

*На правах рукописи*

**КОРОБАНОВА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА**



**ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ ФОСФОГИПСА НА  
ГЛИНИСТОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная  
и нефтегазопромысловая геология, геофизика,  
маркшейдерское дело и геометрия недр*

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2018**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

*Научный руководитель –*  
доктор технических наук

*Кутепова Надежда Андреевна*

*Официальные оппоненты:*

*Мосейкин Владимир Васильевич*  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра геологии и маркшейдерского дела, профессор

*Шнаков Петр Сергеевич*

доктор технических наук, профессор, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», кафедра автоматизированного проектирования машин и технологических процессов, профессор

*Ведущая организация –* ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу»

Защита диссертации состоится 19 декабря 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru)  
Автореферат разослан 19 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



СКАЧКОВА  
Мария Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Разработка месторождений полезных ископаемых и последующая переработка минерального сырья предопределяет неизбежное образование отходов, часть из которых является полезным продуктом и может быть использована для хозяйственных нужд. Так, при производстве экстрактной фосфорной кислоты (ЭФК) из апатитов и фосфоритов образуется попутный продукт – фосфогипс. При получении одной тонны ЭФК образуется 4-5 т гипса, а при ежегодном мировом объеме её производства 35-37 млн. т попутно возникает 180 млн. т фосфогипса. Востребованность фосфогипса как минерального ресурса составляет не более 5% от получаемых объемов, практически весь он направляется на длительное хранение в отвальное хозяйство.

Крупнейшие российские производители ЭФК расположены в Московской, Ленинградской, Вологодской, Саратовской областях, Краснодарском крае. Интенсификация производства с каждым годом обостряет проблему размещения фосфогипса, т.к. расширение объектов хранения продукции химической промышленности вблизи крупных городов ограничено отсутствием доступных площадей, ужесточением природоохранных требований. Рациональное решение проблемы состоит в увеличении отвалоёмкости имеющихся сооружений за счет наращивания их высоты.

Формирование высоких отвалов на глинистом грунтовом основании сопряжено с потенциальным риском нарушения устойчивости ввиду техногенных изменений геологической среды, трудно прогнозируемых на стадии проектирования. К числу объектов, остро нуждающихся в проведении специальных исследований для обоснования устойчивости, относится отвал Балаковского Филиала АО «Апатит». Потребности предприятия в ежегодном размещении 3 млн. т фосфогипса предопределяют необходимость увеличения высоты отвала в перспективе до 100 м. Однако его эксплуатация уже сегодня при высоте менее 60 м осложнена развитием оползневых процессов, представляющих опасность для работающего горно-транспортного оборудования и инженерных объектов, технологически связанных с отвалом.

**Степень изученности проблемы.** Научно-методический подход к изучению и прогнозу оползневых процессов изложен в трудах известных ученых в области инженерной геодинамики И.П. Иванова, Е.П. Емельяновой, Г.С. Золотарева. Исследованию техногенных изменений глинистых грунтов в основании сооружений посвящены работы Р.Э. Дашко, Р.С. Зиангирова, Н.А. Окниной, В.И. Осипова. Опыт обеспечения устойчивости отвалов освещен в работах Г.Л. Фисенко, С.П. Бахаевой, А.М. Гальперина, А.М. Демина, В.П. Жарикова, В.Г. Зотеева, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянца, Ю.И. Кутепова, В.В. Мосейкина, В.Н. Попова, С.И. Протасова, П.С. Шпакова и др. Тема геомеханического обеспечения устойчивости откосных сооружений изучалась зарубежными авторами: Н. Моргенштерном, Я.Х. Хуаном, С. Сарма, Х. Клайперихом, Н. Тамашковичем, Х. Чешлоком, Ю.Н. Малюшицким и др. Изучению инженерно-геологических условий устойчивости отвалов фосфогипса посвящены работы М.А. Ивочкиной, Е.С. Кудашова, Ю.И. Кутепова, Н.А. Кутеповой, В.Е. Миронова.

Накопленный опыт обоснования устойчивости горнотехнических сооружений не охватывает вопросы изучения деформационного поведения отвалов фосфогипса при их формировании на территориях распространения глинистых грунтов. Не установлены факторы, обуславливающие нестабильное состояние отвалов, характерные виды деформационных процессов, закономерности их развития во времени, характер изменений инженерно-геологических и гидрогеологических условий на фоне увеличения геометрических параметров сооружений. Таким образом, разработка геодинамического обоснования устойчивости отвалов фосфогипса, является актуальной научной задачей, решение которой обеспечит безаварийную эксплуатацию сооружений при увеличении их высоты.

