \text{ м.}$$

Единичный расход определяем по формуле (5):

$$q = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}} = 16,2 \frac{17,8^2 - 10,0^2}{2 \cdot 2000} = 0,878 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Расход грунтового потока шириной 500 м равен:

$$Q = Bq = 500 \cdot 0,878 = 439 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Единичный расход артезианских вод в однородных пластах постоянной мощности (рис. 9) определяется по формуле Г.Н. Каменского:

$$q = Km \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}}$$

Буквенные обозначения см. на рис. 9.

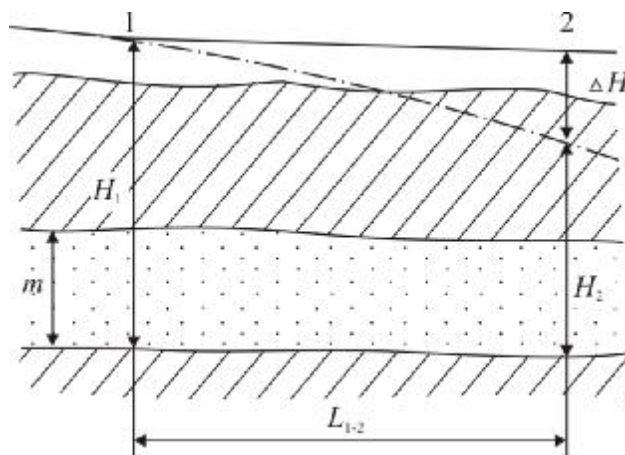


Рис. 9. Схема напорного потока постоянной мощности

Получив единичный расход, при необходимости вычисляют расход потока  $Q$ , задаваясь шириной потока  $B$ .

### 2.1.2. Движение подземных вод к водозаборным и дренажным сооружениям

*Водозаборы* – это инженерные сооружения, предназначенные для захвата подземных вод в целях водоснабжения, орошения и др. Осушение той или иной территории осуществляется искусственным понижением уровня грунтовых или напорных вод при помощи дренажных сооружений.

Водозаборные и дренажные сооружения подразделяются на вертикальные (скважины, шахтные колодцы, шурфы), горизонтальные (каптажные галереи, горизонтальные скважины, дренажные канавы) и комбинированные (сочетание вертикальных сооружений с горизонтальными). Например, сочетание шахтного колодца с горизонтальными скважинами.

Рассмотрим приток воды к совершенным водозаборным сооружениям различного типа в зависимости от характера водоносного горизонта по условиям залегания подземных вод (грунтовые, артезианские). Приток воды к совершенной артезианской скважине (рис. 10) определяем по формуле Ж. Дюпюи:

$$Q = \frac{Km(H_e - h_c)}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{2,73KmS_c}{\lg \frac{R}{r_c}}, \quad (6)$$

где  $m$  – мощность водоносного горизонта;  $H_e$  – напор в скважине до откачки;  $h_c$  – столб воды в скважине во время откачки;  $r_c$  – радиус скважины;  $S_c$  – величина понижения.

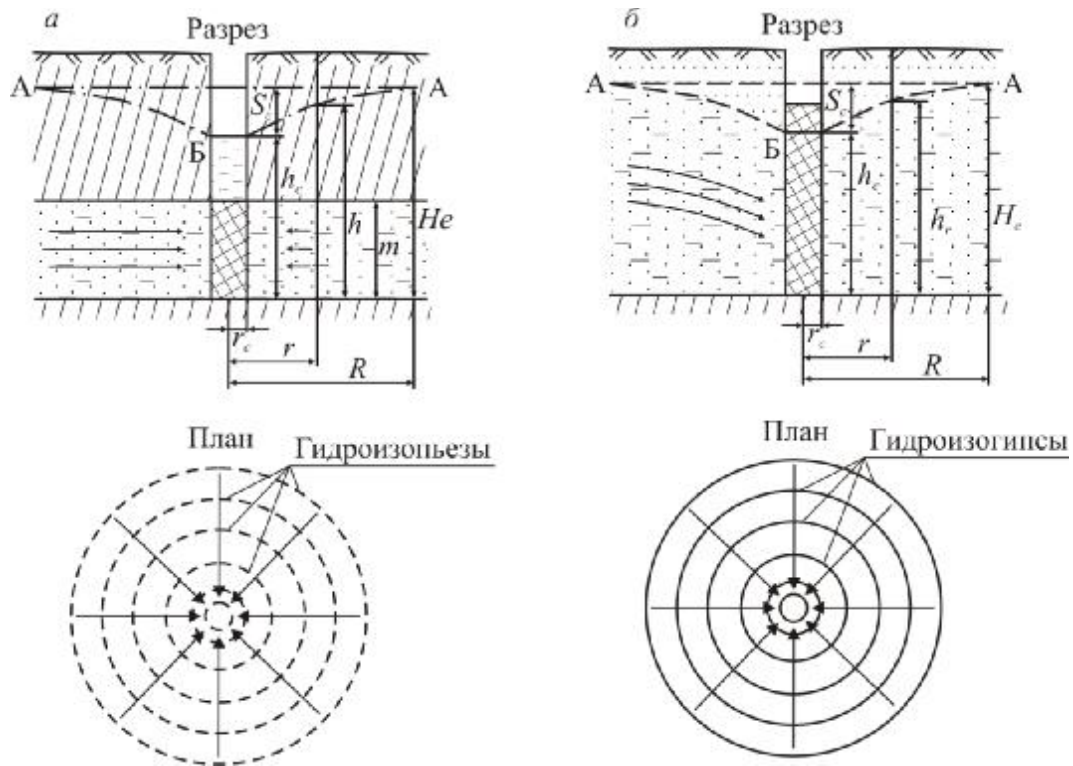


Рис. 10. Схема движения воды:

$a$  – к артезианской скважине;  $b$  – к грунтовой  $h_{\text{СКВ}}$  – столб воды в скважине во время откачки;  $S_c$  – понижение уровня воды в скважине;  $H_e$  – мощность водоносного горизонта до откачки;  $h_r$  – мощность водоносного горизонта во время откачки в сечении, отстоящем от центра скважины на расстоянии  $r$ ;  $r_c$  – радиус скважины;  $R$  – радиус влияния откачки

Для построения пьезометрической кривой может быть использована формула:

$$H_r = H_e - \frac{0,366Q}{Km} \lg \frac{R}{r},$$

где  $H_r$  – высота напора при откачке в сечении, отстоящем от центра скважины на расстоянии  $r$ . Имея несколько значений  $r$  и соответствующие им величины  $H_r$ , можно построить пьезометрическую кривую.

При двух наблюдательных скважинах, расположенных от действующей на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  с пьезометрическими напорами  $H_1$  и  $H_2$ , ордината пьезометрической кривой  $H_r$  определяется по формуле:

$$H_r = \frac{H_2 - H_1}{\lg \frac{r_2}{r_1}} \lg \frac{r}{r_1} + H_1.$$

Приток воды к совершенной грунтовой скважине также определяется по формуле Ж. Дюпюи:

$$Q = \frac{K(H_e^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{1,366K(2H_e - S_c)S_c}{\lg \frac{R}{r_c}} \quad (7)$$

Буквенные обозначения формулы (7) см. на рис. 10. Эту формулу можно использовать и для построения депрессионной кривой. Задаваясь вместо  $r_c$  и  $h_c$  различными значениями  $r$  (расстояние от центра скважины до сечения, где определяется мощность водоносного горизонта при откачке  $h_r$ ), решаем уравнение (7) относительно  $h_r$  и получаем:

$$h_r = \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{K} \ln \frac{R}{r}} = \sqrt{H_e^2 - \frac{0,732Q}{K} \lg \frac{R}{r}}$$

При расчете притоков воды к грунтовым и артезианским скважинам несовершенного типа Н.Н. Веригин предложил использовать те же формулы Ж. Дюпюи (7.2, 7.3), вводя в знаменатель поправку на несовершенство  $+0,217\xi$ , которая дана в табл. 7 [4].

Таблица 7

Определение поправки на несовершенство скважин

$l_0/m$	$m/r_c$									
	0,05	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	51,9
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Поправка  $\xi$  зависит от соотношений  $l_0/m$  и  $m/r_c$  ( $l_0$  – длина рабочей части фильтра;  $m$  – мощность водоносного горизонта;  $r_c$  – радиус скважины). Например, если  $l_0/m = 0,7$ ;  $m/r_c = 200$ , то  $\xi = 3,24$  (пересечение соответствующей вертикальной и горизонтальной граф).

*Задача.* Несовершенная скважина диаметром 305 мм вскрыла напорные воды. Мощность водоносного горизонта 15,3 м, высота напора над кровлей 8,8 м, коэффициент фильтрации водовмещающих песков 11,5 м/сут. Фильтр длиной 4,5 м примыкает к кровле водоносного горизонта. Радиус влияния составляет 300 м. Определить дебит скважины при понижении уровня на 6 м.

*Решение.* Определяем дебит скважины по формуле Н.Н. Веригина:

$$Q = 2,73K \frac{mS_c}{\lg \frac{R}{r_c} + 0,217\xi}$$

Для определения поправки на несовершенство находим соотношения  $l_0/m$  и  $m/r_c$ :  $l_0/m = 4,5/15,3$ ;  $m/r_c = 15,3/0,152 = 101$ . По табл. 7 определяем  $\xi = 14,5$ . Подставляем цифровые значения в формулу:

$$Q = 2,73 \cdot 11,5 \frac{15,3 \cdot 3,6}{\lg \frac{300}{0,152} + 0,217 \cdot 14,5} = 447 \text{ м}^3/\text{сут}$$

### Лабораторная работа № 3

**Задание.** Решить задачи:

**Задача 1.** Грунтовая скважина диаметром 200 мм заложена в аллювиальном водоносном песке мощностью 10 м. Определить приток воды в скважину при понижении уровня на 5 м, если коэффициент фильтрации составляет 3 м/сут, а радиус влияния 134 м.

**Задача 2.** Песчаный пласт с напорной водой имеет мощность 30 м и залегает на глубине 10 м от поверхности земли. Коэффициент фильтрации песчаников составляет 40 м/сут. Определить приток воды в скважину диаметром 0,3 м при понижении уровня на 6 и на 12 м, если напор потока составляет 38 м, а радиус влияния 380 и 500 м.

**Задача 3.** Напорные воды вскрыты в трещиноватых известняках мощностью 30 м скважиной глубиной 45 м. Напор потока подземных вод составляет 51 м. Коэффициент фильтрации – 10 м/сут, радиус влияния 300 м. Определить приток воды в скважину при снижении напорного уровня на 12 м.

**Задача 4.** Скважина глубиной 131 м вскрыла в песчаниках мощностью 60 м напорные воды. Кровля водоносного горизонта находится на глубине 71 м, а пьезометрический уровень – на глубине 55 м от устья скважины. Коэффициент фильтрации равен 3 м/сут, радиус влияния 50 м. Определить приток воды в скважину при понижении уровня на 10 м.

## Раздел 3. Методика гидрогеологических исследований

### 3.1. Определение водопритоков к горным выработкам

Определение притоков воды к горным выработкам – одна из сложнейших задач рудничной гидрогеологии. В зависимости от гидрогеологических условий и решаемых задач используют методы: аналогий, балансовый, гидродинамический и моделирования.

1. *Метод гидрогеологических аналогий* основан на изучении данных по водоотливу из существующих рудников с учетом гидрогеологических условий. Обрабатываются сведения о величине водопритока и его режиме. Затем рассчитывается величина водопритоков на единицу площади выработок ( $q$ , м<sup>3</sup>/час на 1 км<sup>2</sup> площади) и водоприток при понижении уровня на 1 м ( $q_0$ ):

$$q = \frac{Q}{F} \text{ и } q_0 = \frac{q}{S}.$$

Эти значения распространяются на вновь проектируемый рудник, геологическое строение и гидрогеологические условия которого в общих чертах аналогичны участку, по которому собраны материалы.

Будущий водоприток  $Q_1$  на заданном горизонте площадью  $F_1$  при проектном понижении  $S_1$  определяется по формуле

$$Q_1 = q_0 F_1 S_1.$$

#### 2. *Расчет по коэффициенту водообильности.*

Коэффициент водообильности – это отношение количества откаченной воды  $Q$  в кубометрах к количеству добытого за тот же срок полезного ископаемого  $P$ :

$$K_{\text{в}} = \frac{Q}{P}, \text{ м}^3/\text{т}.$$

Определение будущих водопритоков сводится к тому, что величину коэффициента водообильности, установленную для ряда шахт и лав, распространяют на запроектированные горные выработки, находящиеся примерно в одинаковых гидрогеологических условиях, в тех же или новых месторождениях.

#### 3. *Определение водопритоков по водному балансу.*

После сработки статических запасов в горные выработки начинают поступать динамические ресурсы подземных вод. Основной задачей является установление величины динамических ресурсов, т.е. количества воды, поступающей в горные выработки со стороны постоянных источников питания (инфильтрация атмосферных осадков, поглощение поверхностных вод, при-

ток из других водоносных горизонтов). Для этого определяется величина подземного стока.

Этот метод применим для месторождений, разрабатываемых открытым способом или неглубокими подземными выработками

#### 4. *Определение водопритоков по формулам динамики подземных вод.*

Приток в совершенный грунтовый колодец определяется по формуле

$$Q = \frac{1,36KH^2}{\lg R - \lg r},$$

где  $H$  – мощность горизонта;  $R$  – радиус влияния;  $r$  радиус горной выработки.

Для совершенного артезианского ствола в случае перехода потока из напорного движения в безнапорное используется формула

$$Q = \frac{1,36K(2H-m)m}{\lg R - \lg r}.$$

Приток воды к совершенным грунтовым стволам, расположенным близко от реки, определяется по формуле М.В. Сыроватко

$$Q = \frac{nKH^2}{\ln \frac{Z}{r}},$$

где  $Z$  – расстояние от ствола шахты до реки.

Эта формула применима при  $Z < R$ .

#### 5. *Расчет водопритоков в систему горных выработок*

В практике гидрогеологических исследований и проектирования горных предприятий в сложных природных условиях наиболее часто используется метод «большого колодца», предложенный С.В. Троянским.

Площадь, занятая горными выработками или дренажными устройствами, приравнивается к площади равновеликого колодца. Далее находят приведенный радиус  $r_0$ , соответствующий площади «большого колодца»:

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}, \quad (8)$$

где  $F$  – площадь проектируемых выработок или площадь, ограниченная ближайшей замкнутой гидроизогипсой, оконтуривающей воронку депрессии.

Приток воды определяют по формулам Дюпюи.

Для карьеров приток воды по этому методу определяется несколько иначе. Если карьер неправильной формы, приведенный радиус определяется из формулы площади круга. Для карьеров правильной формы, если длина превышает ширину более чем в 10 раз, приток воды определяют как в разрез-



ную траншею. В случае, если отношение длины карьера к его ширине не превышает 10, приведенный радиус определяется по формуле

$$r_0 = \eta \frac{L+B}{4},$$

где  $\eta$  – параметр, усредняющий размеры колодца, определяется из соотношения  $L/B$ ;  $L$  – длина карьера;  $B$  – ширина карьера.

Наиболее широко применяется гидродинамический определения водопритоков как к отдельным выработкам, так и к системе горных выработок.

