

На правах рукописи



СЕМЕНОВА Евгения Анатольевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
УПЛОТНЯЕМОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ОТВАЛЬНЫХ МАССИВОВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Щёкина Марина Владимировна

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Круподеров Владимир Степанович,

директор ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) (МО, пос.Зеленый);

кандидат геолого-минералогических наук,

Атрощенко Федор Григорьевич,

ведущий гидрогеолог ООО «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ» (г. Санкт-Петербург).

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» («ВИОГЕМ»), г.Белгород

Защита диссертации состоится «___» _____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.10 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 6, стр. 2, ауд. 305А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте www.misis.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор технических наук

С.А. Эпштейн

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Сложившаяся в Российской Федерации ситуация в области обращения с отходами горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности ведет к опасному загрязнению окружающей природной среды и создает реальную угрозу здоровью населения. С отходами теряются минеральные ресурсы, многими из которых страна практически не располагает. На территории России в отвалах различных типов накоплено более 90 млрд. тонн твердых отходов, в том числе 80 млрд. тонн – горнопромышленных, количество которых ежегодно увеличивается почти на 3 млрд. тонн; также техногенными массивами занято свыше 300 тыс. га земель.

Важный элемент проектирования открытых разработок - определение высоты и объема карьерных отвалов, а также необходимых для их размещения площадей. Основной процесс, с которым связано изменение состояния отвальных пород во времени, - их уплотнение (под действием внешней нагрузки - для оснований, или собственного веса - для тел отвалов). В зависимости от фазового состава (водонасыщенности) породных масс отвалов для прогнозных расчетов их уплотнения используется аппарат теории фильтрационной консолидации или ползучести.

Если основание или тело отвала сложены глинистыми породами, привлечение аппарата теорий консолидации и ползучести позволяет определить геометрические параметры насыпей с учетом ряда технологических факторов, оказывающих совокупное влияние на сопротивление пород сдвигу. При этом степень уплотнения породных слоев следует устанавливать с помощью зависимостей, в которые вводится скорость подвигания фронта отвала, и затем использовать выбранный по величине степени уплотнения график сопротивления пород сдвигу для оценки устойчивости откосов. Таким образом, производится проверка режима отвалообразования с позиций устойчивости откосов, и оценивается эффективность мероприятий по инженерной подготовке слабых оснований, что является основой для разработки эффективных мероприятий по освоению техногенных массивов.

Состояние отвальных массивов (гидроотвалов, хвостохранилищ и отвальных насыпей) определяется их масштабом и скоростью развивающихся процессов уплотнения и ползучести. Для оценки устойчивости откосных сооружений ограждающих дамб и обеспечения максимальной вместимости внутренних зон намывных сооружений необходимо располагать информацией о степени уплотнения намывных отложений с учетом динамики их формирования. Через степень уплотнения определяются характеристики сопротивления сдвигу и допустимые нагрузки на основание (несущая способность) отвальных массивов.

Выполненные к настоящему времени теоретические исследования в области ползучести горных пород и консолидации грунтов обеспечили получение многочисленных аналитических решений. Однако существующие методы решения не всегда могут быть использованы для прогноза динамики геомеханических процессов на горных предприятиях, так как отсутствует дифференциация решений для горных пород различных инженерно-геологических классов. Также имеющиеся методы решения задач ползучести и консолидации не учитывают динамики горных работ и требуют трудоемкого, преимущественно лабораторного, определения многочисленных исходных показателей. На сегодняшний день компьютерные программы расчета уплотнения не учитывают динамику формирования и перерывов в наращивании отвальных сооружений. Данный вопрос о методах оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов тонкодисперсных отложений недостаточно исследован и освещен в литературных источниках.

В связи с вышесказанным, совершенствование методов оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов тонкодисперсных отложений является актуальной научной задачей. Исследования по данной тематике проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания №2014/113, проект №504.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов оценки уплотняемости и несущей способности техногенных массивов тонко-

дисперсных отложений для повышения вместимости отвальных горнотехнических сооружений и экономии земельных ресурсов.

Идея работы заключается в том, что обеспечение устойчивости и повышение вместимости отвальных массивов тонкодисперсных отложений достигается на основе учета установленных нелинейных зависимостей характеристик водопроницаемости и сжимаемости этих отложений от уплотняющих нагрузок.

Задачи исследований:

- анализ опыта освоения техногенных массивов в горнотехнической практике с целью обеспечения устойчивости и повышения вместимости отвальных сооружений;
- оценка возможностей применения теории фильтрационной консолидации и ползучести грунтов в горнотехнической практике;
- установление нелинейных зависимостей коэффициента консолидации от уплотняющих нагрузок;
- расчеты уплотнения намывных отложений и прогноз их несущей способности во времени;
- инженерно-геологическое районирование естественных и искусственных слабых оснований, сложенных тонкодисперсными отложениями;
- разработка программного обеспечения для компьютерных расчетов порового давления, степени уплотнения, осадок и величины допустимых нагрузок для различных стадий формирования отвального массива;
- определение перспектив использования акустических методов контроля для получения интегральных данных об изменениях прочностных и деформационных свойств слабых грунтов;
- апробация усовершенствованного метода оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов тонкодисперсных отложений в условиях полигона складирования ОАО «Воскресенские минеральные удобрения».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета уплотнения отвальных массивов и естественных слабых оснований должна учитывать нелинейную зависимость коэффициента консолидации (интегральной характеристики уплотняемости водонасыщенных

грунтов) от уплотняющих нагрузок, обусловленных собственным весом сжимаемого слоя переменной мощности и вышележащих слоев с учетом режима формирования отвального массива (периодов роста и перерывов в нагружении).