**Целью диссертационной работы** является обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на основе выявленных закономерностей развития деформационных процессов.

**Идея работы.** Обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании должно производиться на базе результатов комплексного геодинамического мониторинга с учетом выявляемых изменений инженерно-геологических и гидрогеологи-

ческих условий техногенных и естественных грунтовых массивов, видов деформационных процессов и закономерностей их развития по мере увеличения высоты сооружений.

**Основные задачи исследований:**

1. Изучение и оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий отвалообразования на БФ АО «Апатит» с целью выявления факторов, обуславливающих развитие деформационных процессов.

2. Выполнение лабораторных экспериментов по изучению влияния кислых технических вод на изменение прочности глинистых грунтов в основании отвала.

3. Обоснование механизма образования оползневых деформаций при формировании отвалов фосфогипса на территории распространения глинистых грунтов.

4. Разработка системы управления устойчивостью при формировании отвалов фосфогипса на базе комплексного геодинамического мониторинга.

**Научная новизна:** 1) обоснованы закономерности изменения строения и гидродинамического режима техногенного массива при формировании отвалов фосфогипса; 2) экспериментально доказано снижение прочности глинистых отложений в основании отвала под влиянием кислых технологических вод; 3) установлены причины, механизм и динамика развития деформаций оседания и оползневых смещений на отвале фосфогипса.

**Практическая значимость работы:** 1) выполнена оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий устойчивости отвала фосфогипса на БФ АО «Апатит»; 2) разработаны рекомендации по повышению высоты отвала с учетом организации дренажных мероприятий; 3) предложена система управления устойчивостью отвала на базе ведения геодинамического мониторинга; 4) установлены критериальные значения скоростей деформаций откосов отвала при переходе в опасную стадию оползневого процесса.

**Методы исследований.** Анализ существующих подходов к обоснованию устойчивости горнотехнических объектов. Оценка инженерно-геологических условий отвалообразования на основе полевых и лабораторных испытаний фосфогипса и естественных

грунтов, отобранных из скважин. Оценка гидродинамического режима техногенного массива на основе режимных гидрогеологических наблюдений и численного моделирования геофильтрационных процессов. Лабораторное определение химического состава технических вод, водных вытяжек из грунтов, величины набухания и сдвиговой прочности хвалыньских глин. Интерпретация результатов инструментальных геодезических наблюдений за деформациями отвала. Расчеты устойчивости отвала с применением методов предельного равновесия и численного моделирования изменения напряженного деформированного состояния грунтов с ростом высоты сооружения.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие деформационных процессов на отвалах фосфогипса вызвано изменениями строения и гидродинамического режима техногенного массива при увеличении его высоты, снижением прочности глинистых грунтов в основании вследствие их структурных нарушений и физико-химических преобразований под влиянием кислых технических вод.

2. Механизм оползневых деформаций на отвале фосфогипса определяется развитием фильтрационного выпора у нижней бровки откоса в зоне разгрузки техногенного водоносного горизонта, активизацией сдвиговой ползучести и выдавливанием глинистых грунтов основания из-под отвала.

3. Обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании достигается посредством осушения техногенного массива с помощью горизонтальных скважин, поэтапной корректировки схемы размещения отходов и параметров отвала по результатам комплексного геодинамического мониторинга.

**Достоверность и обоснованность научных положений** подтверждается: многолетними инструментальными геодезическими измерениями смещений поверхности и откосов отвала, натурными наблюдениями за гидродинамическим режимом техногенного массива и эффективностью работы опытной дренажной скважины; представительным объемом полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств техногенных и естественных грунтов; расчетным обоснованием устойчивости откосов отвала.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, анализе и обобщении существующих методов исследований для обоснования устойчивости откосов отвальных сооружений, участии в организации и проведении комплексного геодинамического мониторинга на отвале фосфогипса, выполнении лабораторных испытаний грунтов, обработке и интерпретации полученных результатов.

**Реализация результатов работы.** Полученные результаты использовались при разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации отвала БФ АО «Апатит».