Приток воды ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ) в ствол шахты из однородного артезианского водоносного горизонта (рис. 11) определяется по формуле:

$$Q = \frac{1,36K(2H-m)m}{\lg \frac{R}{r}},$$

где  $H$  – высота напора над подошвой водоносного пласта,  $m$ ;  $m$  – мощность водоносного горизонта,  $m$ ;  $R$  – радиус влияния,  $m$ ;  $r$  – радиус горной выработки,  $m$ .

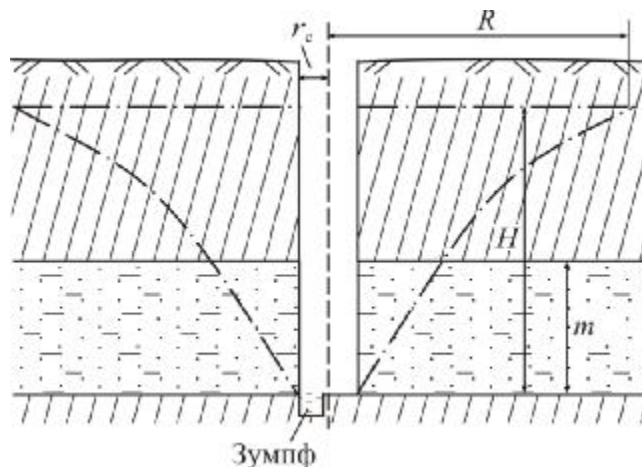


Рис. 11. Приток воды в ствол шахты

Притоки безнапорных вод ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ), поступающих по всему периметру карьера (рис.12), рассчитывают по формуле:

$$Q = \frac{1,36K(H^2-h^2)}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (9)$$

Притоки напорных вод рассчитывают по формуле:

$$Q = \frac{1,36K[(2H-m)m-h_0^2]}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (10)$$

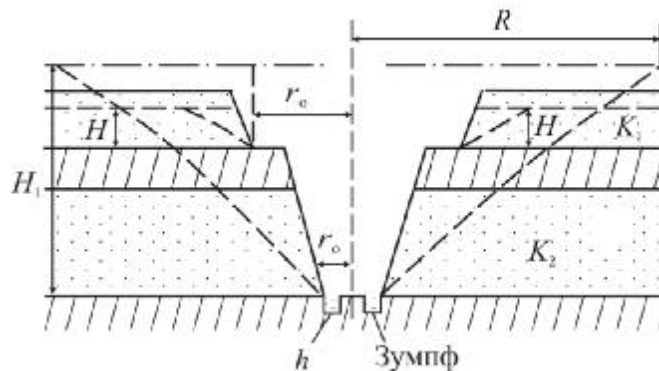


Рис. 12. Схема притока безнапорных и напорных вод, вскрываемых по всему периметру карьера

$H$  – напор потока грунтовых вод;  $H_1$  – то же напорных вод;  $h$  – столб воды в дренажных зумпфах;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты фильтрации водоносных пород;  $r_0$  – приведенный радиус карьера

Если карьер одновременно дренируют безнапорные воды вскрышных отложений и напорные воды коренных отложений, то притоки, подсчитанные по формулам (9, 10) суммируются.

*Задача.* Определить приток воды в карьер из напорного горизонта мощностью 10,5 м, если коэффициент фильтрации равен 5 м/сут, напор потока составляет 52,3 м, радиус влияния карьера равен 10000 м, столб воды в зумпфе 1 м, а приведенный радиус влияния составляет 452,5 м.

*Решение.* Используем формулу (10):

$$Q = \frac{1,36 \cdot 5 \cdot [(2 \cdot 52,3 - 10,5) - 1^2]}{\lg \frac{10000}{452,5}} = 4537,5 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Водопитоки в систему горных выработок определяются по методу «большого колодца», предложенного С.В. Троянским. Использование этого метода рассмотрим на следующем примере.

*Задача.* Месторождение приурочено к закарстованным известнякам, с которыми связан водоносный горизонт со свободной поверхностью на отметке 125 м. По результатам опробования горизонта установлено, что ниже отметки 80 м известняки слабопроницаемы. Подошва горных выработок закладывается на отметке 96 м, что приведет к понижению уровня на 29 м. Площадь, занятая горными выработками, составляет 17600 м<sup>2</sup>, что соответствует кругу радиусом 75 м. Коэффициент фильтрации, определенный опытными откачками из скважин составляет 0,00015 м/с. Мощность водоносного гори-

зонта составляет  $125 - 80 = 45$  м. Радиус влияния 1000 м. Определить приток воды.

*Решение.* Расчет водопритока производим по формуле (7):

$$Q = \frac{1,36 \cdot 0,00015 (2 \cdot 45 - 29) 29}{\lg \frac{1000}{75}} = 801,8 \text{ м}^3/\text{сут}$$

#### Лабораторная работа № 4

**Задание.** Решить задачи:

**Задача 5.** Определить максимальный приток воды в ствол вертикальной шахты диаметром 4 м. Мощность пересекаемого безнапорного водоносного горизонта 16 м. Коэффициент фильтрации обводненных песчаников составляет 5 м/сут, а радиус влияния достигает 350 м.

**Задача 6.** Определить приток воды к горным выработкам с приведенным радиусом 70 м. Водоносный горизонт безнапорный, мощность обводненных известняков составляет 30 м, коэффициент фильтрации – 2 м/сут, радиус влияния 1000 м.

**Задача 7.** Определить приток воды к горным выработкам, расположенным на площади 15 тыс м<sup>2</sup>. Водоносный горизонт безнапорный, мощность водовмещающих пород 30 м, коэффициент фильтрации 10 м/сут, радиус влияния 1000 м.

**Задача 8.** Определить приток воды в карьер из напорного горизонта. Коэффициент фильтрации песков равен 15 м/сут, мощность водоносной толщи 12,9 м, напор потока составляет 48,5 м, радиус влияния карьера 7500 м, столб воды в зумпфе 1 м, ширина карьера 350 м, длина карьера 1250 м.

Определение водопритоков в горные выработки по формулам динамики подземных вод связано с трудоемкими вычислениями, поэтому их рекомендуется выполнять на ЭВМ.

## Раздел 4. Инженерная петрология

### 4.1. Использование показателей физико-механических свойств для характеристики грунтов

Состав песчаных, гравелистых, щебнистых и, особенно, глинистых пород и глин в значительной степени определяют их физико-механические свойства [5].

**Гранулометрический (механический) состав** характеризует осадочные породы в отношении их дисперсности, т.е. размеров слагающих частиц. Он выражает процентное содержание в породе групп частиц (фракций) различных размеров, взятых по отношению к весу абсолютно сухой породы. Размер фракций выражают в миллиметрах.

Глинистые породы состоят существенно из частиц, измеряемых сотыми и тысячными долями миллиметра. Песчаные и другие грубообломочные породы состоят из частиц, размер которых измеряется преимущественно десятками долями миллиметра, единицами и десятками миллиметров.

В инженерно-геологической практике при классификации обломочных пород по гранулометрическому составу различают следующие фракции (табл. 8).

Таблица 8

Классификация фракций

Фракция	Размеры фракций, мм	Фракция	Размеры фракций, мм
1	2	1	2
Валуны и глыбы:		Песчаные частицы:	
крупные	800	грубые	2 – 1
средние	800 – 400	крупные	1 – 0,5
мелкие	400 – 200	средние	0,5 – 0,25
Галька и щебень:		мелкие	0,25 – 0,1
очень крупные	200 – 100	тонкие	0,1 – 0,05
крупные	100 – 60	Пылеватые частицы:	
средние	60 – 40	крупные	0,05 – 0,01
мелкие	40 – 20	мелкие	0,01 – 0,002
Гравий и дресва:		Глинистые частицы:	
крупные	20 – 10	грубые	0,002 – 0,001
средние	10 – 4	тонкие	< 0,001
мелкие	4 – 2		

Глинистые частицы размером менее 0,002 мм резко отличаются от других фракций по форме и составу. Преобладающая роль в их составе принадлежит глинистым минералам, представляющих особую группу водных силикатов. Именно у частиц размером менее 0,002 мм наиболее резко проявляются характерные «глинистые» свойства: увеличивается емкость поглощения,

повышается влагоемкость, пластичность, липкость, высота капиллярного поднятия, уменьшается проницаемость и т.д.

В составе пылеватых (алевритовых) частиц размером 0,002 – 0,05 мм преобладает кварц, форма частиц приближается к сферической, плохо окатаны, угловаты. Глинистые свойства у них выражены слабо. Главное свойство пылеватых частиц состоит в том, что при увлажнении они легко теряют свою незначительную связность и приобретают подвижность. Поэтому пылеватые породы всегда легко размокают и быстро переходят в плавунное состояние, а при промерзании весьма склонны к пучению.

Песчаные или псаммитовые (размером 0,05 – 2 мм), а также гравийно-галечные и другие крупнообломочные (псефитовые) частицы состоят их обломков минералов и пород. По своим свойствам псаммитовые и псефитовые частицы невлагоемки, обладают хорошей водоотдачей, водопроницаемы и сильноводопроницаемы.

Для определения гранулометрического состава проводят гранулометрический анализ. Применяемые методы могут быть разделены на прямые и косвенные (табл. 9).

Таблица 9

Методы гранулометрического состава пород

Методы	Способ определения содержания фракций
Прямые: ситовой метод Сабанина, пипеточный и др. визуальный	Рассеивание на ситах Отмучивание в воде Визуальное исследование пород
Косвенные: метод Рутковского  ареометрический	По набуханию глинистых частиц при их увлажнении и отмучивании песчаных частиц в воде Измерение плотности суспензии

Прямые методы позволяют непосредственно выделять отдельные фракции, взвешивать их и определять процентное содержание в породе. Косвенные методы не предусматривают разделение породы на фракции, они основаны на изучении некоторых свойств породы, по изменению которых можно судить о содержании в них той или иной фракции. Результаты гранулометрических анализов представляют в виде таблиц, в которых показывают процентное содержание в породе различных фракций, а также изображают графически. Наиболее распространенным способом изображения гранулометрического состава является интегральная кривая (суммарная кривая), каждая точка которой соответствует сумме фракций меньше определенного диаметра.

Кривая гранулометрического состава может быть построена в обыкновенном или логарифмическом масштабе. Обыкновенный масштаб неудобен

тем, что вследствие широкого диапазона диаметров частиц графики получаются непомерно растянутыми по оси абсцисс. Построение кривых в полулогарифмическом масштабе позволяет наносить содержание мелких фракций с достаточной точностью, не удлиняя кривую по оси абсцисс.

Для построения кривой в полулогарифмическом масштабе по оси абсцисс откладывают не диаметры частиц, а их логарифмы или величины, пропорциональные логарифмам (рис. 13). В начале координат обычно ставят число 0,001, а затем, принимая  $\lg 10$  равным произвольному отрезку, откладывают этот отрезок в правую сторону от начала графы 3 – 4 раза, делая отметки и ставя против них последовательно числа 0,01; 0,10; 1,00. Расстояния между каждыми отметками делят на девять частей пропорционально логарифмам чисел 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

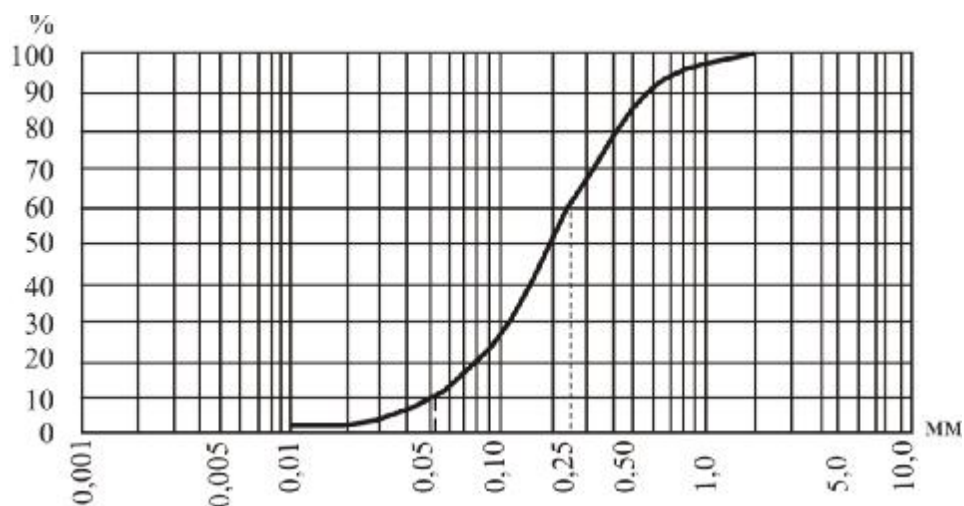


Рис. 13. Интегральная кривая гранулометрического состава

В первом от начала координат выделенном отрезке будут абсциссы, отвечающие диаметрам частиц от 0,002 до 0,009 мм, во втором – от 0,01 до 0,09 мм, в третьем – от 0,1 до 0,9 мм и в четвертом – от 1 до 10 мм.

Так, если принять, что  $\lg 10 = 1$  соответствует отрезку длиной 4 см, то  $\lg 2 = 0,301$  будет соответствовать отрезку  $0,301 \times 4 = 1,2$  см,  $\lg 3 = 0,477$  – отрезку  $0,477 \times 4 = 1,9$  см,  $\lg 4 = 0,602$  – отрезку  $0,602 \times 4 = 2,4$  см и т.д.

Указанные отрезки откладывают по оси абсцисс от начала координат и от каждой отметки, ограничивающей отрезок длиной 4 см.

По оси ординат откладывают суммарные содержания фракций в процентах. Для этого последовательно суммируют содержания фракций, начиная с наиболее мелкой, и по этим числам строят кривую. Каждое из полученных чисел показывают суммарное содержание фракций меньше определенного диаметра – диаметра наиболее крупной фракции, вошедшей в данную сумму.

Данные, использованные для построения кривой, изображенной на рис. 13, приведены в табл.10.

## Данные гранулометрического анализа

Отдельные фракции		Совокупность фракций	
Диаметр частиц, мм	Содержание, %	Диаметр частиц, мм	Содержание, %
0,01	1,2	0,01	1,2
0,01 – 0,05	7,3	0,05	8,5
0,05 – 0,25	48,5	0,25	57,0
0,25 – 0,5	32,4	0,5	89,4
0,5 – 1,0	8,2	1,0	97,6
1,0 – 2,0	2,4	2,0	100,0

Интегральные кривые гранулометрического состава дают возможность на одну сетку наносить несколько кривых и легко находить действующий диаметр и контролирующий диаметр для каждой кривой.

Под действующим или эффективным диаметром ( $d_{10}$  или  $d_e$ ) понимают размер частиц, соответствующий ординате 10 % на интегральной кривой гранулометрического состава. Эта условная величина используется при подсчетах коэффициента фильтрации песков.

Действующий диаметр находят следующим образом: из точки на оси ординат, соответствующей 10 %, проводят линию параллельно оси абсцисс до пересечения с кривой; из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Полученная на оси абсцисс точка и покажет значения действующего диаметра.