2. Несущую способность техногенных (отвальных) массивов (допустимая нагрузка на основание) необходимо определять как функцию сцепления и угла внутреннего трения, учитывая получаемые при трехосных испытаниях зависимости сцепления $C(U)$ и угла внутреннего трения $\phi(U)$ от степени уплотнения линейного вида. Для оценки состояния техногенных массивов и их оснований в процессе уплотнения необходимо сочетать традиционные точечные скважинные измерения с интегральными измерениями на основе акустического прозвучивания техногенного массива шумовыми сигналами с их последующей корреляционной обработкой.

3. Инженерно-геологическое районирование техногенных (отвальных) массивов необходимо производить с учетом предварительно определяемых зависимостей несущей способности от длительности периода после прекращения намыва или отсыпки, устанавливаемых дифференцированно для различных участков, исходя из мощности и степени уплотнения намывных отложений, характера фракционирования и физико-механических показателей.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается: анализом опыта формирования и последующего освоения техногенных массивов на горных предприятиях; расчетами уплотнения техногенных отложений с использованием аппарата теории фильтрационной консолидации и ползучести; натурными и лабораторными исследованиями намывных тонкодисперсных отложений с использованием устройств для измерения порового давления, комбинированных зондов, приборов плоскостного среза, компрессионных и трёхосного сжатия (стабилометров); высокой сходимостью (около 80%) полученных результатов расчета несущей способности намывных оснований на объектах Михайловского ГОКа и ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» с фактическими данными о проходимости различных типов горного оборудования на этих территориях.

Методы исследований: анализ и обобщение материалов ранее выполненных работ в области оценки несущей способности слабых оснований; методы теорий фильтрационной консолидации и ползучести грунтов, а также предельного напряженного состояния и предельного равновесия; натурные и лабораторные методы исследования состояния и свойств грунтов оснований; методы компьютерного моделирования; методы контроля и прогноза геомеханического состояния; методы оценки и расчетов устойчивости отвалов.

Новизна работы заключается в установлении нелинейных зависимостей коэффициента консолидации от уплотняющих нагрузок, в установлении зависимости несущей способности намывных оснований различной мощности от времени «отдыха» с учетом их степени уплотнения и уточнении методики расчетов уплотнения намывных массивов, описывающей все стадии их формирования и соответствующие изменения коэффициента консолидации от нагрузки.

Научное значение работы состоит в совершенствовании методики расчета уплотнения отвальных массивов и естественных слабых оснований и определения несущей способности техногенных массивов для проведения инженерно-геологического районирования с целью размещения дополнительных объемов вскрыши в контурах гидроотвалов и ускорения подготовки их территорий к рекультивации.

Практическое значение и реализация результатов исследований состоит в разработке предложений по освоению территории заполненного гидроотвала Лог Шамаровский (МГОК), в определении геометрических параметров и осадок техногенного массива фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», которые учтены в проекте наращивания этого сооружения.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на международном симпозиуме «Неделя Горняка» (Москва, 2013-2016 гг.), на заседаниях кафедры Геологии и маркшейдерского дела НИТУ «МИСиС» поэтапно, по мере выполнения отдельных разделов работы, сделан доклад на XIII национальной конференции с международным участием «Открытая и подводная добыча полезных ископаемых» (Болгария, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 работ в изданиях, входящих в Перечень ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 источников, содержит 40 рисунков и 16 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность докт.техн.наук, профессору Гальперину А.М. за всестороннюю помощь при выполнении исследований и особое внимание к работе, а также благодарит научного руководителя, канд.техн.наук, доцента Щёкину М.В. и коллектив кафедры Геологии и маркшейдерского дела за поддержку настоящей работы.

Основное содержание работы

В первой главе рассматривается современное состояние методов оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов. В горнотехнической практике создаются намывные гидротехнические сооружения – гидроотвалы и хвостохранилища, которые являются объектами повышенной экологической и промышленной опасности. С возведением этих сооружений связано загрязнение воздушного бассейна, поверхностных и подземных вод, а также нарушение прилегающих территорий из-за изъятия плодородных земель и перекрытия их оползневыми массами при прорыве ограждающих дамб.

Под действием постоянных статических нагрузок (внешняя нагрузка или собственный вес) горные породы подвергаются процессам консолидации. Существуют две группы аналитических решений, описывающих эти процессы:

- 1) теории уплотнения двухфазной породы в результате фильтрации воды под нагрузкой (фильтрационная или «первичная» консолидация);
- 2) теории консолидации двух- и трехфазных пород с учетом реологических свойств скелета, вязкости связанной воды, сжимаемости поровой жидкости, а также взаимодействия фаз.