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на 55-й Международной научно-практической конференции на базе Краковской горно-металлургической академии (Краков, Польша, 2014), на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2015, 2017), на VIII Международной научной конференции по прикладным и фундаментальным наукам (Сент-Луис, США, 2015), на 67-м Международном форуме горняков и металлургов (Фрайберг, Германия, 2016), на XI и IV Международных научно-практических конференциях «Наука вчера, сегодня, завтра» (Новосибирск, 2016), "Научные исследования и разработки 2018 года" (Новосибирск, 2018), на заседаниях Научного центра геомеханики и проблем горного производства.

**Публикации:** основное содержание диссертационной работы отражено в 8 публикациях, из них 3 в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, определяемых ВАК при Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (152 библиографических записей), изложенных на 175 страницах машинописного текста, содержит 21 таблицу, 85 рисунков.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н. Н.А. Кутеповой; сотрудникам Санкт-Петербургского горного университета: д.т.н. профессору Ю.И. Кутепову, к.г.-м.н. Г.Б. Поспехову, д.т.н. М.А. Карасёву, к.г.-м.н. Ф.П. Стрельскому; руководителю изыскательской организации в г. Бала-

ково А.Ф. Шумейко за оказанное содействие при выполнении исследований и помощь при подготовке диссертационной работы.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

*1. Развитие деформационных процессов на отвалах фосфогипса вызвано изменениями строения и гидродинамического режима техногенного массива при увеличении его высоты, снижением прочности глинистых грунтов в основании вследствие их структурных нарушений и физико-химических преобразований под влиянием кислых технических вод.*

Объектом диссертационных исследований является отвал фосфогипса БФ АО «Апатит» в Саратовской области. Отвал эксплуатируется более 40 лет, в течение которых его высота постепенно увеличивалась, а площадь расширялась. К настоящему времени на площади ~ 160 га сформирован многоярусный техногенный массив высотой в центральной части около 60 м (рис. 1). Емкость сооружения 32 млн. м<sup>3</sup>. Ведение отвальных работ сопровождается повсеместным оседанием поверхности насыпного массива и сдвиговыми деформациями его откосов, интенсивность которых начала возрастать при высоте отвала 40 м. Для выявления причин развития деформационных процессов и определения возможности дальнейшего наращивания высоты отвала выполнена оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий формирования отвала на БФ АО «Апатит» с учетом специфики складированного материала.

В отвал размещались два вида фосфогипса – полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция, отличающиеся между собой химико-минералогическим составом. По гранулометрическому составу обе разновидности на выходе с завода представлены частицами  $0,05 < d \leq 0,01$  мм, что характеризует их как супеси пылеватые. Плотность скелета отходов варьирует от 0,83 до 1,27 т/м<sup>3</sup>, коэффициент пористости 1,3-1,9. Плотность минеральной части дигидрата составляет примерно 2,37 т/м<sup>3</sup>, полугидрата 2,52 т/м<sup>3</sup>.

Прочностные свойства дигидрата и полугидрата на выходе с технологической линии близки между собой:  $\varphi=10-15^\circ$ ,  $c=0,01-0,02$  МПа. В дальнейшем параметры прочности дигидрата изменяются незначительно при сохранении начальной влажности, достигая



$\varphi=17^\circ$ ,  $c=0,027$  МПа за 30 сут. Полугидрат активно поглощает влагу и превращается в дигидрат, происходящие при этом химико-минеральные преобразования сопровождаются образованием цементационных структурных связей и нарастанием прочности. По истечении 30 суток параметры прочности превышают показатели дигидрата, достигая  $\varphi=32^\circ$ ,  $c=0,035$  МПа.

Инженерно-геологические исследования на отвале выполнялись с использованием комплекса полевых и лабораторных методов. По результатам исследований установлено, что техногенный массив отвала характеризуется неоднородным строением (рис. 3). При общей тенденции нарастания показателей механических свойств грунтов с глубиной, прослеживается зональность по физическим характеристикам и структурированности фосфогипсов. Выделено 4 инженерно-геологических элемента (табл. 1).