Под контролирующим диаметром (диаметр шестидесяти  $d_{60}$ ) понимают размер частиц, соответствующий ординате 60 % на интегральной кривой гранулометрического состава. Графически определяется так же, как и действующий диаметр.

Отношение  $d_{60}/d_{10}$  называют коэффициентом неоднородности. Чем больше коэффициент неоднородности, тем более разнородной по гранулометрическому составу является порода. При коэффициенте неоднородности песчаных пород более 3, а глинистых – более 5, они считаются неоднородными.

О степени неоднородности грунта можно судить и по характеру кривой механического состава. Крутая кривая указывает на однородность грунта, пологая – на неоднородность грунта по механическому составу.

При большом количестве механических анализов для их графического изображения удобно пользоваться треугольником Фере (рис. 14).

На рисунке изображены результаты механического анализа пяти образцов грунта с содержанием основных фракций (табл. 11).

Этот способ позволяет изображать содержание не отдельных фракций, а трех основных групп – песчаной, пылеватой и глинистой.

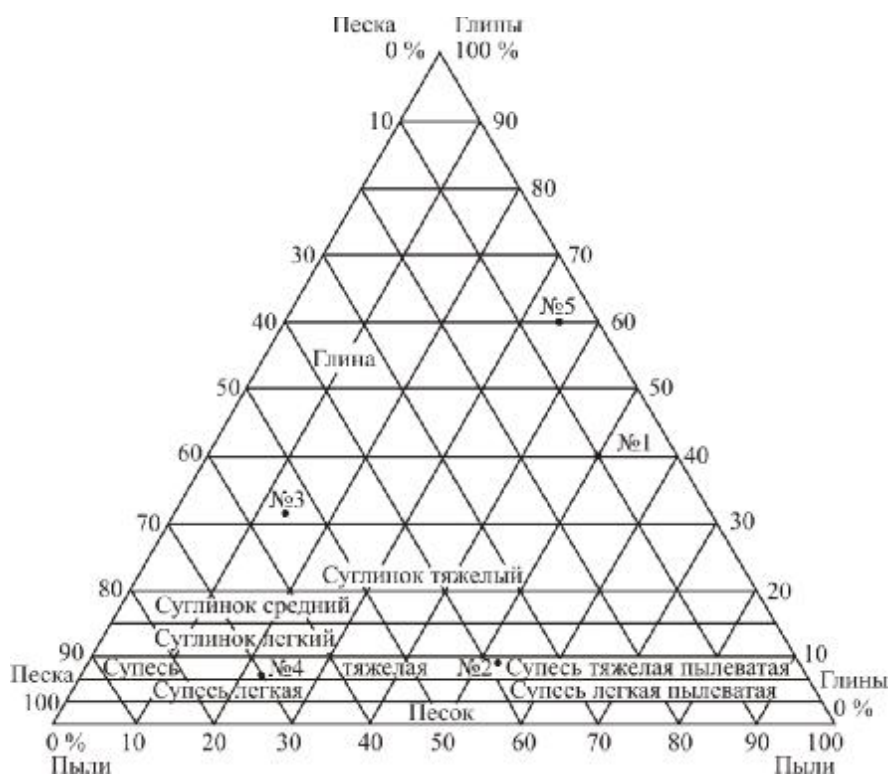


Рис. 14. Диаграмма-треугольник гранулометрического состава

Таблица 11

Результаты гранулометрического анализа

№ анализа	Содержание фракций, %		
	песок	пыль	глина
1	10	50	40
2	37	55	8
3	53	15	32
4	70	23	7
5	4	36	60

В треугольнике Фере использовано основное свойство равностороннего треугольника, состоящее, как известно, в том, что сумма перпендикуляров, опущенных из какой-либо точки внутри треугольника на три стороны, равна высоте треугольника. Это дает возможность изобразить состав грунта точкой, если разделить высоту треугольника (или, что то же самое, его стороны) на 100 частей и откладывать содержание в грунте глинистых, пылеватых и песчаных частиц, выраженное в процентах, от разных сторон треугольника.

Этот способ довольно груб, но он позволяет наносить на один чертеж большое число анализов. Гранулометрический состав каждого грунта изображается при этом в виде точки. Кроме того, разбивая треугольник на части в соответствии с той или иной трехчленной классификацией, можно сразу по



положению внутри треугольника определить наименование грунта по принятой классификации.

В зависимости от размера зерен исследуемого грунта применяются различные методы. Для определения гранулометрического состава мелкозернистых и тонкозернистых песков применяют метод А.Н. Сабанина или его еще называют метод отмучивания [14]. При содержании в песке более 10 % фракций диаметром менее 0,01 мм метод А.Н. Сабанина применять не рекомендуется.

Для определения гранулометрического состава глинистых пород применяется пипеточный и ареометрический методы, в полевых условиях используют визуальный метод, по которому можно выделить следующие гранулометрические разности: глина, суглинок, супесь песок и гравий. Для песчаных пород основным методом является ситовой.

**Исследование физических свойств горных пород.** Основными показателями, характеризующими физические свойства песчаных и глинистых пород, является удельный и объемный вес, пористости и влажность. По основным физическим свойствам можно косвенно судить о прочности, деформируемости и устойчивости песчаных и глинистых пород, а также об их изменении под влиянием геологических процессов и искусственных факторов.

Кроме названных характеристик для глинистых пород важное значение имеет консистенция, для песков – относительная плотность.

*Удельный вес* горных пород характеризуется весом единицы объема минеральной части (скелета) породы ( $\text{г/см}^3$ ). Он определяется минеральным составом пород и выражает средний удельный вес слагающих их минералов. Удельный вес песчаных и глинистых пород изменяется незначительно. У легких, сильно песчаных разностей глинистых пород, супесей и песков средний удельный вес равен  $2,65 \text{ г/см}^3$ , у среднепесчаных (суглинки) –  $2,7 \text{ г/см}^3$ , у тяжелых разностей глин –  $2,75 \text{ г/см}^3$ .

*Объемный вес* породы – это вес единицы ее объема при естественной влажности и сложении. Величина его определяется удельным весом, пористостью и влажностью породы. Чем выше удельный вес, тем выше и объемный вес; чем больше пористость, тем меньше объемный вес. При увеличении влажности при данной пористости объемный вес увеличивается. От объемного веса породы отличают объемный вес ее скелета, под которым понимают вес единицы минеральной (твердой) части естественного сложения. Объемный вес скелета породы служит контрольным показателем ее уплотнения в теле земляных сооружений (плотин, дамб, насыпей и др.).

Численно объемный вес скелета породы равен отношению веса породы ( $g_1+g_2$ ) к ее объему ( $V_1+V_2$ ) (ко всему объему породы естественного сложения):

$$\gamma = \frac{g_1+g_2}{V_1+V_2}.$$

Объемный вес скелета породы можно определить по удельному весу ( $\gamma$ ) и весовой влажности породы в долях единицы ( $W$ ) по формуле:

$$\gamma_c = \frac{\gamma}{1+W}.$$

Удельный и объемный вес позволяют косвенно судить о прочности, деформируемости и устойчивости пород. Кроме того, используются при различных инженерных расчетах, например, при расчете напряжения в горных породах на той или иной глубине, создаваемого весом вышележащих пород; давления, оказываемого породами на крепи подземных выработок или на подпорные стенки и т.д.

*Пористость* характеризует наличие пустот в горных породах. Она характеризуется коэффициентом пористости ( $n$ ), который определяется отношением объема к объему всей породы в сухом состоянии, выражается в долях единицы или процентах и вычисляется по формуле:

$$n = \frac{V_{\text{п}}}{V} \cdot 100 = \frac{\gamma_y - \gamma_c}{\gamma_y}, \quad (11)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем пор;  $V$  – объем породы;  $\gamma_y$  – удельный вес породы,  $\text{г/см}^3$ ;  $\gamma_c$  – объемный вес скелета породы,  $\text{г/см}^3$ .

Кроме коэффициента пористости в инженерной геологии широко используются коэффициентом приведенной пористости ( $\varepsilon$ ). Под последним понимается отношение объема пор к объему скелета породы ( $V_c$ ):

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{п}}}{V_c} = \frac{\gamma_y - \gamma_c}{\gamma_c} = \frac{n}{1-n}.$$

Пористость песчаных и глинистых пород изменяется в широких пределах в зависимости от формы и размера слагающих их частиц. Пористость неоднородных по гранулометрическому составу пород обычно меньше, чем однородных, хорошо отсортированных. Пористость характеризует естественную уплотненность песков и глин и склонность их к деформациям. Коэффициент пористости – это одна из характеристик, используемых при расчетах осадок сооружений.

*Влажность* характеризуется количеством воды, заполняющим поры породы. В зависимости от влажности, особенно у глинистых пород, изменяется прочность, деформируемость и устойчивость.

Численно влажность выражают отношением веса воды ( $q_1$ ), заполняющей поры породы, к весу сухой породы ( $q_2$ ) в долях единицы или в процентах от веса сухой породы.

$$W = \frac{q_1}{q_2} = \frac{\gamma - \gamma_c}{\gamma_c}. \quad (12)$$

Если весовая влажность определяется по образцам естественной влажности, то ее называют естественной.

Влажность песчаных и глинистых пород изменяется в широких пределах в условиях естественного залегания. Так, например, естественная влажность песков в зоне аэрации достигает 4–5 %, в зоне капиллярного увлажнения и насыщения – 2–30 %. В глинистых породах влажность изменяется в более широких пределах. В современных осадках озер и морей она достигает 80–90 %, в глинистых породах средней степени уплотнения она изменяется от 12–15 до 50–60 %, а в породах высокой плотности (аргиллиты) снижается до 3–5 %.

В зависимости от степени влажности песчаные и глинистые породы имеют различное физическое состояние. Изменение состояния пород определяется степенью насыщения, характеристикой которой служит коэффициент насыщения ( $K_w$ ), выражающий отношение естественной влажности к их полной влагоемкости ( $W_{п.в}$ ):

$$K_w = \frac{W}{W_{п.в}}$$

Коэффициент водонасыщения выражают в долях единицы, его значения могут изменяться от 0 до 1. В зависимости от величины  $K_w$  породы подразделяются на маловлажные (0–0,5), влажные (0,0–0,8) и насыщенные (0,8–1).

*Консистенция* глинистых пород – это их физическое состояние при определенной влажности. Консистенция зависит от вязкости породы, т.е. внутреннего сопротивления перемещению глинистых частиц.

При различной консистенции глинистые породы характеризуются различной плотностью, прочностью, деформируемостью. В зависимости от консистенции и естественной уплотненности, характеризуемой коэффициентом пористости, выбирается нормативное давление на такие породы. Поэтому определение консистенции глинистых пород имеет первостепенное значение для оценки их строительных качеств.

Каждому состоянию глины соответствует определенная влажность. Эти характерные влажности называются пределами пластичности. Переходу глины из твердого состояния в пластичное соответствует влажность, называемая нижним пределом пластичности, верхний предел пластичности соответствует переходу глины из пластичного состояния в вязко-текучее.

Интервал влажности, при котором глинистая порода находится в пластичном состоянии, называется числом пластичности ( $\mu$ ). Число пластичности в значительной мере характеризует степень глинистости породы. Если число пластичности больше 17 %, то порода высокопластична и ее классифицируют как глину, при числе пластичности от 7 до 17 % порода среднепластична – суглинок, при числе пластичности менее 7 % порода слабопластична – супесь [10].

Глинистые породы в условиях естественного залегания и сложения могут существенно отличаться от пород нарушенного сложения. Поэтому при оценке состояния глин по строительным нормам используют показатель консистенции ( $B$ ) [15]:

$$B = \frac{W - W_p}{\mu},$$

где  $W$  – естественная влажность;  $W_p$  – нижний предел пластичности;  $\mu$  – число пластичности.

**Исследование водных свойств горных пород.** Водными свойствами горных пород называются такие свойства, которые проявляются при взаимодействии пород с водой. Главнейшими водными свойствами являются: водоустойчивость, влагоемкость, водопроницаемость, капиллярность.

*Водоустойчивость* скальных и полускальных пород определяется коэффициентом размягчения  $K_p$ , который характеризует снижение прочности указанных пород при взаимодействии с водой. Коэффициент размягчения численно равен отношению временного сопротивления сжатию образца породы после насыщения водой ( $R_{сж.в.}$ ) к временному сопротивлению сжатию до насыщения образца водой ( $R_{сж.с.}$ ):

$$K_p = \frac{R_{сж.в.}}{R_{сж.с.}}$$

Для пород скальных водоустойчивых коэффициент размягчения не ниже 0,9, у пород с пониженной водоустойчивостью он равен 0,7 – 0,8. У полускальных пород коэффициент размягчения составляет 0,5.

Водоустойчивость глинистых пород характеризуется размокаемостью (снижение прочности при потере структурных связей) и размягчаемостью (снижение прочности при сохранении структурных связей).

*Влагоемкость* – это способность горных пород поглощать и удерживать определенное количество воды. Скальные и раздельнозернистые породы не-влагоемкие, полускальные – слабовлагоемкие, к средневлагоемким относятся супеси и пески мелко- и тонкозернистые, пылеватые, к влагоемким относятся глины и суглинки. Влагоемкость бывает полная, капиллярная и молекулярная. При полной влагоемкости все поры полностью заполнены водой. По полной влагоемкости судят о степени насыщения горных пород водой.

Капиллярная влагоемкость характеризует заполнение водой только капиллярных пор. Для глинистых пород капиллярная влагоемкость приближается к полной. Максимальная молекулярная влагоемкость характеризует способность горных пород удерживать физически связанную воду. Для многих глинистых пород максимальная молекулярная влагоемкость соответствует влажности на пределе пластичности.

С влагоемкостью глинистых пород связана их способность к набуханию. У некоторых глинистых разностей при взаимодействии с водой объем увеличивается на 20–30 %, а сила набухания может достигать 10–11 кг/см<sup>2</sup> [12]. Величину набухания выражают в долях единицы или в процентах от начального образца породы по приращению высоты образца:

$$\delta_{\text{н}} = \frac{h_{\text{к}} - h_{\text{н}}}{h_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad H_{\text{н}} = \frac{h_{\text{к}} - h_{\text{н}}}{h_{\text{н}}} \cdot 100 \%, \quad (13)$$

где  $h_{\text{к}}$  – высота образца породы в кольце прибора после набухания;  $h_{\text{н}}$  – высота образца породы в кольце прибора до смачивания водой;  $\delta_{\text{н}}$  – относительное набухание в долях единицы;  $H_{\text{н}}$  – величина набухания в процентах от первоначальной высоты образца.

Набухание обычно происходит до определенной величины влажности, выше которой приращение объема прекращается.

*Водоотдача* характеризуется способностью горных пород отдавать свободнотекающую воду. Такой способностью обладают только невлагоемкие или слабовлагоемкие породы. Водоотдача пород примерно равна разности между полной их влагоемкостью ( $W_{\text{п}}$ ) и максимальной молекулярной ( $W_{\text{м.м}}$ ):

$$W_{\text{отд}} = W_{\text{п}} - W_{\text{м.м}}$$

Для количественной характеристики водоотдачи служит также коэффициент водоотдачи ( $\mu_{\text{в}}$ ), равный отношению объема стекающей воды к объему породы, выраженной в долях единицы.