Допущения об отжатии (отфильтровывании) поровой воды из сжимаемо-

го слоя в одном и в двух направлениях применяются при решении задач фильтрационной. В горно-технической и строительной практике для расчетов уплотнения в основном применяют решения одномерных задач. Решение плоской (двумерной) задачи используется как «эталонное» и оно позволяет оценивать пригодность одномерных задач для расчетов уплотнения водонасыщенных толщ и оснований упорных призм намывных тонкодисперсных отложений.

Процессы уплотнения вызывают изменения состояния породных масс сухих и намывных отвалов и определяют деформации отвальных массивов, устойчивость откосов и несущую способность отвальных пород. Отжатие воды из пор определяет уплотнение слабоструктурных водонасыщенных пород тела и основания отвалов, состоящих из двух фаз: минерального скелета и воды.

Поровая вода и минеральный скелет воспринимают нагрузку от вышележащих отвальных масс, что создает в поровой воде избыточное (поровое) давление и приводит породу в нестабилизированное состояние. Сопротивление породы сдвигу возрастает по мере уплотнения и оттока воды к зонам с пониженным давлением или дренажам. Вязкое трение минеральных частиц (ползучесть минерального скелета) обуславливает уплотнение квазиоднофазных пород. Пластическая деформация породы при этом определяется перекомпоновкой и необратимыми сдвигами минеральных частиц и разрушением связей между ними.

В настоящее время найдено значительное количество решений задач консолидации грунтов, реализованное в расчетных моделях многофазных глинистых пород (К.Терцаги, Н.М.Герсеванов, В.А.Флорин, Н.А.Цытович, Д.Е.Польшин, В.Г.Короткин, М.Н.Гольдштейн, Н.Н.Веригин, Ю.К.Зарецкий, М.В.Мальшев, М.Ю.Абелев, З.Г.Тер-Мартirosян, А.З.Тер-Мартirosян, А.И.Ксенофонов, М.Био, Н.Карилло, Р.Гибсон, Д.Тэйлор и др.). Решение задач консолидации применительно к горным работам приведено в работах В.А.Мироненко, С.В.Кузнецова, А.М.Гальперина, Ю.И.Кутепова, В.Ферстера, Н.Тамашковича и других.

Технология открытых горных работ определяет интенсивность

перечисленных геомеханических процессов, а также и динамику формирования бортов и отвалов. Для достоверной оценки возможных деформаций бортов карьеров в конечных контурах, размещения отвальных насыпей на гидроотвалах, оценки несущей способности отвальных масс и установления величин деформаций поверхности отвалов после их рекультивации необходимо знание закономерностей развития геомеханических процессов, что представляет интерес с позиций последующего использования нарушенных горными работами территорий.

Процессами уплотнения техногенных массивов и их оснований, оцениваемых через деформации (осадки) и величину избыточного давления в поровой воде, определяется реальная вместимость отвальных сооружений, несущая способность искусственных и естественных оснований, а также устойчивость откосов ограждающих дамб и отвальных насыпей.

Развивались два направления прогноза уплотнения намывных и насыпных отложений: разработка расчетных зависимостей; численное моделирование гидрогеомеханических процессов. Для каждого из подходов разрабатывалось необходимое программное обеспечение.

При формировании гидроотвалов из тонкодисперсных пород создаются условия для возникновения значительного избыточного порового давления. В слоях большой мощности, сложенных породами с низкими фильтрационными характеристиками, рассеивание порового давления – длительный процесс, что и следует учитывать при назначении темпов отвалообразования. Многослойные отвалы целесообразно формировать путем чередования слабофильтрующих и дренирующих слоев, исходя из условия максимально возможного уплотнения глинистых слоев и увеличения приемной способности гидроотвала.

Сопоставление с данными одномерной задачи результатов расчетов порового давления для слоя мощностью m (плоская задача уплотнения слоя конечной мощности), загруженного равномерно распределенной нагрузкой на полосе шириной $2a$, показывает, что сходимость значений порового давления тем лучше, чем больше отношение a/m . Коэффициент перехода от плоской к одномер-

ной задаче $\lambda=1$ при $a/m \geq 10$.

К числу основных горнотехнологических задач, решаемых с помощью теории консолидации грунтов, относятся:

1. Обеспечение устойчивости бортов карьеров на обводненных месторождениях в результате снижения уровня водоносных горизонтов и упрочнения породного массива в результате глубокого водопонижения.

2. Формирование отвальных насыпей на слабых естественных и намывных основаниях.

3. Форсирование консолидации тонкодисперсных намывных отложений за счет создания в них фильтрующих элементов.

Точность решения задач уплотнения отвальных оснований, полученных применительно к блоковой и фронтальной схемам отсыпки отвалов, может быть повышена путем учета ползучести минерального скелета.

Решения задач фильтрационной консолидации позволяют удовлетворительно описывать развитие осадок тонкодисперсных намывных пород в пределах 80-90% максимальной (стабилизированной) осадки.