**Таблица 1** – Физико-механические свойства грунтов техногенного массива и основания отвала фосфогипса на БФ АО «Апатит»

Наименование грунтов	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\varphi$ , град	$c$ , МПа	$E$ , МПа
Фосфогипс ИГЭ 1а	1,60	36	0,050	28
Фосфогипс ИГЭ 1б	1,57	41	0,020	13
Фосфогипс ИГЭ 1в	1,79	37	0,050	16
Фосфогипс ИГЭ 1 г	1,73	32	0,080	20
Суглинок делювиальный ИГЭ 2	2,00	22	0,068	15
Глина лиманная шоколадная ИГЭ 3	1,90	10	0,040	11
Глина аллювиальная ИГЭ 4	1,81	17	0,037	11
Песок ИГЭ 5	1,70	27	0,003	30

Формирование верхнего слоя, так называемой «корки» (слой 1а), обусловлено дегидратацией, химико-минералогической трансформацией и цементацией складированного материала. По мере отсыпки поверх нее новых слоев и достижения нагрузок, превышающих структурную прочность грунтов (0,015-0,030 МПа), происходит разрушение скелета, развитие трещиноватости, усиливающейся по мере роста высоты отвала. Данными процессами объясняется механизм формирования слоя 1б. Разрушенный фосфогипс постепенно уплотняется в блоках, трещины заполняются водой, образуется слой

водонасыщенных трещиноватых грунтов (1в). Под действием давления трещины смыкаются, фосфогипс уплотняется и приобретает свойства монолитного тела, что определило его название «псевдопластичный» (слой 1г).

В техногенном массиве отвала развит водоносный горизонт, приуроченный к ИГЭ 1в и 1г, мощность которого изменяется от единиц метров вблизи откосов отвала до 40 м в центре. По данным замеров в пьезометрических скважинах тело отвала обводнено почти на 70% по мощности (в центре), уровень водоносного горизонта повышается по мере увеличения высоты отвала (в среднем на 0,5 м в год), а после прекращения отсыпки – практически не снижается (рис. 2). Высокая обводненность отвала обусловлена спецификой складированного материала и затрудненными условиями его дренирования. Так, полугидрат поступает в отвал с влажностью 25÷30%, а дигидрат – 35÷40%. После отсыпки полугидрат частично снижает влажность за счет перехода свободной воды в кристаллизационную. Большая же часть технической воды инфильтруется в тело отвала. С каждой тонной сухого дигидрата в отвал поступает 0,398 м<sup>3</sup> свободной воды, с тонной сухого полугидрата – 0,241 м<sup>3</sup>. Посчитано, что при активном ведении отвалообразования в Балаковский отвал ежедневно поступает более 1000 м<sup>3</sup> технической воды. Затрудненные условия разгрузки водоносного горизонта обусловлены экранированием откосов отвала слабопроницаемой коркой фосфогипса, залегающим в основании насыпного массива хвалыньских глин (регионального водоупора), строительством противофильтрационной завесы по периметру отвала (ПФЗ).

Естественное основание отвала представлено песчано-глинистыми отложениями верхнечетвертичного возраста мощностью от 11 до 22 м (рис. 3). Непосредственно под подошвой отвала залегают делювиальные суглинки мощностью до 3 м, под которыми распространен 3-5 метровый слой лиманно-морских шоколадных глин (хвалыньских), известных в Саратовской области способностью к набуханию при вскрытии строительными работами. Ниже распространены аллювиальные отложения – суглинки голубые мощностью 4-6 м, подстилаемые песками.

Характеристики физико-механических свойств грунтов, полученные обобщением результатов исследований разных лет, представлены в табл. 1. Расчеты устойчивости отвала, выполненные с их использованием, свидетельствуют об удовлетворительном состоянии откосов на оползневом участке, что не соответствует фактическому положению. Обратными расчетами по 6 профилям на момент развития оползней установлено нарушение устойчивости откоса по поверхности, приуроченной к верхней части слоя шоколадных глин при их сцеплении  $0,01 \div 0,03$  МПа и угле внутреннего трения  $- 0 \div 5^\circ$ .