Капиллярность песчаных и глинистых пород обусловлена поступлением воды в горные породы из нижележащих водоносных горизонтов под влиянием гидростатического и гидродинамического напора и капиллярных сил.

Высота капиллярного поднятия или мощность капиллярной зоны зависит от сил поверхностного натяжения воды и радиуса капилляров. Для гравия, например, эта высота составляет 2,5 см, для тонкослоистых песков – 105,5 см, для алевритов – 200 см. При приближенных расчетах высоту капиллярного поднятия рассчитывают по формуле:

$$H_{\text{к}} = \frac{30}{r},$$

где  $r$  – радиус капилляра, см.

*Водопроницаемость* характеризует способность горных пород пропускать через себя воду под действием напора.

Водопроницаемость рыхлых несвязных и глинистых связных пород зависит от пористости, скважности, действующих напоров, вязкости воды, гранулометрического состава и его однородности [13].

Мерой водопроницаемости горных пород служит коэффициент фильтрации, который прямо пропорционален напорному градиенту. При градиенте, равном единице, коэффициент фильтрации равен скорости потока:

$$V = K_{\phi} i,$$

где  $V$  – скорость потока, см/сут, м/сут, и т.д.;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, см/сек, м/сут, и т.д.;  $i$  – напорный градиент.

**Исследование механических свойств грунта.** Под механическими свойствами понимается способность горных пород сопротивляться внешним механическим воздействиям (нагрузкам). Механические свойства определяются такими понятиями как прочность и деформация [9].

Под *прочностью* понимается способность горных пород сопротивляться разрушению и сохранению остаточных деформаций. Свойство горных пород менять под нагрузкой форму сложения и объем называют деформацией.

Прочность и деформация зависят от состава пород, их происхождения, прочности структурных связей. Предельно прочное состояние характеризуется равенством внутренних и внешних сил. Деформация наступает тогда, когда внешние силы, действующие на породу, становятся больше внутренних (трение и сцепление).

Прочность скальных и полускальных пород оценивается временным сопротивлением сжатию, растяжению, сдвигу, которое определяется как отношение предельной внешней нагрузки, при которой образец разрушается, к первоначальной площади поперечного сечения образца [11]:

$$R_{сж} = \frac{P_{пр}}{F}, \text{ кг/см}^2.$$

Прочность мягких связных и рыхлых несвязных пород определяется сопротивлением их сдвигу, которое зависит от сил внутреннего трения между отдельными частицами, слагающими породу, и от сцепления между частицами породы. Трение возникает в результате шероховатой поверхности частиц, а сцепление – от водно-коллоидных связей, сил молекулярного притяжения между частицами и от естественного цемента.

Зависимость между усилием, необходимым для сдвига  $\tau$ , и вертикальной нагрузкой  $\sigma$  выражается прямой линией (рис. 15).

Угол  $\phi$ , образуемый этой линией и осью абсцисс, называется внутренним трением. Тангенс этого угла ( $\text{tg}\phi = \tau / \sigma = f$ ) называется коэффициентом внутреннего трения. Сопротивление сдвигу песчаных пород определяется уравнением Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\phi.$$

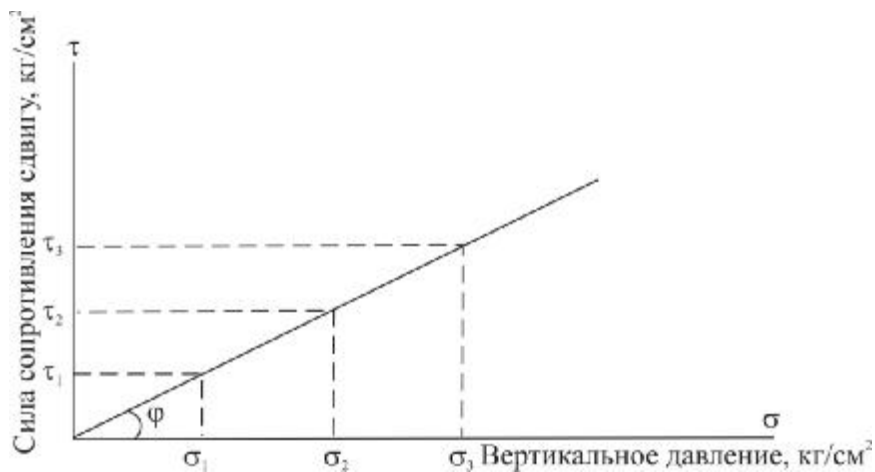


Рис. 15. График сопротивления сдвигу песчаной породы

Угол внутреннего трения рыхло-сыпучих пород практически весьма близок углу естественного откоса, т.е. тому углу, который образует свободно насыпанный песок с горизонтальной поверхностью.

Для того чтобы произошел сдвиг в глинистых породах, необходимо дополнительное усилие для преодоления сил сцепления (рис. 16).

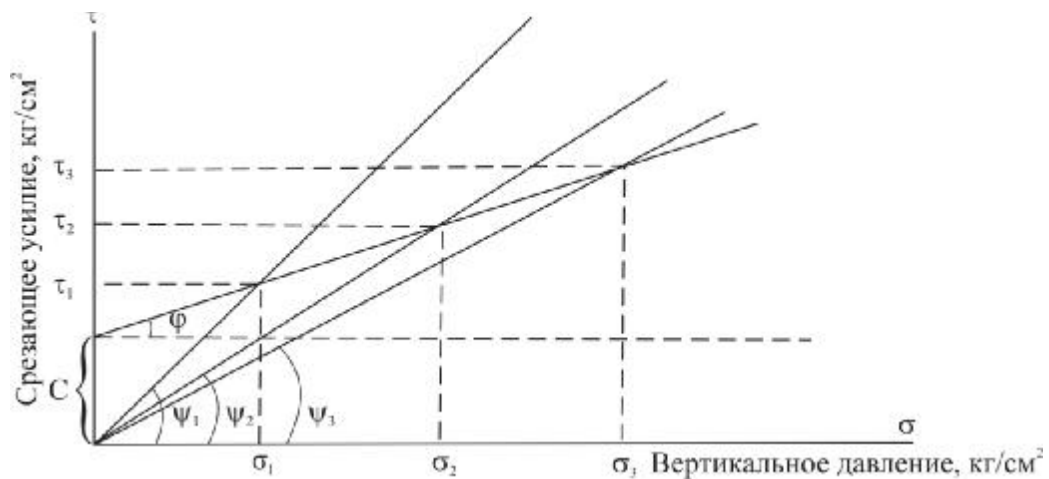


Рис.16. График сопротивления сдвигу глинистой породы

Сопротивление сдвигу глинистых пород вследствие этого выражается зависимостью:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C.$$

Угол  $\varphi$  здесь также является углом внутреннего трения, а тангенс этого угла – коэффициентом внутреннего трения. Если на прямой сдвига глинистых пород выделить точки, соответствующие нагрузке  $\sigma_{1,2,3}$  и сдвигу  $\tau_{1,2,3}$  и соединить их с началом координат, получим прямые линии, угол наклона которых к оси абсцисс называется углом сдвига  $\psi$ , а тангенс этого угла – коэффициентом

сдвига  $F$ :

$$\operatorname{tg}\psi = F.$$

Последние два показателя характеризуют общее сопротивление сдвигу глинистой породы при данном ее физическом состоянии и при данном нормальном давлении.

Деформация скальных и полускальных пород сходна с деформациями обычных твердых тел и подчиняется закону Гука, закону пропорциональности между действующей нагрузкой и деформацией:

$$\sigma = El, \text{ кг/см}^2,$$

где  $\sigma$  – напряжение, передаваемое на тело;  $l$  – относительная поперечная деформация;  $E$  – модуль упругости.

Для соотношения продольных и поперечных деформаций используется коэффициент Пуассона ( $M$ ):

$$M = l'/l,$$

где  $l'$  – относительная поперечная деформация,  $l$  – относительная продольная деформация.

Общие деформации пород под нагрузкой характеризуются модулем общей деформации  $E_0$ , который учитывает как упругие, так и остаточные деформации.

Деформация песчаных и глинистых пород оценивается компрессионными свойствами. Под компрессией понимается сжатие породы в условиях невозможности бокового расширения. Такое условие достигается в приборах, называемых одометрами. Компрессионные испытания отражают зависимость пористости от нагрузки. Графически эта зависимость выражается кривой (рис. 17).

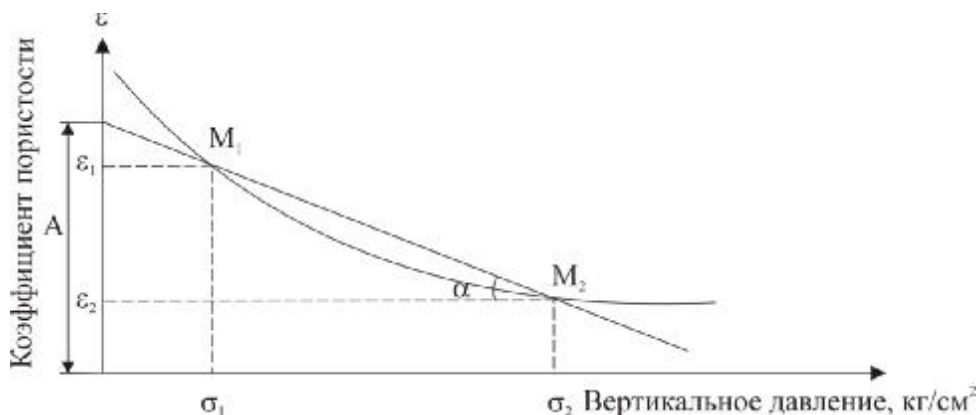


Рис.17. Компрессионная кривая [5]

Степень сжимаемости пород при компрессионных испытаниях обычно



выражают через коэффициент компрессии ( $a$ ), который определяется по графику:

$$a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1}, \text{ см}^2/\text{кг},$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент пористости при давлении  $\sigma_1$ ;  $\varepsilon_2$  – коэффициент пористости при давлении  $\sigma_2$ .

Это уравнение выражает закон уплотнения: при небольших изменениях уплотняющего давления изменение коэффициента пористости прямо пропорционально изменению давления.

По величине компрессии породы разделяют на три группы по степени сжимаемости: сильносжимаемые –  $a > 0,01 \text{ см}^2/\text{кг}$ , среднесжимаемые –  $0,01 > a > 0,001 \text{ см}^2/\text{кг}$ , слабосжимаемые –  $a < 0,001 \text{ см}^2/\text{кг}$ .

Модуль общей деформации можно определить по формуле:

$$E = \frac{1}{a}, \text{ кг/см}^2.$$

По компрессионным испытаниям для оценки сжимаемости пород Н.Н. Маслов предложил определять модуль осадки, под которым понимается уменьшение мощности слоя породы (1 м) под данной нагрузкой:

$$l_0 = 1000 \frac{\Delta h}{h}, \text{ мм/м},$$

где  $l_0$  - модуль осадки под давлением  $\sigma$ ;  $\Delta h$  - уменьшение высоты образца при этой же нагрузке, мм;  $h_0$  - начальная высота образца, мм.

## Лабораторная работа № 5

В разделе «Инженерная петрология» представлены девять лабораторных работ по основам грунтоведения. Результаты работ сводятся в таблицу. Примерные результаты выполнения этих работ, полученные на основе полевых определений классификационных показателей, сведены в табл. 12.

**Задание.** В лабораторию доставлены образцы горных пород, взятые на глубине от 10 до 15 м из инженерно-геологической скважины для изучения физико-механических свойств и уточнения названия породы.

*Цель работы:* научить студентов пользоваться приборами и применять полученные результаты опытов для расчленения исследуемого интервала на инженерно-геологические элементы.

Ход работы:

1. Работы по определению физико-механических свойств выполняются одновременно группами студентов по 2–3 человека. Каждая группа определяет конкретный показатель:

1) гранулометрический состав песчаных пород;

Таблица 12

## Физико-механические показатели пород

Вариант	№ скважины	Гранулометрический состав, %			Естественная влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемная масса во влажном состоянии, г/см <sup>3</sup>	Пределы пластичности, %		Сдвигающее усилие при вертикальных нагрузках, г/см <sup>2</sup>		
		более 0,05 мм	0,05 – 0,005 мм	менее 0,005 мм				верхний	нижний	1	2	3
1	210	18,0	43,0	39,0	30,4	2,76	2,0	69,7	31,9	0,84	2,1	3,15
2	207	17,0	52,3	30,7	27,2	2,74	1,92	39,5	20,2	1,65	1,86	2,5
3	206	10,0	38,5	51,5	25,5	2,73	1,84	41,8	16,7	1,0	2,95	4,05
4	206	3,0	56,0	41,0	27,1	2,74	1,92	52,6	18,7	1,35	1,67	2,25
5	205	7,4	38,6	54,0	25,3	2,74	1,95	53,7	20,4	0,96	2,52	3,55
6	210	9,0	60,0	31,0	25,2	2,73	2,0	43,3	21,0	1,35	2,6	2,9
7	205	11,0	44,0	45,0	24,9	2,72	1,92	45,0	20,8	0,97	2,52	3,5
8	205	4,9	44,6	50,5	24,7	2,73	1,96	45,6	20,4	1,56	3,3	3,75
9	207	20,0	46,0	34,0	26,6	2,77	1,9	37,2	18,1	1,56	1,1	3,35
10	207	11,0	52,0	37,0	28,9	2,69	1,88	43,9	19,1	1,0	2,58	3,0

- 2) пористость рыхлых несвязных пород;
- 3) влажности горных пород;
- 4) пределы пластичности горных пород;
- 5) консистенции глинистых пород методом пенетрации;
- 6) величина и влажность набухания глинистых пород;
- 7) водопроницаемость пород в трубке СПЕЦГЕО;
- 8) компрессионные испытания пород нарушенного строения;
- 9) сопротивление сдвигу песчаных пород.

2. Результаты исследований вносятся в таблицу, аналогичную табл. 12.

Так как в целом получается лишь один вариант данных, то для пополнения таблицы использованы результаты полевых исследований образцов. Поэтому дальнейшие вычисления каждый студент производит самостоятельно.

3. Используя данные этой таблицы, построить возможные графики и определить косвенные и расчетные показатели.

4. Используя Классификацию грунтов [10], дать название породы.

#### 4.1.1. Определение гранулометрического состава песчаных пород

*Цель работы.* Песчаный грунт разделить на фракции ситовым методом [14]. Изобразить гранулометрический состав в виде интегральной кривой, определить коэффициент неоднородности грунта, по треугольнику Фере дать название грунта.

*Ход работы.*

1. Из воздушно-сухой породы отбирают пробу весом около 200 г.

2. Если порода состоит из слипшихся комочков, ее растирают в фарфоровой ступке. Растирать породу нужно осторожно, чтобы избежать разрушения отдельных зерен.

3. Пробу породы взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. Общий ее вес ( $a$ ) записывают в табл. 13.

Таблица 13

Определение гранулометрического состава песчаных грунтов  
ситовым методом

№ п/п	Вес грунта, взятого для анализа, г	Фракция, мм					
		5 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1	0,1
1	100	% содержание					
		2,4	8,2	32,4	48,5	7,3	1,2

4. Просеять взвешенную пробу через колонну сит, начиная с большего диаметра. Просеивание производить путем встряхивания колонны сит в течение 15–20 мин.