Для прогноза уплотняемости и оценки устойчивости тонкодисперсных водонасыщенных породных масс с учетом их нестабилизированного состояния необходимо располагать данными об изменении коэффициента консолидации C_v во времени под действием возрастающих нагрузок.

Из решения задач нелинейной фильтрационной консолидации вытекает, что коэффициент консолидации может быть приближенно принят в виде (по Ю.К.Зарецкому):

$$C_v = C_v^0 \exp(-\lambda' q), \quad (1)$$

где C_v^0 – начальный коэффициент консолидации (при $q=0$);

q – уплотняющая нагрузка;

λ' – параметр нелинейной консолидации.

Для определения параметров λ' и C_v^0 используют результаты лабораторных исследований консолидации в универсальных стабилометрах с

измерением порового давления на нижнем торце образцов и (или) натурные замеры порового давления в намывных слоях. При натуральных замерах определяется степень уплотнения намывных слоев, через которую устанавливается величина коэффициента консолидации. При различных нагрузках вычисляют значения коэффициента консолидации в виде:

$$C_v = \frac{4mh^2}{\pi^2 t_k}, \quad (2)$$

где h – длина пути фильтрации в слое, м;

t_k – продолжительность периода консолидации, год;

m – параметр, характеризующий степень уплотнения.

Во второй главе рассматриваются лабораторные исследования намывных и естественных тонкодисперсных отложений.

Для определения характеристик намывных масс и пород оснований гидроотвалов были проведены лабораторные испытания, которые позволили определить: водно-физические свойства (плотность, плотность минеральных частиц, влажность, пористость, водонасыщенность); показатели компрессии и консолидации; сопротивление сдвигу; гранулометрический и минеральный состав, структуру пород.

В период производства полевых работ, а также в стационарной лаборатории были определены водно-физические свойства пород гидроотвалов. Использование универсальных стабилометров М-2 конструкции МИИТа и УСВ-2 конструкции ВИОГЕМа, а также сдвигового и компрессионно-фильтрационного прибора конструкции Гидропроекта позволили провести необходимый комплекс механических испытаний. Для определения гранулометрического состава был применен комбинированный гранулометрический анализ с использованием ситового и пипеточного методов.

Рассмотрены различные методики определения параметров нелинейной фильтрационной консолидации в зависимости $C_v = C_v^0 \exp(-\lambda'q)$. Для прогноза уплотняемости и оценки устойчивости тонкодисперсных водонасыщенных породных масс с учетом их нестабилизированного состояния необходимо располагать данными об изменении коэффициента консолидации во времени

под действием возрастающих нагрузок. Этот коэффициент обычно определяется из выражения:

$$C_v = \frac{k_f(1 + \varepsilon_{cp})}{a_{cp}\gamma_w}, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент фильтрации, м²/сут;

ε_{cp} – средняя приведенная пористость в рассматриваемом диапазоне;

a – коэффициент сжимаемости, м²/т;

γ_w – плотность воды, т/м³.

Прогнозирование осадок и динамики порового давления в тонкодисперсных водонасыщенных породных массах осложняется тем, что их сжимаемость зависит от прилагаемого давления, а коэффициент фильтрации существенно снижается в процессе уплотнения.

Коррективы в приведенные выше формулы для расчета уплотнения глинистых пород тела и основания гидроотвалов вносятся с использованием зависимостей, вытекающих из теории нелинейной фильтрационной консолидации (по Ю.К. Зарецкому).

Определение параметров λ' и C_v^0 было осуществлено на основе лабораторных исследований консолидации, проведенных в универсальных стабилометрах, позволявших осуществлять замеры порового давления в нижних торцах образцов. Определяется длительность процесса консолидации, под которым понимается время полного рассеивания избыточного порового давления на нижнем торце ($K_1 = 1$ и $P_u = 0$) или время стабилизации осадки [$S(t)/S_\infty = 1$]. Из анализа графиков функций $F(K_1, m) = P_u/P_u^0$ и $F(m) = S(t)/S_\infty$ установлено, что постоянной нагрузке процесс фильтрационной консолидации завершается при $m = 5,4$. Продолжительность периодов консолидации t_K определяется при различных внешних нагрузках, после чего вычисляются значения коэффициента консолидации в виде $C_v = 4mh/\pi^2 t_K$. При этом высота образца h равна длине пути фильтрации, когда образцы дренируются на верхних торцах.

Полученные значения C_v (м²/сут) пастообразных глинистых пород при внешнем давлении 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 МПа использованы при построении

графиков зависимостей $\ln C_v = f(q)$ и определении из них значений λ' и C_v^0 .

Сопоставление значений C_v , полученных различными способами, позволило сделать вывод, что из-за использования формулы $C_v = f(K_\phi, \varepsilon_{\text{ср}}, a)$ для определения коэффициента консолидации происходит существенное занижение сроков уплотнения породных масс. Указанное положение объясняется низкой точностью лабораторного определения коэффициентов фильтрации глинистых грунтов (возможны ошибки на порядок и более), а также спрямлением компрессионной зависимости (при вычислении a и $\varepsilon_{\text{ср}}$ для весьма значительного диапазона уплотняющего давления 0 - 0,8 МПа. Преимуществом обработки экспериментальных данных по формулам Ю. К. Зарецкого является учет нелинейного характера зависимости $\varepsilon = f(q)$ и использование отношений $K_\phi(q)/K_\phi^0$ (а не абсолютных величин).