Выявленное несоответствие в характеристиках свойств глин можно объяснить механическим разрушением их структуры в зоне сдвигов и воздействием технической воды. Определено, что высачивающаяся из тела отвала вода, характеризуется кислой реакцией  $pH=4,6$ . Были отобраны и исследованы образцы хвалыньских глин как из-под отвала, так и за его пределами. По результатам изучения глина характеризуется высокой поглотительной способностью: емкость поглощения  $21,7-26,1$  мг-экв/100 г породы. По составу водных вытяжек установлено существенное изменение состава обменных ионов в глинах, подвергшихся воздействию технической воды (табл. 2). Относительное набухание глин в кислой технической воде превышает набухание в дистиллированной воде в среднем в 1,2 раза (рис. 4). Степень набухания существенно зависит от структуры глин. Набухание хвалыньских глин в образцах с нарушенной структурой выше в среднем в 3,3 раза относительно ненарушенных образцов. Прочность глин вследствие нарушения их структуры и воздействия кислых вод снижается: сцепление в среднем в 2,1 раза, угол внутреннего трения в среднем в 2,8 раза относительно образцов с ненарушенной структурой и физическим состоянием (рис. 5).

Таким образом, установлено, что по мере увеличения геометрических параметров сооружения происходит изменение инженерно-геологических и гидрогеологических условий как формируемого техногенного массива, так и естественного грунтового основания. Динамическое состояние природно-технической системы «техногенный массив + грунтовое основание» обуславливает развитие деформационных процессов, интенсивность которых возрастает с увеличением высоты отвала.

**2. Механизм оползневых деформаций на отвале фосфогипса определяется развитием фильтрационного выпора у нижней бровки откоса в зоне разгрузки техногенного водоносного горизонта, активизацией сдвиговой ползучести и выдавливанием глинистых грунтов основания из-под отвала.**

Изучение деформационных процессов на отвале производилось с применением инструментальных геодезических наблюдений по 8 реперным линиям (рис. 2) и лазерной сканирующей съемки поверхности отвала. Анализ результатов мониторинга показывает, что деформации поверхности и откосов отвала фосфогипса обусловлены одновременным развитием двух деформационных процессов: оседанием поверхности и оползнями.

Интенсивность оседания поверхности насыпных массивов зависит от высоты отвала: при отсыпке первого яруса высотой 15 м скорость оседания составляла 24 см/год, а при увеличении его высоты до 40-50 м – возросла до 160 см/год. За 7-летний период наблюдений поверхность отвала осела на 7-9 м. Моделирование уплотнения фосфогипса осуществлялось в компрессионных приборах. Оно позволило установить наличие структурной прочности дигидрата 0,15 МПа и полугидрата 0,30 МПа. Образцы ненарушенной структуры характеризуются модулем деформации  $E_0=26\div 32$  МПа. При напряжениях, превышающих структурную прочность, сжимаемость обеих разновидностей фосфогипса возрастает. Модуль деформаций нарушенных образцов составляет в среднем 16,5 МПа, при этом компрессионная кривая в диапазоне напряжений 0,4–2,0 МПа имеет практически линейный характер.

Расчеты деформаций уплотнения отвала с использованием полученных величин модуля деформации дают заниженные осадки поверхности отвала в сравнении с фактическими. Это свидетельствует о том, что уплотнение фосфогипса в массиве имеет длительный характер. Реологические испытания образцов показали, что сжимаемость фосфогипса изменяется нелинейно с ростом напряжений. Особенно она велика в диапазоне вертикальных напряжений от 0,1 до 0,4 МПа, для которого характерно изменение модуля деформации от 2 до 7 МПа.

Результаты геодезических наблюдений дают основание полагать, что большие оседания имеют повсеместное распространение на поверхности и откосах отвала, сопровождая его формирование на всех этапах наращивания, и не прекращаются еще длительное время после завершения эксплуатации сооружения. Они носят положительный характер, т.к. увеличивают ёмкость сооружения в пределах отведенного под него земельного отвода и способствуют процессам уплотнения-упрочнения пород.

Визуальные наблюдения за состоянием отвала, проводимые техническими службами предприятия, свидетельствовали об отсутствии оползневых деформаций на отвале при высотах до 40 м. После превышения этих отметок появились признаки развития оползней. Геодезическими измерениями при этом было установлено, что при возрастании высоты отвала отмечается уменьшение углов откосов до  $27^\circ$  относительно ранее измеренных  $40^\circ$  при высоте 15 м. Следовательно, повышение высоты отвала сопровождается самопроизвольным выполаживанием откосов в результате развития процессов ползучести в породах основания. Как известно, процессы ползучести протекают медленно и незаметно, но приводят к нарушению структуры грунтов, снижению их прочности, повышению водопроницаемости, что подготавливает развитие оползневого смещения.