Полноту просеивания через каждое сито проверить над листом черной глянцевой бумаги. Для этого каждое сито в отдельности последовательно, на-

чиная с верхнего, встряхивать над листом бумаги, а частицы, прошедшие сито и оказавшиеся на бумаге, перенести на следующее сито. Фракции грунта, задержавшиеся на ситах, перенести поочередно на отдельные для каждой фракции листы черной бумаги. С помощью кисточки (щетки) тщательно очистить отверстия сит от застрявших частиц и присоединить их к просеянным.

5. Взвесить в отдельности каждую фракцию ( $b$ ), задержавшиеся на ситах и прошедшие в поддон, с точностью до 0,01 г.

6. Для контроля сложить веса всех фракций и сумму сравнить с весом пробы грунта, взятой на анализ. Расхождение между этими величинами не должно превышать 1–2 % от веса пробы.

7. Потерю грунта при просеивании разнести по всем фракциям пропорционально их весу.

8. В результате ситового анализа получают следующие фракции:

отверстия сит, мм	фракция, мм
10	>10
5	10 – 5
2	5 – 2
1	2 – 1
0,5	1 – 0,5
0,25	0,5 – 0,25

Фракции менее 0,25 мм остаются на поддоне.

9. Содержание каждой выделенной фракции ( $A$ ) определяется как процентное содержание веса фракции ( $b$ ) к весу воздушно-сухой пробы, взятой для анализа ( $a$ ):

$$A = \frac{b}{a} \cdot 100 \%$$

*Оборудование:* технические весы с разновесами, набор сит.

#### 4.1.2. Определение пористости рыхлых несвязных пород

Для непосредственного определения пористости песков и песчаных пород нарушенного сложения можно применять метод насыщения их водой [15].

*Ход работы:*

1. Взвешивают стеклянный стакан на технических весах, получая вес  $q_1$ .

2. Песок высушивают на воздухе и наполняют им стакан до метки при той плотности, при которой необходимо определить пористость. Получают объем песка  $V$  (см<sup>3</sup>). Стакан с песком взвешивают, получают вес  $q_2$ .

3. Стакан с песком ставят на штатив под бюретку, нижний конец которой погружают в песок так, чтобы он находился на высоте 2–3 мм над дном стакана.

4. Приоткрывая бюретку, песок медленно насыщают водой до появления на его поверхности пленки воды.

5. стакан с песком, насыщенным водой, взвешивают, получают вес  $q_3$ . Увеличение в весе (в граммах) должно быть примерно равно числу кубических сантиметров воды, израсходованных на насыщение песка.

6. Пористость песка определяют по формуле (11), одновременно вычисляют отвечающие этой пористости показатели плотности песка  $\gamma_c$  и  $\gamma$  следующим образом:

$$\gamma_c = \frac{q_2 - q_1}{V}, \text{ г/см}^3; \quad \gamma = \frac{q_2 - q_1}{V}, \text{ г/см}^3.$$

*Оборудование:* стеклянный химический стакан с меткой, обозначающей объем  $V = 200\text{--}500 \text{ см}^3$ ; бюретка, укрепленная на штативе; технические весы.

### 4.1.3. Определение влажности горных пород

*Ход работы:*

1. Бюкс с крышкой взвешивают на технических весах и получают вес  $q_1$ .

2. Берут навеску горной породы не менее 15 г в ранее взвешенную бюксу и взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г, получают вес  $q_2$ .

3. После взвешивания бюксу с приоткрытой крышкой ставят в сушильный шкаф. Высушивание породы производят в течение 4–5 ч. В результате взвешивания получают вес  $q_3$ .

4. Разность веса породы до высушивания и после, отнесенная к весу абсолютно-сухой породы и умноженная на 100, составляет влажность породы в %.

Вычисление влажности производят с точностью до 0,01 % с последующим округлением до 1 % [15]. По влажности породы, ее удельному весу и пористости с помощью номограммы (рис. 18) устанавливают коэффициент насыщения породы водой [19].

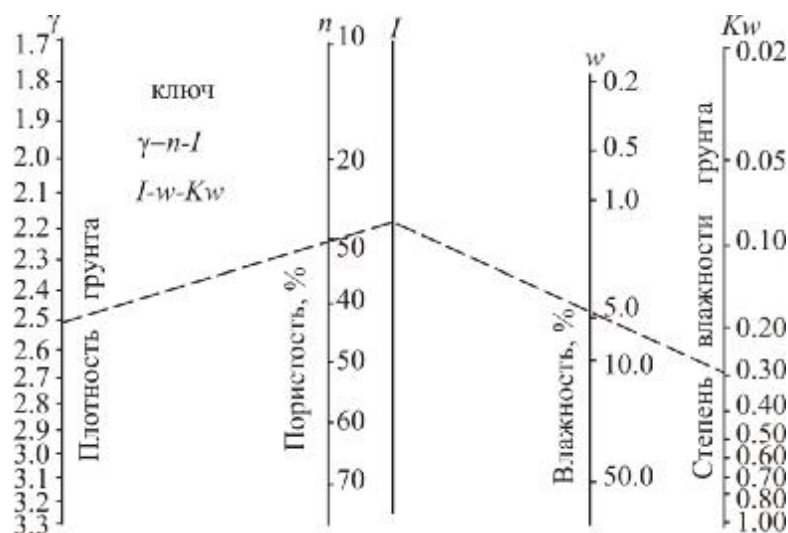


Рис. 18. Номограмма для вычисления насыщения горных пород водой [5]

*Оборудование:* технические весы; бюксы алюминиевые; эксикатор; сушильный шкаф.

#### 4.1.4. Определение пределов пластичности горных пород

*Предел текучести.* Стандартный метод определения предела текучести применяется для мягких нецементированных глинистых пород. Согласно этому методу, за предел текучести принимается влажность глинистой породы нарушенного сложения, при которой специальный балансирный конус весом 76 г под действием собственного веса погружается в нее на 10 мм. В этом случае предельная прочность породы составляет  $0,076 \text{ кг/см}^3$  [15].

*Ход работы:*

1. Образец грунта с естественной влажностью объемом около  $50 \text{ см}^3$  размять шпателем или размельчить резиновым пестиком, а затем протереть или просеять (в зависимости от влажности образца) сквозь сито с отверстиями 0,5 мм.

2. Перенести грунт в фарфоровую чашку и увлажнить ее до состояния густого теста.

3. Увлажненный грунт шпателем перенести в стаканчик диаметром 4 см и высотой 2 см. Грунт уплотнить, поверхность сравнять шпателем вровень с краями стаканчика.

4. конус опустить на поверхность грунта и дать ему свободно погружаться в течение 5 секунд.

5. Если за 5 с конус погрузится в грунт на глубину 10 мм, верхний предел пластичности считать достигнутым.

6. Если конус погружается на большую или меньшую глубину, необходимо подсушить грунт или добавить воду, пока не будет достигнута необходимая консистенция.

7. Когда верхний предел достигнут, взять из стаканчика пробу массой не менее 10 г и определить ее влажность, которая и будет являться верхним пределом пластичности. Взвешивание производить на технических весах с точностью до 0,01 г, вычисления – с точностью до единицы. Результаты опыта занести в журнал.

*Предел пластичности.* Стандартным методом определения предела пластичности глинистых пород является метод раскатывания породы в проволоку. При определении предела пластичности этим методом используют грунтовую массу, оставшуюся после определения предела текучести. Для определения предела пластичности необходимо дополнительно иметь стекло размером 10x15 или 15x20 см.

*Ход работы:*

1. Грунтовую массу доводят до пластичного состояния, переминая в руках и подсушивая на воздухе.

2. Берут часть приготовленной массы и раскатывают ее на стекле диаметром 3 мм. Если проволока покрывается трещинами и крошится на кусочки длиной 3 – 10 мм, то предел пластичности достигнут.

Если из приготовленного грунтового теста невозможно раскатать проволоку диаметром 3 мм (порода рассыпается), то считают, что данная порода не имеет предела пластичности.

Набрав 10 – 15 г крошек-кусочков породы, определяют ее влажность, которая и будет соответствовать пределу ее пластичности.

Число пластичности глинистой породы определяют по разности между влажностями, соответствующими пределу текучести ( $W_T$ ) и пределу пластичности ( $W_p$ ):

$$\mu = W_T - W_p.$$

Результаты испытаний записывают в журнал.

#### **4.1.5. Определение консистенции глинистых пород методом пенетрации**

В зависимости от влажности глинистые породы оказывают различное сопротивление внедрению твердого тела. Метод пенетрации заключается в определении консистенции глинистых пород по временному сопротивлению внедрению металлического конуса (микропенетрометра).

Техническая характеристика микропенетрометра:

Длина – 300 мм;

Диаметр опорной плиты – 50 мм;

Диаметр конуса – 20 мм;

Высота конуса – 25 мм;

Начальное натяжение пружины, кг –  $0,93 \pm 0,02$ ;

Постоянный параметр пружины  $K$ , кгс/см<sup>2</sup> –  $0,65 \pm 0,015$ ;

Максимальная нагрузка на конус  $P_m$ , кг –  $2,55 \pm 0,02$ .

*Ход работы:*

1. На исследуемом образце грунта подготавливается выровненная поверхность.

2. Микропенетромтр прижимается к этой поверхности до тех пор, пока опорная плита прибора не коснется выровненной поверхности. Таким образом, достигается равновесие между внешней нагрузкой и силами реактивного сопротивления грунта.

3. Глубина погружения конуса отсчитывается с помощью круговой риски на движке по миллиметровой шкале с точностью до 0,05 мм. Для получения необходимой точности производится несколько погружений. За искомую величину принимается среднее значение:

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n},$$

где  $h_1, h_2, h_n$  – глубина погружения конуса, см;  $n$  – число определений.

Результаты опробования глинистых грунтов при глубине погружения конуса менее 0,4 см являются малодостоверными. При глубине погружения конуса от 0,4 до 1,2 см точность определения  $h_{\text{ср}}$  должна составлять 0,01 см. При глубинах погружения свыше 1,2 см точность может быть снижена до 0,025 см.

4. По средней глубине погружения конуса рассчитываем временное сопротивление пенетрации (кгс/см<sup>2</sup>):

$$R = \frac{P_m - Kh}{h^2}. \quad (14)$$

Значения  $P_m$  и  $K$  см. в технической характеристике прибора.

5. Зная временное сопротивление пенетрации, можно определить коэффициент консистенции по формуле:

$$B = 0,2 - 0,72 \cdot \lg R.$$

Пример. Средняя глубина погружения конуса микропенетромтра в образец составила 18,5 мм = 1,85 см.

Определяем временное сопротивление по формуле (14):

$$R = \frac{2,55 - 0,65 \cdot 1,85}{1,85^2} = \mathbf{0,39} \text{ кгс/см}^2,$$



$$lgR = lg0,39 = -0,41.$$

Определяем коэффициент консистенции:

$$B = 0,2 + 0,72 \cdot 0,41 = 0,5$$

По коэффициенту консистенции грунт характеризуется тугопластичным состоянием.

*Оборудование:* микропенетrometer, нож.

#### **4.1.6. Определение величины и влажности набухания глинистых пород**

*Ход работы:*

1. Глину, подготовленную к испытаниям, круто замесить до тугопластичной консистенции [12].

2. Взвесить кольцо с насадкой ( $q_1$ ).

3. Заполнить кольцо подготовленным грунтом и надеть насадку.

4. Взвесить кольцо с грунтом и насадкой на технических весах с точностью до 0,01 г ( $q_2$ ).

5. Поставить кольцо с грунтом в углубление перфорированного диска, предварительно поместив туда смоченную водой фильтровальную бумагу, вырезанную по внутреннему диаметру кольца.

6. На поверхность грунта также положить вырезанную по диаметру кольца смоченную фильтровальную бумагу; на фильтр поместить поршень.

7. Скрепить кольцо с перфорированным диском соединительной скобой при помощи двух винтов; собранный прибор поместить в ванночку.

8. Установить индикатор таким образом, чтобы его ножка касалась головки поршня. Записать показания индикатора (табл. 14, графа 9).

9. Залить ванночку водой так, чтобы вода покрывала нижнюю часть кольца, отметить время заливки.

10. Произвести наблюдения за показаниями индикатора. Отсчеты по индикатору берутся через 10, 20, 30 мин; 1, 2, 3, часа от начала опыта, а затем через сутки.

Наблюдения вести до полной стабилизации, которая считается наступившей, если приращение показаний индикатора не превышает 0,02 мм в сутки.

11. Взвесить кольцо с набухшим грунтом и насадкой ( $q_3$ ).

12. Поместить кольцо с грунтом и насадкой в термостат и высушить грунт до постоянного веса.

13. Взвесить кольцо с высушенным грунтом и насадкой ( $q_4$ ).

14. Рассчитать набухание по приросту объема и по влажности набухания. Величина набухания по увеличению объема грунта  $V_{\text{наб.}}$ , выраженная в процентах от начального объема образца, определяется по формуле (13):

$$V_{\text{наб.}} = \frac{m}{h} \cdot 100 \%$$

где  $m$  – приращение высоты образца, мм, берется по числу делений шкалы индикатора, отсчитанному стрелкой за время опыта;  $h$  – начальная высота образца в кольце, мм.

Таблица 14

Журнал определения набухания грунтов

№ п/п	дата	Лабораторный номер образца	Вес кольца и насадки $q_1$ , г	Вес кольца и насадки с грунтом естественной влажности $q_2$ , г	Начальная влажность $W$ , %	Вес кольца и насадки с набухшим грунтом $q_3$ , г	Вес кольца и насадки с высушенным грунтом $q_4$ , г	Начальное показание индикатора $h_{\text{к}}$ , мм	Конечное показание индикатора $h_{\text{н}}$ , мм	Приращение высоты образца $\delta_{\text{н}}$ , мм	Начальная высота образца в кольце $h_{\text{к}}$ , мм	Величина набухания по увеличению объема грунта $H_{\text{н}}$ , %	Влажность набухания $W_{\text{наб.}}$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Естественная влажность грунта рассчитывается по формуле (12):

$$W = \frac{q_2 - q_4}{q_4 - q_1} \cdot 100 \%$$

Влажность  $W_{\text{наб.}}$ , соответствующая предельному набуханию, также рассчитывается по формуле (12):

$$W_{\text{наб.}} = \frac{q_3 - q_4}{q_4 - q_1} \cdot 100 \%$$

Результаты определений записывают в журнал.

*Оборудование:* прибор для набухания ПНГ, фильтры, весы технические, нож.

#### 4.1.7. Определение водопроницаемости пород в трубке СПЕЦГЕО

Прибор, называемый трубкой СПЕЦГЕО (рис. 19), состоит из основной трубки (1), нижней крышки с сеткой (2), верхней крышки (3) и стеклянного мерного цилиндра (4), который снабжен шкалой с ценой деления  $1\text{ см}^3$ .

*Ход работы:*

1. Заполнить трубку (1) испытуемым грунтом.
2. Заполнение трубки производить послойно (по 2 см) под водой для избегания сортировки песка, а также для удаления заземленного воздуха.
3. Заполнить мерный цилиндр водой, перевернуть его над трубкой и укрепить в верхней крышке так, чтобы горлышко его отстояло от поверхности грунта в трубке приблизительно на  $0,5 - 1\text{ мм}$ .