Предложенный способ получения зависимости $C_v(q)$ по данным опытов на консолидацию является наиболее простым и надежным, так как он позволяет определять одновременно параметры λ' и C_v^0 без нахождения K_ϕ .

С учетом вышеизложенного соотношение для определения значений C_v (м²/сут) имеет вид:

$$C_v = 2,189h^2/t_K, \quad (4)$$

где h — высота образца, м.

Относительная осадка представлялась в виде:

$$S(t_k)/h = q(a_{0\text{ перв}} U_{\text{перв}} + a_{0\text{ вт}} U_{\text{вт}}), \quad (5)$$

$$S(t_k)/qh = a_0 = a_{0\text{ перв}} + a_{0\text{ вт}} [1 - \exp(-\delta_1 t)]. \quad (6)$$

Общий и первичный (до достижения $P_u = 0$) коэффициенты сжимаемости определяются из графиков $S/h = f(t)$, коэффициент сжимаемости $\alpha_{0\text{ вт}}$ на период вторичной консолидации) — из формулы $S(t_k)/qh$ (6).

Определенные параметры ползучести могут быть использованы для расчетов полных осадок сжимаемых слоев для описания процесса развития осадок в период вторичной консолидации.

Структурно-механические параметры могут использоваться для контроля устойчивости сухих отвалов, размещенных на гидроотвалах. На основании по-

лученных исходных данных определяется продолжительность периодов достижения разрушающих сдвиговых деформаций в тонкодисперсных грунтах гидроотвалов, что позволяет регламентировать режим отсыпки и конструкцию сухих отвалов на намывных основаниях.

Также во второй главе рассмотрен акустический корреляционный метод межскважинного прозвучивания (АКММП). Показано, что применение АКММП позволит получать важную информацию о ходе и завершении процесса консолидации намывных грунтов. В отличие от получаемых традиционными скважинными измерениями данных о динамике порового давления намывных грунтов, а также изменений их прочностных и деформационных свойств указанная информация носит интегральный и непрерывный характер. АКММП предполагает использование для прозвучивания исследуемой геосферы акустического шумового стационарного сигнала и измерение его корреляционных характеристик в точке приема, применение такого сигнала позволяет повысить базы прозвучивания за счет значительной «закачиваемой» в массив акустической энергии и ее последующего интегрирования на приемном конце измерительного тракта. Кроме того, информативные параметры, получаемые в результате корреляционной обработки принятого сигнала, чрезвычайно чувствительны как к структурным неоднородностям массива, так и к их изменениям во времени и в пространстве. Однако до настоящего времени попыток применения АКММП для исследования процессов консолидации тонкодисперсных отложений не предпринималось. В качестве первого шага на пути такого применения было необходимо провести физическое моделирование, результаты которого представлены ниже.

Идея эксперимента заключалась в установлении зависимости корреляционных параметров ультразвукового шумового сигнала (рисунок 1), проходящего через исследуемый участок массива, от уровня механического нагружения, эмитирующего продолжение процессов отвалообразования. Водно-физические свойства и гранулометрический состав намывных суглинков приведены в таблицах 1 и 2.



Рисунок 1 – Алгоритм обработки принимаемого шумового сигнала

Таблица 1 – Водно-физические свойства исходных намывных суглинков

Плотность минеральных частиц, т/м ³	2,68
Плотность сухого грунта, т/м ³	1,51
Пористость, %	43,94
Коэффициент пористости	0,784
Коэффициент водонасыщения	0,98
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,0044

Таблица 2 – Гранулометрический состав

Размер фракции, мм	>0,05	0,05 – 0,002	0,002 – 0,001	< 0,001
Содержание, %	18,37	42,2	11,7	27,73

Консолидация суглинков под действием дополнительной нагрузки до уровня $\sigma_{max} = 1 \text{ МПа}$ с шагом $\Delta\sigma = 0,1 \text{ МПа}$. На каждом шаге нагружения начиная с $\sigma = 0$ измерялась дисперсия принимаемого сигнала $B(0)$ и его интервал корреляции $\tau_{ук}$. Таким образом, реализовывался автокорреляционный метод контроля. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