Характерным признаком, предшествующим образованию оползней, является появление воды у нижней бровки отвала с последующим затоплением всего промежутка земной поверхности от нижней бровки откоса до ПФЗ. Результаты численного эксперимента по моделированию НДС пород отвала и основания с учетом повышения уровня техногенного водоносного горизонта показали, что при достижении высоты откоса 40 м в слое делювиальных суглинков формируется локальная зона, в которой градиенты фильтрации превышают их фильтрационную прочность (0,8) (рис. 6). Это приводит к фильтрационному выпору – выдавливанию грунта из-под отвала восходящим потоком фильтрации, что в свою очередь обеспечивает доступ кислых вод к слою хвалынской глины с последующим их набуханием и разупрочнением. Так формируется выраженная зона ослабления, приуроченная к кровле слоя хвалынской глины, по которой в дальнейшем происходит развитие оползневого смещения.

Важным результатом выполненных исследований для организации и выполнения геодинамического мониторинга состояния отвала являются установленные признаки развития оползневых процессов и количественные показатели динамики их развития на разных стадиях:

*1 стадия (подготовительная)* – нарушение структуры слоя делювиальных суглинков, сопровождающееся выходом фильтрационных вод на дневную поверхность. Визуальным признаком является заболачивание участка земли между нижней бровкой отвала и ПФЗ. Инструментально фиксируются преимущественно вертикальные смещения верхней бровки с интенсивностью 2,5-6,5 мм/сут, обусловленные уплотнением насыпных пород; деформации основания у нижней бровки отвала – в пределах точности измерений. Технологические условия проявления – высота отвального яруса менее 40 м.

*2 стадия (начальная)* – оседание откоса отвального яруса без разрыва сплошности насыпного массива, обусловленное выдавливанием грунтов основания. Визуальные признаки – подъем поверхности основания у нижней бровки отвала, деформации изгиба стенок дренажной канавы. Инструментально фиксируются как вертикальные осадки верхней бровки с интенсивностью 3-10 мм/сут, так и поднятия нижней бровки со скоростью 0,1-1,0 мм/сут; вертикальные смещения нижней бровки не превышают 10-30% от смещений верхней бровки; на участке за ПФЗ – деформаций нет. Диагностическим признаком является нарастание горизонтальных смещений нижней бровки в сторону от отвала с интенсивностью от 0,3 до 2,0 мм/сут при слабо выраженном нарастании скоростей горизонтальных смещений верхней бровки 0,04-1,0 мм/сут. Высота отвального яруса 40-45 м.

*3 стадия (активная)* – развитие оползней с образованием вала выпирания (рис. 7). Визуально – отчленение оползневого тела, обнажение разреза четвертичных грунтов в вале выпирания, разрушение дренажной канавы. Инструментально фиксируются вертикальные осадки верхней бровки с интенсивностью 3-11 мм/сут, поднятия нижней бровки со скоростью 1,2-3,5 мм/сут; вертикальные смещения нижней бровки составляют более 50% от осадки верхней бровки. Диагностический признак – синхронное возрастание горизон-

тальных смещений верхней и нижней бровок до скорости 1,5-3,7 мм/сут. Высота отвального яруса выше 45 м.

При прекращении отвальных работ на деформирующихся участках выполняемые геодезические наблюдения свидетельствовали о длительном характере затухания деформаций на стадии стабилизации оползневых процессов, скорости горизонтальных смещений при этом снизились в несколько раз – до 0,012-0,554 мм/сут (рис. 8). В результате развития оползневых процессов произошло дальнейшее выполаживание углов откосов до  $16\div 23^\circ$ .

***3. Обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании достигается посредством осушения техногенного массива с помощью горизонтальных скважин, поэтапной корректировки схемы размещения отходов и параметров отвала по результатам комплексного геодинамического мониторинга.***

Инженерно-геологическая информация, полученная в ходе диссертационных исследований, использована для обоснования возможности повышения высоты отвала БФ АО «Апатит» до 50, 70 и 100 м, выбора оптимальных результирующих углов откосов и разработки мероприятий по улучшению условий устойчивости сооружения. Расчеты выполнялись с применением программного комплекса GALENA, реализующего методы предельного равновесия (в расчетах использован метод Спенсера). Проверка устойчивости выполнялась на программе ABAQUS посредством численного моделирования НДС обводненной грунтовой системы «отвал фосфогипса + слоистое песчано-глинистое основание».