В таком виде мерный цилиндр будет автоматически поддерживать над образцом постоянный уровень воды. Как только вследствие просачивания воды через образец этот уровень понизится, в мерный цилиндр прорвется пузырек воздуха, и соответствующее количество воды из него выйдет.

Этим достигается постоянство градиента, численное значение которого равно единице, так как в данном случае напор равен длине фильтрации.

4. Заметить по шкале уровень воды в мерном цилиндре, пустить секундомер и через определенное время заметить второй уровень.

5. Посчитать коэффициент фильтрации по формуле:

—,

где  $Q$  – объем воды, профильтровавшейся за время  $T$ ,  $\text{см}^3$ ;  $T$  – время фильтрации, с;  $F$  – площадь поперечного сечения трубки,  $\text{см}^2$ .

6. Повторить опыт несколько раз. Данные наблюдений занести в табл. 14 и вычислить среднее значение коэффициента фильтрации.

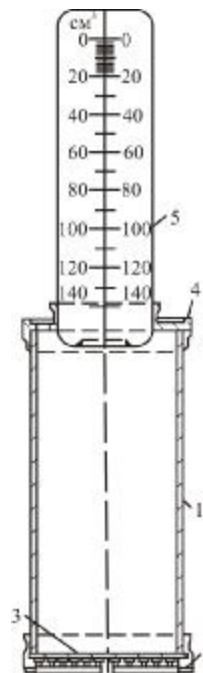


Рис. 19. Трубка СПЕЦГЕО в собранном виде

## Журнал определения коэффициента фильтрации в трубке СПЕЦГЕО

№ опыта	Краткое описание грунта	Время фильтрации T, с	Объем воды Q, см <sup>3</sup>	Коэффициент фильтрации K, см/с	Температура воды, °С

*Оборудование:* трубка СПЕЦГЕО, секундомер.

#### 4.1.8. Компрессионные испытания пород нарушенного строения

Одометр представляет собой прибор для изучения сжатия грунтов при условии отсутствия бокового расширения (рис. 20). Он состоит из двух пористых пластин (1), предназначенных для оттока отжимаемой воды. Нижняя пластина представляет собой жесткое основание с резервуаром для поглощения и оттока воды. Верхняя пластина – это подвижный поршень, перемещающийся под внешней нагрузкой в жесткой обойме, которая крепится с нижней пластиной винтами (2). В обойме есть специальное отверстие для установления индикатора, измеряющего изменение высоты образца под нагрузкой в определенный момент времени.

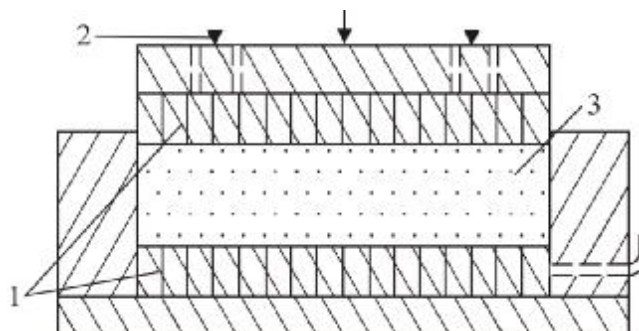


Рис. 20. Схема устройства одометра

Между пористыми пластинами устанавливается жесткая металлическая обойма с грунтом (3), на который через поршень подается внешняя нагрузка.

Используя специальные приспособления, в одометре можно производить испытания образцов, как с естественной влажностью, так и смоченных [11].

Полученные данные о деформациях образца грунта при различных ступенях нагрузки наносят на график, получая кривую сжатия или компрессионную кривую.

Подготовка прибора и образца.

1. Перед началом опыта определяем пористость песка объемным способом. В сосуд известной емкости (например, 200 см<sup>3</sup>) насыпаем песок и нали-

ваем воду до тех пор, пока песок не покроется тонкой пленкой воды. Израсходованный объем воды количественно определяет объем пор (например, 50 см<sup>3</sup>). Отношение объема пор ( $V_1$ ) к объему всей породы ( $V_2$ ) определяет пористость ( $n$ ). Коэффициент пористости определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{n}{1-n} \cdot 100 \%$$

2. Готовим прибор к работе:

- нижнюю пористую пластинку крепим штативом к столу и укладываем на нее фильтр;
- устанавливаем металлическую обойму с грунтом, который сверху накрываем фильтром;
- опускаем на грунт верхнюю пористую пластинку, зажатую в верхней обойме так, чтобы от нее не передавалось давление на грунт;
- соединяем части одометра арретирными винтами;
- устанавливаем на поршень индикатор и балансирные рычаги.

*Ход работы:*

1. Уравновешиваем рычаги так, чтобы их вес не передавался через поршень на грунт.

2. Нормальные нагрузки прикладываем ступенями. Ступени нагрузок выбираются такими, чтобы величина последующей нагрузки была не более чем в 2 раза больше предыдущей. При этом первые ступени нагрузки должны быть небольшими, чтобы можно было уловить предел структурной прочности грунта при компрессионном сжатии. Для слабых грунтов рекомендуются следующие ступени: 0,02; 0,03; 0,05; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 кг/см<sup>2</sup>. Для более плотных и прочных грунтов рекомендуются следующие ступени: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0 кг/см<sup>2</sup>.

3. Каждую степень выдерживаем до условной стабилизации деформации. После приложения каждой ступени нагрузки снимаются отсчеты показателей индикатора через 5, 10, 20, 30 мин; через 1, 2, 3, 6 часов.

4. Обрабатываем результаты испытаний в два этапа. Первый этап проводится в процессе опыта. Он заключается в построении кривой, отражающей ход осадки во времени под каждой ступенью нагрузки в виде зависимости

$$\varepsilon_{1,2,3} = f(t, \sigma).$$

Для каждой ступени нагрузки рассчитываем коэффициент пористости по формуле:

$$\varepsilon_{1,2,3} = \varepsilon_0 - \frac{\Delta h}{h} (1 + \varepsilon_0),$$

где  $\varepsilon_{1,2,3}$  – коэффициенты пористости, соответствующие нагрузкам  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ;  $\varepsilon_0$  – начальный коэффициент пористости;  $\Delta h$  – величина уменьшения высоты

образца;  $h$  – первоначальная высота образца.

На втором этапе обработки результатов определяются параметры компрессионных свойств грунта: коэффициент сжимаемости ( $a$ ) определяется на малом спрямленном участке компрессионной кривой. Тангенс угла наклона этого участка кривой характеризует сжимаемость породы на данном участке давления:

$$a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1}, \text{ см}^2/\text{кгс}.$$

При нагрузке от 0,5 до 5 кг/см<sup>2</sup> на песчаные и глинистые грунты если коэффициент сжимаемости  $a \approx 0,001$  см<sup>2</sup>/кгс, грунт оценивается как малосжимаемый, при  $a \approx 0,01$  см<sup>2</sup>/кгс – среднесжимаемый, при  $a \geq 0,1$  см<sup>2</sup>/кгс – чрезмерносжимаемый.

Модуль общей деформации определяется из равенства:

$$M_0 = \frac{1 + \varepsilon_k}{a},$$

где  $\varepsilon_k$  – коэффициент пористости, соответствующий конечной нагрузке;  $a$  – коэффициент уплотнения, кгс/см<sup>2</sup>.

*Оборудование:* компрессионный прибор КПр1; набор пропорциональных грузов; индикатор – микрометр.

#### 4.1.9. Определение сопротивления сдвигу песчаных пород

Сопротивление сдвигу песчаных пород в основном зависит от трения, возникающего при перемещении одних зерен относительно других, и сопротивления, связанного с раздроблением минеральных зерен.

Сдвиговый прибор состоит из двух поставленных друг на друга цилиндров, из которых нижний закреплен неподвижно (рис. 21), а верхний может свободно перемещаться в горизонтальной плоскости АБ под действием горизонтального усилия  $S$ , прилагаемого через систему рычагов. Вес подвесок на рычаг приведен в табл. 15.

Нормальное давление  $\sigma$  передается на образец через поршень. При некотором значении силы  $S$  верхний цилиндр вместе с песком придет в движение вдоль плоскости АБ. В этот момент сила  $S$  будет превышать силу  $\tau$ , которая направлена в противоположную сторону и оказывает сопротивление сдвигу. Сила  $\tau$  называется силой трения.

Сопротивление сдвигу грунтов определяют односрезным прибором ПСГ-3М на образцах цилиндрической формы диаметром 56 мм и высотой 20 мм, отобранных компрессионными гильзами [11].

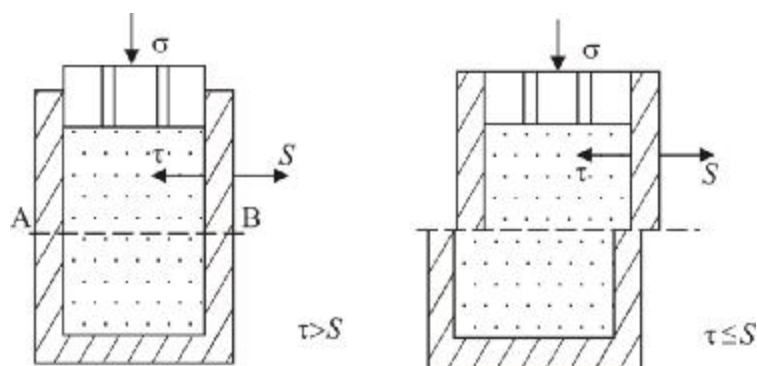


Рис. 21. Схема сдвигового прибора

Таблица 15

Характеристика подвесок на рычаг

Высота подвески $h$ , мм	Вес подвески $P$ , кг
22,4	0,5
9,8	0,2
4,9	0,1

Если проделать опыт с несколькими образцами одного и того же песка при разных значениях нормальных давлений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , то получим соответствующие им значения  $S_1, S_2, S_3$ , а, следовательно, и значения силы трения.

*Ход работы.* Сопротивление сдвигу песчаных грунтов определяется для образцов нарушенной структуры в воздушно-сухом или увлажненном состоянии. Деформация сжатия и сдвига образца грунта измеряется индикаторами с точностью до 0,01 мм. Результаты измерений сопротивления сдвигу выражают в  $\text{кгс/см}^2$  с точностью до двух десятичных знаков.

При помощи крепежного устройства прикрепляют нижнюю часть прибора. Горизонтальные упорные винты завинчивают до отказа. Грунт из гильзы направляющим устройством перемещают в прибор. По верхней и нижней плоскостям образца грунта предварительно прокладывают листы фильтровальной бумаги.

Помещенный в прибор грунт плотно прижимают поршнем, находящимся в верхней части прибора. Поршень закрепляют винтом.

В соответствующих гнездах закрепляют два индикатора: один – для замера деформации сжатия, другой – для деформации сдвига. Укрепляют телескопический рычаг для вертикальной нагрузки и рычаг для горизонтальной нагрузки. Уравновешивают телескопический рычаг и отпускают тормозной винт поршня. Величину ступени вертикальной нагрузки принимают  $0,2 \text{ кг/см}^2$  и выдерживают нагрузку в течение 5 мин. Конечную ступень нагрузки выдерживают до условий стабилизации деформации сжатия (~ 30 мин).

После достижения условной стабилизации вертикальной деформации образца отвинчивают горизонтальные упорные винты каретки и приступают к горизонтальному нагружению образца.

Горизонтальную нагрузку прикладывают ступенями. Величина нагрузки в первой стадии составляет  $0,2 - 0,5 \text{ кг/см}^2$ , во второй –  $0,05 - 0,1 \text{ кг/см}^2$ . Каждую ступень нагрузки выдерживают до условной стабилизации деформации сдвига, не превышающую  $0,01 \text{ мм}$  в минуту.

За сдвигающую принимают нагрузку, при которой по показаниям индикатора кончается резкое нарастание нестабилизирующейся деформации сдвига.

Масса рычага с подвеской для горизонтальной нагрузки в процессе испытания на сдвиг создает дополнительное сдвигающее усилие, равное  $0,11 \text{ кгс/см}^2$ , которое следует прибавлять при подсчете сдвигающей нагрузки.

Для каждой исследуемой точки надо испытывать по три образца грунта при разных вертикальных нагрузках (например,  $1, 2, 3 \text{ кг/см}^2$ ). Данные испытаний представляются в виде графика (рис. 22). На горизонтальной оси откладываются нормальные нагрузки, на вертикальной – соответствующие сдвигающие усилия.

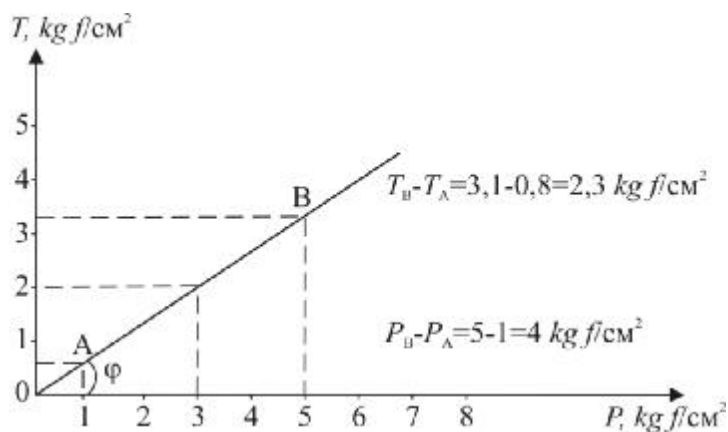


Рис. 22. Определение сопротивления сдвигу песчаных пород

По графику определяются:

1. Угол внутреннего трения – угол наклона прямой к линии нагрузки;
2. Коэффициент внутреннего трения ( $f$ ) – тангенс угла  $\varphi$ . Вычисление коэффициента внутреннего трения производится по формуле:

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\tau_B - \tau_A}{\sigma_B - \sigma_A},$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Оборудование: сдвиговый ПСГ-3М, набор компрессионных гильз.



## 4.2. Расчет устойчивого профиля откоса

Устойчивость склонов и откосов зависит от многих факторов: геологического строения, литологического состава пород, их физико-механических свойств, нормальной нагрузки, крутизны склона.

Из табл.16 видно, что рассматриваемый склон крутизной  $21^{\circ}$  и более имеет коэффициент устойчивости меньше единицы, следовательно, он неустойчив, и надо ожидать развития оползневых явлений.

Природные склоны всегда стремятся к выполаживанию, к крутизне, соответствующей углу естественного откоса слагающих их пород, т.е. такой наибольшей крутизне, при которой они находятся в устойчивом состоянии: не оползают, не осыпаются и т.д. Если такие склоны будут подмываться рекой или морем, подрезаться откосом выемки или подрабатываться карьером, крутизна их будет увеличиваться, а устойчивость снижаться. Точно так же при возведении земляных сооружений (дамб, насыпей, плотин и др.): если крутизна откосов будет больше допустимой для слагающих их пород, неизбежно нарушение их устойчивости. Следовательно, увеличение крутизны склона или откоса под влиянием естественных или искусственных факторов при прочих равных условиях может стать причиной нарушения устойчивости пород, их слагающих, так как при этом возрастает относительная величина сдвигающих или скалывающих усилий [16].