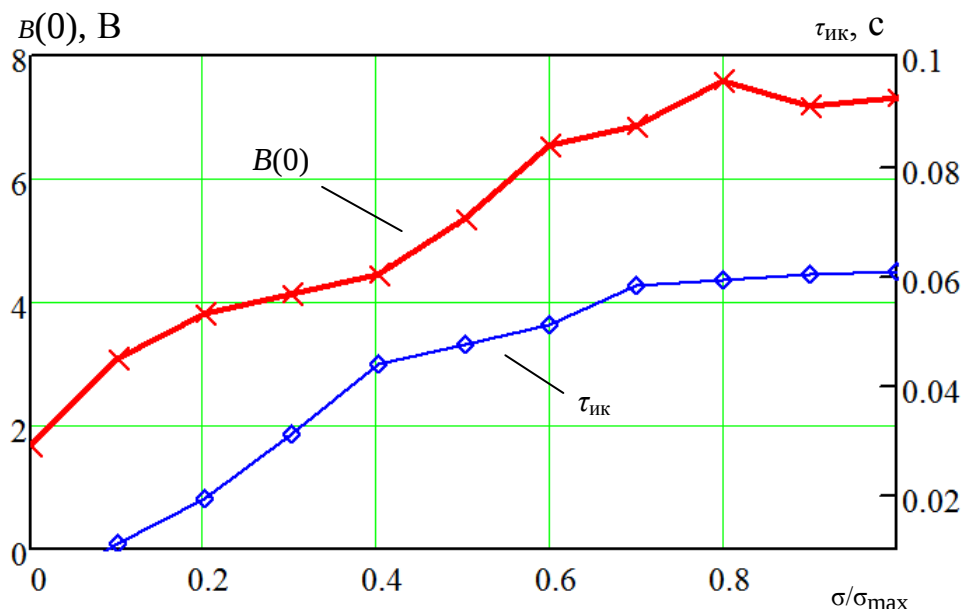


Рисунок 2 – Зависимости величин $B(0)$ и $\tau_{\text{ИК}}$ от прикладываемой нагрузки σ

Как видно из рисунка 2 оба информативных параметра корреляционного контроля возрастают с увеличением нагрузки до уровня $(0.7 \div 0.8) \sigma_{\max}$. Далее с увеличением σ параметры $\tau_{\text{ИК}}$ и $B(0)$ существенно не изменяются. Такое поведение информативных параметров можно объяснить завершением консолидации суглинков, прекращением процесса их уплотнения и выходом максимального количества свободной воды.

В третьей главе обобщены материалы районирования для объектов КМА и Кузбасса: гидроотвалы «Березовый Лог», «Балка Чуфичева» Лебединского ГОКа КМА, гидроотвал «Лог Шамаровский» Михайловского ГОКа КМА, гидроотвал «Бековский» разреза Бачатский.

Приведены результаты расчетов степени уплотнения и несущей способности различных зон гидроотвалов во времени.

Для эффективного использования территорий гидроотвалов необходимо обладать надежной информацией о состоянии гидроотвала и уметь прогнозировать поведение намывных оснований во времени. В частности, при использовании территорий гидроотвалов для размещения сухих отвалов или при рекультивации большое значение имеют несущая способность намывных масс и изменение ее во времени.

Способ инженерно-геологического районирования территорий гидроотвалов предусматривает обязательный учет изменения во времени несущей способности намывных массивов пляжных, промежуточных и прудковых зон гидроотвалов. Материалы районирования (графики $P_{доп}$ и карты) использованы для обоснования размещения дополнительных объемов гидравлической или сухой вскрыши в контурах действующих или заполненных гидроотвалов и ускоренной подготовки их территорий к рекультивации.

Рассматривается порядок пользования разработанной с участием автора на кафедре Геологии и маркшейдерского дела программой расчетов порового давления, степени уплотнения, осадок и величины допустимых нагрузок $P_{доп}$ для различных стадий формирования намывных массивов.

Программа для определения порового давления, несущей способности и осадок гидроотвалов *porup.exe* создана в 2016 году. Показана реализация программы расчета уплотнения в слое переменной мощности применительно к условиям гидроотвала «Лог Шамаровский».

В четвертой главе приводится обоснование мероприятий по освоению техногенных массивов.

При размещении техногенных массивов на слабых естественных и намывных основаниях учет степени уплотнения слоев тонкодисперсных отложений позволяет оценить несущую способность слабых оснований и определить рациональную конструкцию и режим формирования откосных сооружений (т.е. высоту отвальных ярусов, ширину бермы предотвала, угол естественного откоса, темп подвигания отвального фронта).

Через величину степени уплотнения U определяются характеристики сопротивления сдвигу:

$$\varphi(U) = \varphi_3 + (\varphi_k - \varphi_3) U; \quad (7)$$

$$C(U) = C_3 + (C_k - C_3) U, \quad (8)$$

где U – степень уплотнения;

φ – угол внутреннего трения;

C – сцепление;

$\varphi_k, C_k, \varphi_3, C_3$ – соответственно величина φ и C для консолидированного

состояния глинистых грунтов и в условиях закрытой системы (без возможности дренажа) по данным трехосных (стабилометрических) испытаний.

Параметры φ и C используются при расчете несущей способности оснований с учетом коэффициента пригрузки.

Степень уплотнения U_{Σ} и общая осадка намывного слоя S_{Σ} определяется способом суперпозиции

$$S_{\Sigma} = U_{\Sigma} S_{\infty}^{\Sigma}. \quad (9)$$

Расчет максимальной несущей способности основания выполняют по формуле Прандтля-Рейснера.

После анализа расчетных значений степени уплотнения, несущей способности, осадок намывного массива и динамики формирования их во времени, предложен комплекс работ по рекультивации гидроотвала.