Расчеты устойчивости отвала выполнялись по трем вариантам определения депрессионной поверхности в откосе отвала: 1 – предварительным расчетом в рамках специализированной программы численного моделирования геофильтрационных процессов; 2 – приближенным расчетом по результатам гидрогеологического мониторинга (тело отвала обводнено на 70% по мощности); 3 – расчетом порового давления при моделировании НДС массива средствами программного комплекса ABAQUS.

Из прогнозных результатов следует, что устойчивость отвала БФ АО «Апатит» при наращивании его высоты до 50, 70 и 100 м с

проектным результирующим углом откосов  $28^\circ$ , а также со сниженным до  $21^\circ$  (приемлемым по экономическим показателям), не отвечают нормативным требованиям по допустимому коэффициенту запаса, значение которого должно быть не ниже 1,20.

В качестве мероприятия по улучшению условий устойчивости отвала рассмотрена возможность применения горизонтальных дренажных скважин для снижения уровней воды в теле насыпного массива. В работе приводятся результаты численного моделирования геофильтрационных процессов для отвала высотой 70 м. Показано, что применение горизонтального дренажа позволяет повысить коэффициент устойчивости от 1,06 до 1,20 при сохранении результирующего угла  $28^\circ$ . Численное моделирование работы горизонтальных дренажных скважин в откосе отвала производилось для различной длины скважин и расстояния между ними в плане. Установлена удовлетворительная эффективность работы горизонтальных скважин длиной 75 м при расстоянии между ними 50 метров.

Эффективность горизонтального дренажа на отвале экспериментально доказана наблюдениями за работой опытной скважины в течение 5 лет. Установлена прямая зависимость между дебитом функционирующей горизонтальной скважины и уровнем техногенного водоносного горизонта в наблюдательной вертикальной скважине, а также коэффициентом запаса устойчивости откоса отвала в диагностическом сечении, к которому приурочена опытная и наблюдательные скважины (рис. 9).

Управление устойчивостью откосов отвала в процессе его формирования осуществляется посредством ведения геодинамического мониторинга, по результатам которого принимаются меры безопасности – корректировка параметров отвала, схемы размещения фосфогипса, внедрение дренажных мероприятий и других технологических решений. Оптимальная программа комплексного геодинамического мониторинга на отвале БФ АО «Апатит» включает контролирование деформаций откосов с использованием геодезических средств измерений, режимные наблюдения за уровнями техногенного водоносного горизонта в теле отвала, а также периодические опробования глинистых грунтов основания на предмет выявле-



ния развития в них деструктивных процессов, ведущих к понижению прочности.

В качестве критериев безопасности при выполнении мониторинга следует использовать количественные показатели состояния системы «отвал + основание»: 1) значения скоростей горизонтальных смещений реперов, соответствующих переходу оползневых процессов в опасную стадию (более 2 мм/сут); 2) положение депрессионной поверхности в откосе, удовлетворяющее двум условиям: – устойчивость откоса обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса (1,20); – действующие градиенты фильтрации в основании отвала не превышают критических значений, при которых возможно образование фильтрационного выпора; 3) характеристики сопротивления сдвигу грунтов основания, которые должны соответствовать расчетным значениям, принятым при обосновании устойчивости откосов отвала.

Комплекс дополнительных технических мероприятий, рекомендуемый для повышения устойчивости откосов отвалов фосфогипса, включает: 1) селективное складирование отходов по площади отвалообразования с размещением полугидрата во внешних частях отвала, а дигидрата – во внутренних частях; 2) соблюдение общего направления развития отвальных работ от центра к периферии сооружения; 3) недопущение длительного складирования фосфогипса (особенно дигидрата) на малом по площади участке отвала вблизи откосов; 4) инженерную подготовку основания с оборудованием дренажных устройств; 5) пригрузку нижней и разгрузку верхней частей откосов отвала.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### ***Основные научные и практические выводы:***

1. На базе анализа результатов полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств складированного фосфогипса, техногенных пород отвала и отложений основания, инструментальных геодезических измерений, наблюдений за гидродинамическим режимом техногенного водоносного горизонта, а также произведенных расчетов устойчивости, численного моделирования геофильтрации и напряженно-деформированного состояния пород выполнена

оценка условий формирования отвала фосфогипса на Балаковском Филиале АО «Апатит».