Таблица 16  
Изменение устойчивости склона в зависимости от его крутизны

Угол наклона $\alpha$	Заложение	Коэффициент устойчивости
$45^{\circ}$	1 : 1	$\eta_{45}^0 = 0,35$
$36^{\circ}40'$	1 : 1,5	$\eta_{36}^0 = 0,53$
$26^{\circ}33'$	1 : 2	$\eta_{26}^0 = 0,72$
$21^{\circ}48'$	1 : 2,5	$\eta_{21}^0 = 0,91$
$18^{\circ}25'$	1 : 3	$\eta_{18}^0 = 1,11$
$11^{\circ}20'$	1 : 5	$\eta_{11}^0 = 1,96$

При предварительной оценке устойчивость склонов должна проверяться по сопоставлению угла наклона  $\alpha$  с углом естественного откоса, углом внутреннего трения, углом сдвига пород их слагающих. Предельно устойчивый откос должен характеризоваться соотношением

$$\alpha = \psi,$$

где  $\psi$  – угол сдвига,  $\alpha$  – угол естественного откоса.

Угол сдвига зависит от нормального давления, сцепления и угла внутреннего трения. Для того чтобы произошел сдвиг в глинистых породах, необходимо дополнительное усилие для преодоления сил сцепления (см.рис.16).

Сопротивление сдвигу глинистых пород вследствие этого выражается зависимостью

Угол  $\varphi$  здесь также является углом внутреннего трения, а тангенс этого угла коэффициентом внутреннего трения. Если на прямой сдвига глинистых пород выделить точки, соответствующие нагрузке  $\sigma_{1,2,3}$  и сдвигу  $\tau_{1,2,3}$  и соединить их с началом координат, получим прямые линии, угол наклона которых к оси абсцисс называется углом сдвига  $\psi$ , а тангенс этого угла – коэффициентом сдвига:

Последние два показателя характеризуют общее сопротивление сдвигу глинистой породы при данном ее физическом состоянии и при данном нормальном давлении [8].

Из приведенного графика видно, что высота откоса, сложенного глинистыми породами, находится в прямой зависимости от угла сдвига. Чем больше высота откоса, тем меньше должен быть угол сдвига.

При создании искусственных земляных сооружений: дамб плотин, насыпей, гидроотвалов и т.д., устойчивость откосов определяет надежность и долговечность сооружений. Если откос сложен рыхлой сыпучей породой, например песком, то устойчивость его зависит лишь от угла откоса и не зависит от его высоты. Устойчивость откоса определяется согласно закону Кулона углом трения породы самой по себе. Если силу тяжести некоторого объема грунта ( $q$ ), находящегося на наклонной плоскости, разложим на две составляющие:  $N$ , направленную нормально к наклонной плоскости, и  $T$ , направленную параллельно плоскости вниз по склону (рис. 23), и угол  $\alpha$ , образуемый наклонной плоскостью с горизонтом, то:

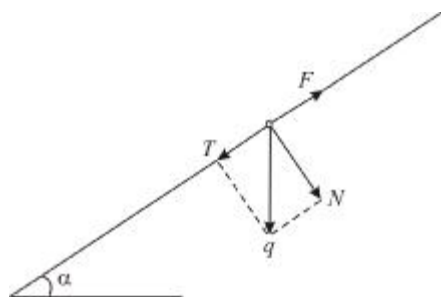


Рис. 23. Условия устойчивости песчаного откоса

, а  
откуда  
или

Для движения частиц вниз по склону сила  $T$  должна преодолеть сопротивление трения  $F$ , зависящего от коэффициента внутреннего трения породы  $\operatorname{tg}\varphi$ :

Предельным условием равновесия некоторой массы на склоне будет:

$$T = F \text{ или } N \cdot \operatorname{tg} \alpha = N \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

что возможно при равенстве углов  $\varphi$  и  $\alpha$ .

Таким образом, устойчивость песчаного откоса обеспечена, если угол откоса  $\alpha$  будет равен или меньше угла внутреннего трения  $\varphi$ . Для рыхлых песков угол естественного откоса обычно лежит около  $30^{\circ}$ . Всякая попытка насыпать откос большей крутизны приведет к смещению откоса до присущего ему угла.

Для откосов, сложенного грунтами, обладающими сцеплением, устойчивость откоса зависит не только от величины трения, но также и от силы сцепления. Устойчивость откоса в этом случае будет находиться в зависимости от угла его и от высоты откоса. Высота откоса определяется по формуле

$$h = \frac{C \cdot \sin \alpha \cdot C \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}},$$

где  $C$  – сила сцепления,  $\alpha$  – угол откоса,  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы,  $\gamma$  – объемный вес породы,  $h$  – высота откоса.

Величины сцепления, трения и объемного веса находятся опытным путем в лаборатории или в полевых условиях. Таким образом, располагая данными указанных свойств грунта, можно определить допустимую высоту откоса при заданном угле откоса.

### Лабораторная работа № 6

**Задание.** В геологическом разрезе высотой 15 м, сложенном глинистыми породами, через 6 м выделены три слоя с соответствующими характеристиками объемного веса ( $\gamma$ , кг/см<sup>3</sup>), угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) и сил сцепления ( $C$ , кг/см<sup>2</sup>) (табл. 17). Определить очертание устойчивого откоса с учетом нормального уплотняющего давления от собственного веса пород  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , если угол естественного откоса равен  $21^{\circ}42'$ . Рассчитать коэффициент устойчивости.

Таблица 17

Основные характеристики грунта

h	$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	$C$ , кг/см <sup>2</sup>	$F_p$	$\varphi$	$\psi$	$\square$ , кг/см <sup>3</sup>
15		0,2		$16^{\circ}26'$		0,002
9		0,2		$18^{\circ}30'$		0,002
3		0,2		$22^{\circ}03'$		0,002

Рекомендации к решению задачи.

1. Определить для каждого выделенного слоя нормальное уплотняющее давление от собственного веса:

$$\sigma = \gamma h, \text{ кг/см}^2$$

2. По формуле

$$F_p = \text{tg}\varphi + \frac{c}{\sigma}$$

рассчитать коэффициент сдвига и определить угол сдвига.

3. В масштабе 1:300 построить естественное очертание откоса с углом естественного откоса  $21^{\circ}42'$ .

4. Для каждого выделенного слоя отложить углы сдвига и построить устойчивый профиль откоса.

5. По формуле

$$\eta = \text{tg}\frac{\psi}{\alpha}.$$

рассчитать коэффициент устойчивого откоса

## Раздел 5. Инженерная геодинамика

### 5.1. Характеристика инженерно-геологических явлений в долине реки (на примере оползней)

По классификации Ф.П. Саваренского оползни относятся к гравитационным процессам. *Оползнем* называется масса горных пород, сползающая или сползающая вниз по склону под влиянием силы тяжести, гидродинамического давления, сейсмических процессов и др. Оползневые явления всегда сопровождаются изменением рельефа местности, ее геологического строения. Место выхода кривой смещения к подножью склона называется подошвой оползня. Подошва оползня чаще всего совпадает с подошвой склона, но иногда кривая смещения уходит глубже поверхности земли у подножья склона и выходит дальше его, приподнимаясь вверх (рис. 24).

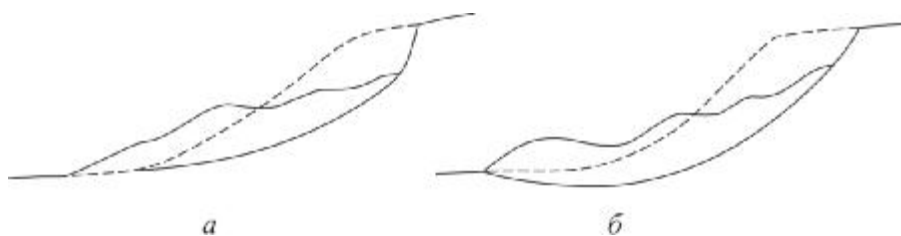


Рис. 24. Оползень с подошвой в основании склона (а) и оползень с кривой, уходящей ниже подошвы склона (б)

Образованию оползня предшествует возникновение трещин, различно расположенных на участке и в теле оползня. В верхней части оползня расположены трещины отрыва (рис. 25). Вдоль бортов образуются трещины скалывания, у основания – трещины сдвига, ориентированные параллельно склону.

Иногда оползнию сопутствует выпирание грунта перед оползнем в виде валов и бугров, в некоторых случаях значительных размеров.

Оползневые цирки имеют характерное строение, отражающееся в плане в горизонталях. Плавные горизонтали склона в пределах оползня искривляются, сближаясь у бровки в месте отрыва оползня у подошвы [18].

Особенностью оползневых участков являются водопрооявления в виде источников со значительным дебитом.

Важным признаком оползневых явлений являются различные деформации сооружений, расположенных на оползне или в зоне их действия. Деформации проявляются различно: в переносе и смещении зданий, оград, полотна дорог, рабочих и транспортных площадок на бортах карьеров и т.д [7].

Морфологические особенности оползневых участков весьма характерны. Оползни резко выделяются в рельефе (рис. 26). Степень выраженности

всех этих особенностей зависит от возраста оползня, стадии его развития, активности динамики сползания.

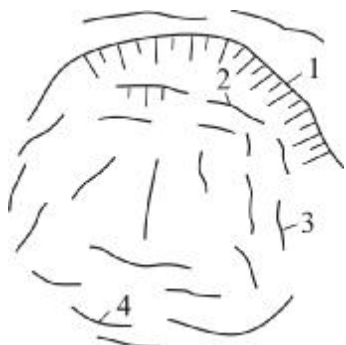


Рис. 25. Расположение наиболее характерных трещин на оползневом участке:

1 – главный уступ по трещине отрыва; 2 – трещины растяжения (отрыва) у вершины оползня; 3 – трещины сдвига (скалывания) вдоль борта и по оси оползня; 4 – трещины сдвига (скалывания) у подошвы оползня

Образование оползня заключается не только в формировании оползневого рельефа, но и в изменениях внутреннего строения склона или откоса. Эти изменения создают определенное строение (структуру) оползня, которое обуславливается геологическим строением склона или откоса, положением и формой поверхности или поверхностей скольжения, по которым происходит смещение масс горных пород. В соответствии с этим Ф.П. Саваренский предложил подразделять на асеквентные, консеквентные и инсеквентные (рис. 27).

Асеквентные оползни образуются в однородных неслоистых породах. Поверхность скольжения вогнутая, близкая к круглоцилиндрической.

У консеквентных оползней поверхность скольжения предопределяется строением склона или откоса, существующими поверхностями раздела сплошности (моноклиальная наклонная поверхность напластования пород, наклонные слои или прослойки слабых пород – глины, аргиллитов, угля и т.д.) поверхность трещин, мерзлых пород и т.д. Форма поверхности скольжения плоская, волнистая, наклонно-ступенчатая.

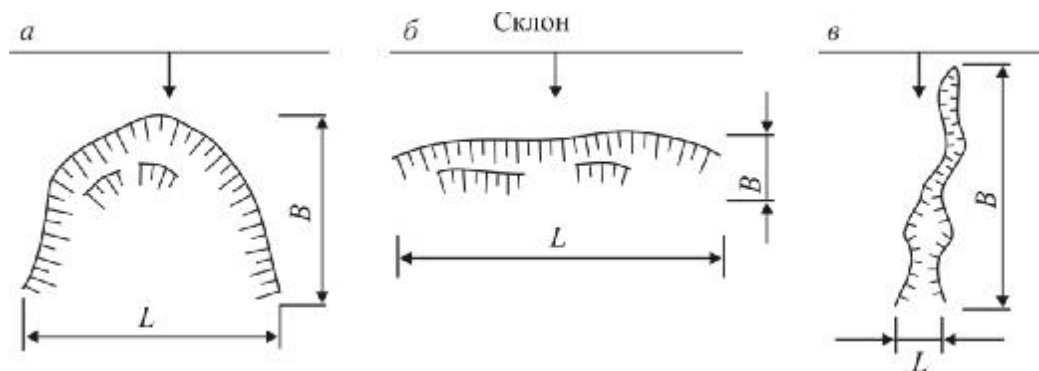


Рис. 26. Форма очертаний оползней в плане:

*a* – циркообразный; *б* – фронтальный; *в* – оползень-поток – глетчEROобразный

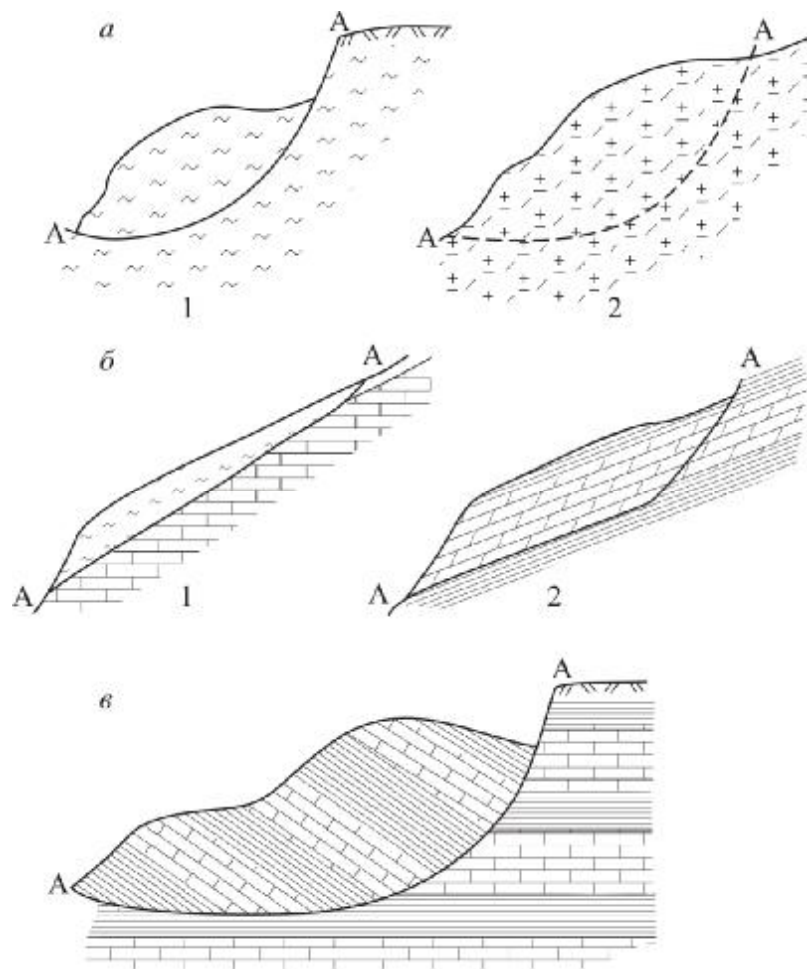


Рис. 27. Схемы характерных типов строения (структуры) оползней [3]:  
*a* – асеквентный: 1 – в однородных глинистых породах, 2 – в трещиноватых твердых породах;  
*б* – консеквентный: 1 – дельювия по коренным породам, 2 – в моноклинально наклонных слоистых породах;  
*в* – инсеквентный

*Инсеквентные оползни* располагаются вкрест простирания пород, образуются в породах неоднородных слоистых. Оползневое смещение масс возможно только тогда, когда сдвигающая составляющая превысит прочность пород в целом, т.е. когда будет нарушена предельная устойчивость пород:

$$\sum T = f \sum N + CL,$$

где  $\sum T$  – суммарная составляющая силы тяжести  $P$ , стремящаяся сдвигать массы горных пород;  $f$  – коэффициент внутреннего трения пород по поверхности;  $C$  – силы сцепления пород по поверхности;  $L$  – длина существующей поверхности скольжения.