На территории гидроотвала предлагается выполнить намыв в правом рукаве хвостов обогащения для того, чтобы вытеснить воду и уплотнить слабые грунты прудковой зоны. Затем в левом рукаве гидроотвала создать орнитологический пруд. После рекультивировать правый рукав намывного массива. На рисунке 3 показаны зависимости допустимых нагрузок $P_{дон}$ на намывное основание от времени отдыха гидроотвала $t_{отд}$ при мощности слоя $H=10 \text{ м}, 15 \text{ м}, 20 \text{ м}$ при внешних нагрузках $q_{вн}=0 \text{ МПа}$ (уплотнение слоя под действием собственного веса); $q_{вн}=0,1 \text{ МПа}$.

Со временем по окончании отсыпки отсечной дамбы в правом рукаве гидроотвала на образовавшуюся территорию намывают хвосты обогащения.

Далее на момент завершения намыва хвостов обогащения осуществляют рекультивационные работы гидромеханизированным способом. Землесосный снаряд формирует резервуар для орнитологического пруда в левом рукаве гидроотвала, при этом земснаряд производит складирование грунтов в правый рукав поверх хвостов обогащения. Потенциально плодородные грунты создают защитный слабоводопроницаемый слой мощностью около 0,5 м.

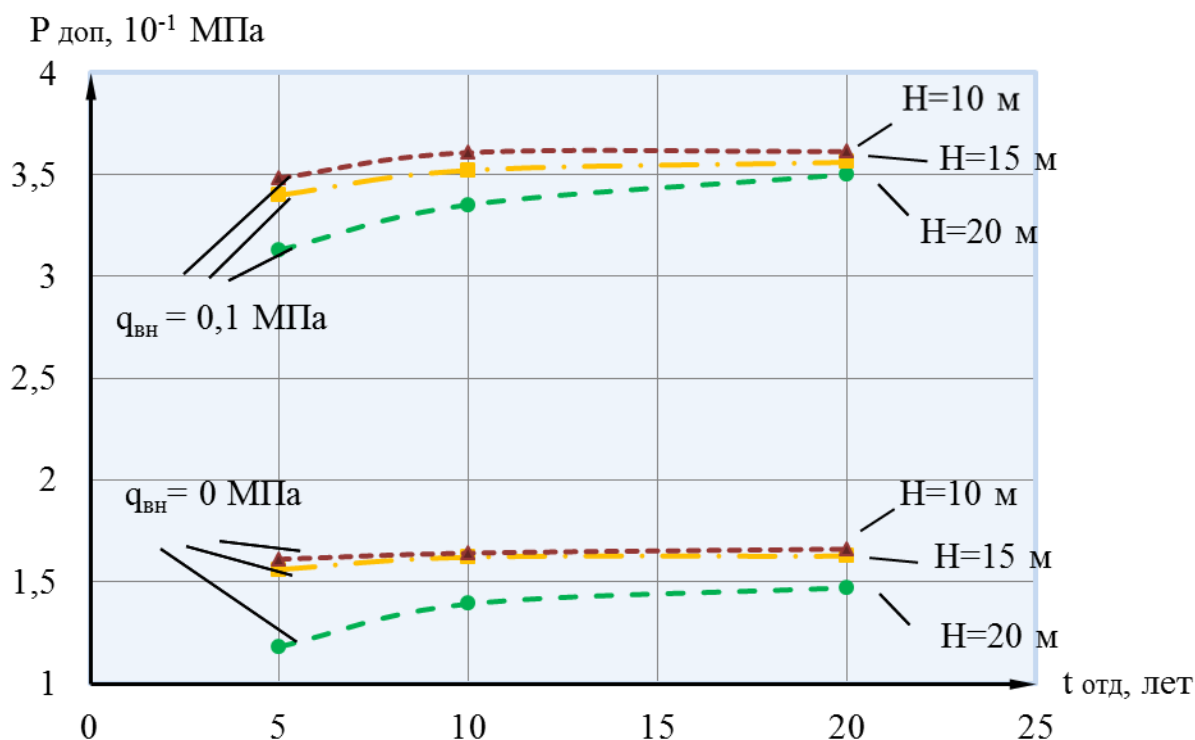


Рисунок 3 – Зависимости допустимых нагрузок $P_{\text{доп}}$ на намывное основание от времени отдыха гидроотвала $t_{\text{отд}}$ при мощности слоя $H=10$ м, 15 м, 20 м при внешних нагрузках $q_{\text{вн}}=0$ МПа (уплотнение слоя под действием собственного веса); $q_{\text{вн}}=0,1$ МПа кг/см²

Использование теории фильтрационной консолидации позволяет оценивать во времени уплотняемость и несущую способность намывных отложений тонкодисперсных пород, что является основой для разработки эффективных мероприятий по освоению техногенных массивов.

Применительно к условиям отвала фосфогипса, образующегося в результате переработки фосфатного сырья на ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», произведены расчеты устойчивости насыпи и расчеты уплотнения в пределах трех зон общей мощностью до 120 метров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача совершенствования методов оценки уплотняемости и несущей способности техногенных массивов тонкодисперсных отложений для повышения вместимости отвальных сооружений и эконо-

мии земельных ресурсов.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Установлено, что методика расчета уплотнения отвальных массивов и естественных слабых оснований должна учитывать нелинейную зависимость коэффициента консолидации от уплотняющих нагрузок, обусловленных собственным весом сжимаемого слоя переменной мощности и вышележащих слоев.