2. Установлено, что инженерно-геологические и гидрогеологические условия устойчивости отвала характеризуется наличием: – техногенного массива из фосфогипса с выделением четырех слоев по физико-механическим свойствам и деформационному поведению; – грунтового основания, сложенного делювиальными суглинками в верхней части разреза и лиманными набухающими хвалынскими глинами; – сложной гидрогеологической структурой взаимосвязанных между собой водоносных горизонтов: безнапорного в теле отвала и напорного – в его основании.

3. Выявлены причины повсеместного развития больших по величине деформаций оседания поверхности отвала, интенсифицирующихся с ростом высоты сооружения. Оседания вызваны изменением строения техногенного массива вследствие протекающих процессов самоцементации складированного фосфогипса, дальнейшего разрушения сформированной цементационной структуры, развития трещиноватости и гравитационного уплотнения под действием возрастающего веса отсыпаемых грунтов.

4. Выявлены факторы, обуславливающие снижение устойчивости откосов отвала с ростом их высоты, к числу которых отнесены: формирование в теле отвала техногенного водоносного горизонта и снижение прочности глинистых грунтов основания вследствие механического разрушения их естественной структуры в зоне сдвигов и физико-химического преобразования при взаимодействии с кислой технической водой. Механизм образования оползней определяется развитием в грунтовом основании фильтрационного выпора на участках разгрузки техногенного водоносного горизонта, активизацией сдвиговой ползучести и выдавливанием слабых глинистых грунтов из-под отвала.

5. Разработана система геодинамического обоснования устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании, базирующаяся на учете изменений инженерно-геологических и гидрогеологических условий техногенных и естественных грунтовых массивов, видов деформационных процессов и закономерностей их развития с ростом высоты сооружений.

6. Разработаны рекомендации по управлению состоянием откосов отвала на базе ведения комплексного геодинамического мониторинга, по результатам которого принимаются меры безопасности – корректировка параметров отвала, схемы размещения фосфогипса, внедрение дренажных мероприятий и других технологических решений. В качестве эффективной меры предотвращения развития опасных деформаций рекомендуется осушение техногенного массива с помощью горизонтальных скважин.

7. Результаты работы могут быть использованы проектными организациями при обосновании параметров отвалов фосфогипса и выполнении на них инженерно-геологических исследований, а также эксплуатирующими предприятиями при организации и выполнении мониторинга и разработки мероприятий по обеспечению устойчивости отвальных сооружений.

**Основные положения работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:**

1. Коробанова, Т.Н. Изучение прочностных характеристик техногенных пород отвала БФ АО «АПАТИТ» / Т.Н. Коробанова // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 7. № 11. С. 113-117.

2. Коробанова, Т.Н. Мониторинг опасных геодинамических процессов при формировании отвала фосфогипса Балаковского Филиала АО «АПАТИТ» / Т.Н. Коробанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 405-408.

3. Кутепова, Н.А., Коробанова, Т.Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково Саратовской области / Н.А. Кутепова, Т.Н. Коробанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 132-140.

**Другие печатные издания:**

4. Коробанова, Т.Н. Исследование влияния технических вод на физико-механические свойства глинистых грунтов в основании отвала фосфогипса / Т.Н. Коробанова // Научные исследования и разработки 2018 года: сборник материалов IV Международной научно-

практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2018. – С. 165-171.

5. Коробанова, Т.Н. Российский и зарубежный опыт утилизации фосфогипса / Т.Н. Коробанова // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 11 (33). С. 63-71.

6. Кутепова, Н.А., Коробанова, Т.Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса / Н.А. Кутепова, Т.Н. Коробанова // Горные науки и технологии. 2017. № 1. С. 31-39.

7. Korobanova, T.N. Dangerous geodynamic processes accompanying dump's formation / T.N. Korobanova // Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 8th International Academic Conference. – St. Louis: Science and Innovation Center Publishing House, 2015. – PP. 84-90.

8. Korobanova, T.N. Phosphogypsum storage and its functioning in the fertilizer industry of Balakovo (SE Russia) and overriding stability factors / T.N. Korobanova // Scientific Reports on Resource Issues: Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry. – Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2016. – Vol.1. – PP. 94-98.