Устойчивость оползневого склона определяется коэффициентом устойчивости  $n$ :

$$n = \frac{f\Sigma N + CL}{\Sigma T}.$$

При  $n < 1$  происходит сползание склона.

Причины, вызывающие оползневой процесс, следующие:

1. Увеличение крутизны склона или откоса при их подрезке, а также при придании откосам большей крутизны;
2. Ослабление прочности пород вследствие изменения их физического состояния при увлажнении, набухании, разуплотнении, выветривании, нарушении естественного сложения и т.д.;
3. Действие гидростатических и гидродинамических сил на породы, вызывающих развитие фильтрационных деформаций (суффозию, выпор, переход в плавунное состояние и др.);
4. Изменение напряженного состояния горных пород в зоне формирования склона и строительстве откосов;
5. Внешнее воздействие – загрузка склона или откоса, а также участков, прилегающих к их бровкам, микросейсмические и сейсмические колебания.

Инженерно-геологическая оценка оползневого склона должна быть комплексной, учитывать все условия и причины образования оползня. При оценке устойчивости оползней рассматриваются следующие вопросы:

1. морфология слагающих горных пород, их физико-механические свойства, динамика оползневого процесса;
2. соотношения усилий сдвигающих и удерживающих, определяющих равновесие горных масс, слагающих оползень.

В основе расчетных методов оценки устойчивости оползней лежит учение соотношения сдвигающих и удерживающих сил, действующих на оползень:

$$n = \frac{\Sigma_{\text{удерж.}}}{\Sigma_{\text{сдвиг.}}}$$

Чрезвычайно важно определить, захватывают ли оползни только покровные отложения (обычно четвертичного возраста) или также и дочетвертичные отложения.

При этом следует руководствоваться классификацией морфологии оползневых районов Е.П. Емельяновой, согласно которой выделяются: 1) единичные оползни; 2) области линейного распространения оползней (по берегам морей, крупных рек, озер, водохранилищ, вдоль дорог и п.т.), среди которых можно выделить: а) оползни, чередующиеся с устойчивыми участками склона; б) почти сплошь оползневой склон; 3) области площадного развития оползней (по разветвленной эрозионной сети), куда входят: а) оползни редкие; б) оползни, встречающиеся часто.

Следует различать следующие градации оползней по возрасту: *древние*, – обычно крупные оползневые тела, размещенные в циркообразных депресси-



ях с характерным холмисто-грядовым рельефом, и *современные* (активные или приостановившиеся) относительно меньших размеров, нередко развивающиеся в пределах древних оползневых тел.

### Лабораторная работа № 7

**Задание.** На предлагаемой схеме строения склона долины реки показаны некоторые явления, относящиеся к эрозионным процессам (рис. 28). Изучая рельеф склона и схематические поперечные разрезы (рис. 29), провести границы оползневого склона. Охарактеризовать методику исследований. Для описания состава пород, участвующих в оползневом процессе, использовать характеристику физико-механических свойств пород (табл. 18).

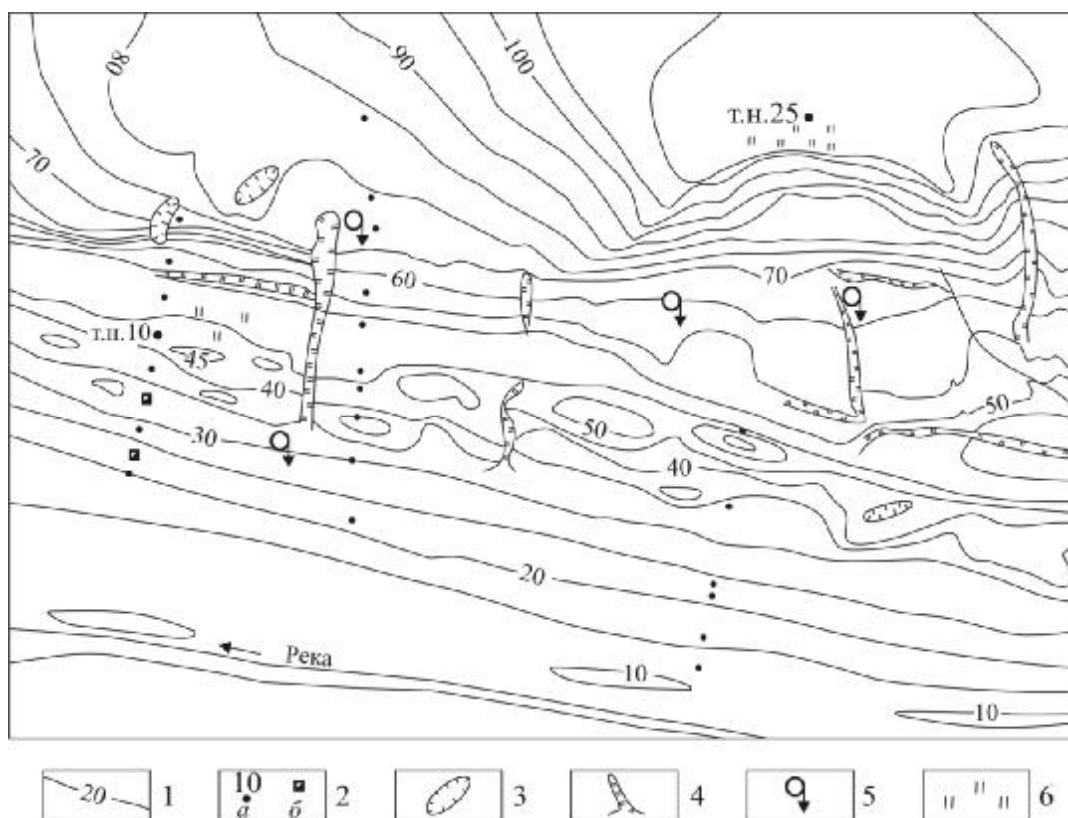


Рис. 28. Схема оползневых процессов в долине реки:

1 – горизонтали рельефа; 2 – точки инженерно-геологических наблюдений (т.н.): а – скважины, б – закопущки; 3 – суффозионные воронки (западины); 4 – эрозионные долины (оползни-потоки); 5 – родники; 6 – мочажины.

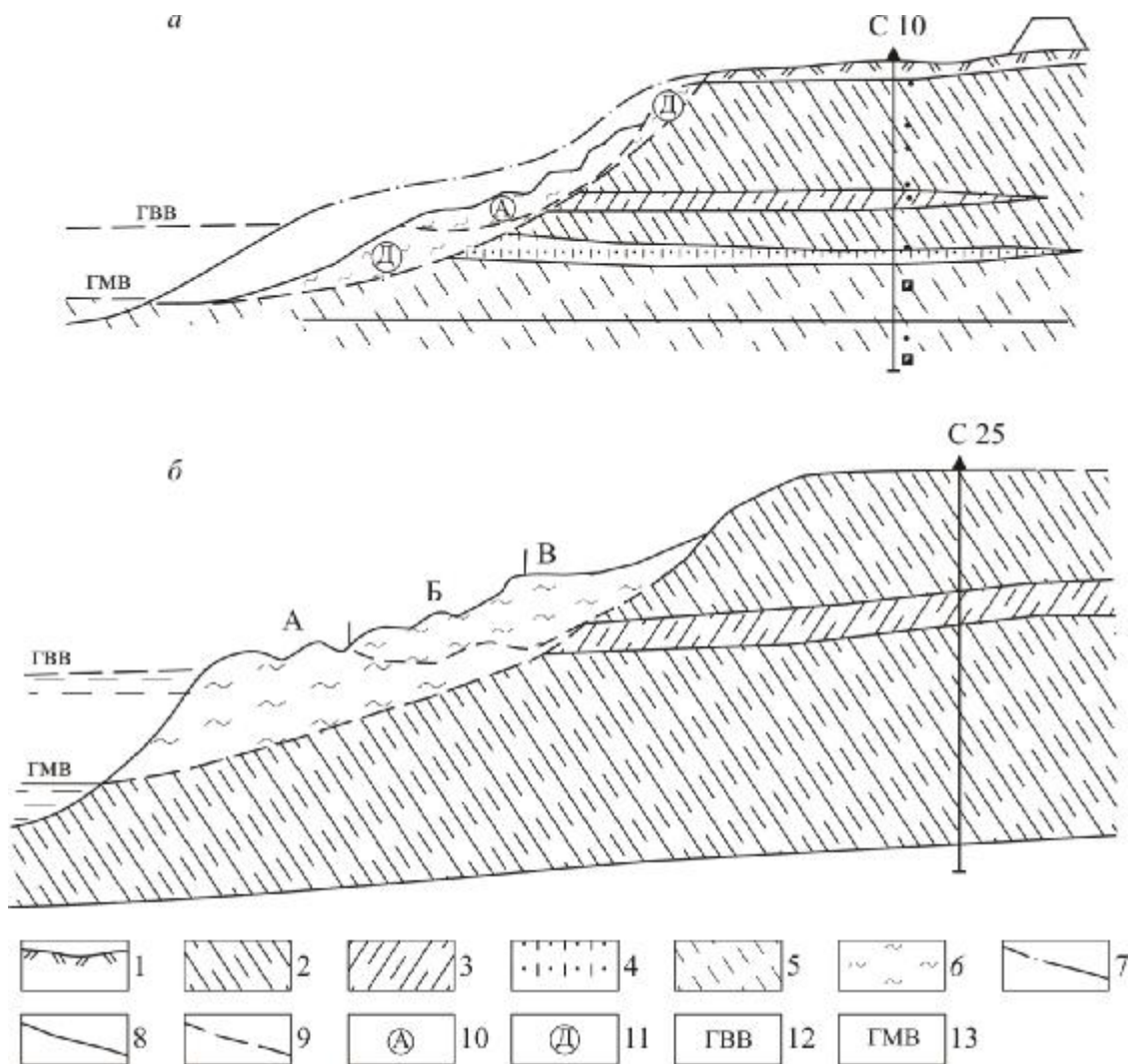


Рис. 29. Схематические поперечные разрезы:  
 железнодорожные насыпи: А – полностью разрушенная, Б – частично разрушенная, В – действующая; 1 – почвенно-растительный слой; 2 – суглинок полутвердый; 3 – суглинок тугопластичный; 4 – суглинок мягкопластичный; 5 – супесь пластичная; 6 – оползневые накопления; 7 – рельеф топографической поверхности до сползания массы грунтов; 8 – рельеф оползневой поверхности; 9 – предполагаемые поверхности скольжения; 10 – активные оползни; 11 – старые оползни; 12 – горизонт высоких вод; 13 – горизонт меженных вод

Таблица 18

## Показатели физико-механических свойств грунтов

Возраст и генезис	Номер слоя	Наименование грунтов	Естественная влажность, %	Число пластичности	Консистенция	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Степень сжимаемости, S <sub>r</sub>	Удельное сцепление C <sub>2</sub> , кгс/см <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения φ, град.
alQ <sub>II</sub>	2	Суглинок полутвердый	22,0	13	0,05	2,71	2,02	0,93	0,71	30
	3	Суглинок тугопластичный	26,0	13	0,38	2,7	1,98	0,98	0,44	27
	4	Суглинок мягкопластичный	29,0	13	0,63	2,69	1,92	0,94	0,28	16
	5	Супесь твердая	16,0	4	< 0	2,67	1,92	0,7	0,16	28
	6	Супесь пластичная	26,0	6	0,82	2,68	1,98	0,99	0,12	23
alQ <sub>IV</sub>	7	Песок мелкий	-	-	-	-	-	-	2	32
tQ <sub>IV</sub>	1	Песок пылеватый (отходы производства – зола)	113	-	-	2,2	1,14	0,42	11	30

Описание оползня должно включать:

1. характеристику рельефа и крутизны склона;
2. тип оползня и примерную ее высоту;
3. очертание оползня в плане;
4. выделение части склона, охваченного оползнем (нижняя, средняя или верхняя);
5. морфологическую характеристику оползневого склона;
6. описание состава пород, участвующих в оползневом процессе, характеристику физико-механических свойств пород.

## Список литературы

### Основная литература

1. Бондарик, Г. К. Инженерно-геологические изыскания: учебник / Г. К. Бондарик, В. В. Пендин, Л. А. Ярг. – М. : КДУ, 2008 – 424 с.
2. Всевожский, В. А. Основы гидрогеологии: учебник / В. А. Всевожский. – М. : МГУ, 2007. – 448 с.
3. Гавич, И.К. Сборник задач по общей гидрогеологии / И. К. Гавич, А. А. Лучшева, С. М. Семенова-Ерофеева. – М. : Недра, 1985. – 412 с.
4. Гордеев, П. Б., Руководство к практическим занятиям по гидрогеологии / П. Б. Гордеев, В. А. Шемелина, О.К. Шулякова. – М. : Высшая школа, 1981. – 150 с.
5. Ломтадзе, В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород / В. Д. Ломтадзе. – М. : Недра, 1972. – 312 с.
6. Мироненко, В. А. Динамика подземных вод: учебник для ВУЗов / В. А. Мироненко. – М. : МГУ, 2001. – 509 с.
7. Трофимов, В.Т. Инженерная геодинамика (инженерная геология) / В.Т. Трофимов. – М. : МГУ, 2005. – 1024 с.
8. Чаповский, Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / Е. Г. Чаповский. – М. : Недра, 1975. – 304 с.

### Дополнительная литература

9. Бирюков, Н. С. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов / Н. С. Бирюков. – М.: Недра, 1975. – 174 с.
10. ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация [Текст]. Введ. 1996-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 22 с.
11. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Текст]. Введ. 1997-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 30 с.
12. ГОСТ 24143-80 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки [Текст]. Введ. 1981-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 20 с.
13. ГОСТ 25584-90 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации [Текст]. Введ. 1990-01-09. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.
14. ГОСТ 12536-79 Методы лабораторного определения зернового (гранулометрического) состава [Текст]. Введ. 1980-01-07. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 19 с.
15. ГОСТ 5180-84 Методы лабораторного определения физических характеристик [Текст]. Введ. 1985-01-07. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 21 с.

16. Панюков, П. Н. Инженерная геология / П. Н. Панюков. – М. : Недра, 1978. – 295 с.
17. Пиннекер, Е. В. Проблемы региональной геологии (закономерности распространения и формирования подземных вод) / Е. В. Пиннекер. - М. : Наука, 1977. – 195 с.
18. Сергеев, Е.М. Инженерная геология / Е.М. Сергеев. – М. : МГУ, 1982. – 389 с.
19. Справочник по инженерной геологии / Под ред. И. В. Чурикова. – М. : Недра, 1981 – 325 с.
20. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В. М. Максимова. – Л. : Недра, 1979. – 512 с.