2. Показано, что несущую способность отвального массива следует определять как функцию сцепления и угла внутреннего трения с учетом зависимости сцепления и угла внутреннего трения линейного вида, получаемых при трехосных испытаниях.

3. Предложено проводить инженерно-геологическое районирование с учетом предварительно определяемых зависимостей несущей способности от времени «отдыха», устанавливаемых дифференцированно для различных участков, исходя из мощности и степени уплотнения намывных отложений, характера фракционирования и физико-механических показателей.

4. На основе проведенного лабораторного моделирования показано, что для оценки состояния техногенных массивов и их оснований в процессе уплотнения необходимо сочетать традиционные точечные скважинные измерения с интегральными измерениями на основе акустического прозвучивания техногенного массива шумовыми сигналами с их последующей корреляционной обработкой.

5. На основании произведенного инженерно-геологического районирования обоснована возможность размещения дополнительных объемов гидравлической или сухой вскрыши в контурах гидроотвалов и ускоренная подготовка их территорий к рекультивации.

6. Разработан алгоритм и программа для компьютерных расчетов порового давления, степени уплотнения, осадок и величины допустимых нагрузок $P_{дон}$. Применительно к условиям гидроотвала «Лог Шамаровский» произведен

расчет по компьютерной программе для различных стадий формирования намывного массива.

7. Применительно к условиям складирования отходов фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» показано, что при оценке устойчивости техногенного массива в условиях наращивания отвала до высоты 120 м величина суммарных осадок отвального массива составит около 6 м, что позволит дополнительно разместить 2,5 млн. м³ фосфогипса и исключить изъятие около 10 га территории.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Демченко А.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Применение теории консолидации грунтов для обоснования технологии формирования намывных горнотехнических сооружений // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №4. – С. 63-64.

2. Пантюхина (Семенова) Е.А. Применение теории консолидации грунтов для решения горно-технологических задач // Маркшейдерия и недропользование. – 2015. – №4 (77). – С. 38-40.

3. Гальперин А.М., Ческидов В.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Совершенствование системы удаленного гидрогеомеханического мониторинга откосных сооружений ОАО «Стойленский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №11. – С. 342-350.

4. Гальперин А.М., Семенова Е.А. Прогноз геомеханических процессов на горных предприятиях на основе теории консолидации породных массивов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2016. – №2. – С. 111-120.

5. Семенова Е.А. Обоснование определения параметров хранилища фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» // Деп. рук.

№ 1083/9-16 от 27 июня 2016 г. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №9, 2016 г. – 10 с.

6. Семенова Е.А. Исследование влияния консолидации тонкодисперсных отложений на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016, - №9, (специальный выпуск №24). Отдельная статья. – 8 с.

В прочих изданиях:

7. Ческидов В.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Способы представления экспериментальных данных при обосновании плотности сети инженерно-геологических исследований техногенных массивов // Сборник научных докладов научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи путь к обществу, основанному на знаниях». – 2010. – С. 210-211.

8. Ческидов В.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Способы представления экспериментальных данных при обосновании плотности сети инженерно - геологических исследований техногенных массивов // Научный вестник МГГУ. – 2010. – № 1. – С. 41-47.

9. Ческидов В.В., Пантюхина (Семенова) Е.А., Кириченко Ю.В. Разработка математического обеспечения САПР для построения сетей исследования техногенных массивов для управления их состоянием // Сборник научных докладов научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи путь к обществу, основанному на знаниях». – 2011. – С. 260-262.

10. Демидов А.В., Пантюхина (Семенова) Е.А., Кириченко Ю.В., Ческидов В.В. Перспективы использования кластерного и дисперсного анализов при проектировании сетей инженерно-геологических изысканий на намывных техногенных массивах // Научный вестник МГГУ. – 2011. – № 3 (12). – С. 116-120.

11. Ческидов В.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Анализ методов прогнозирования процессов уплотнения намывных горнотехнических сооружений с целью обоснования природоохранных мероприятий // Научный вестник МГГУ. – 2013. – № 7 (40). – С. 63-68.

12. Демидов А.В., Пантюхина (Семенова) Е.А. Разработка мероприятий по повышению вместимости хвостохранилища ОАО «Стойленский ГОК» // Сборник научных докладов научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи путь к обществу, основанному на знаниях». – 2012. – С. 116-118.
13. Демидов А.В., Пантюхина (Семенова) Е.А., Ческидов В.В. Мониторинг потенциально оползневых склонов в районе строительства олимпийский объектов. // Сборник научных докладов научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи путь к обществу, основанному на знаниях». – 2014. – С. 30-33.
14. Galperin A.M., Pantyukhina (Semenova) E.A. The assessment of compactibility and bearing capacity of the filed finely-dispersed sediments // Proceedings of the XIII National conference with international participation of the open and underwater mining of minerals. – Varna, Bulgaria, 2015. – P. 253-257.