

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС»

*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

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель  
доцент, к.т.н. Щёкина М.В.**

**Москва**

**2016**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                       | 4  |
| Глава 1 Современное состояние методов оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов.....                             | 10 |
| 1.1 Анализ методов применения теории консолидации в горном деле.....                                                                 | 10 |
| 1.2 Уплотнение и несущая способность намывных и слабых оснований.....                                                                | 17 |
| Выводы по 1 главе.....                                                                                                               | 22 |
| Глава 2 Лабораторные исследования намывных и естественных тонкодисперсных отложений.....                                             | 23 |
| 2.1 Исходные положения нелинейной фильтрационной консолидации.....                                                                   | 23 |
| 2.2 Определение консолидационных параметров и характеристик ползучести тонкодисперсных отложений.....                                | 28 |
| 2.3 Исследование влияния консолидации тонкодисперсных отложений на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала..... | 41 |
| Выводы по 2 главе.....                                                                                                               | 46 |
| Глава 3 Инженерно-геологическое районирование намывных территорий.....                                                               | 48 |
| 3.1 Принципы районирования.....                                                                                                      | 48 |
| 3.2 Обобщение материалов районирования для объектов КМА и Кузбасса.....                                                              | 49 |
| 3.3 Реализация программы расчета уплотнения в слое переменной мощности применительно к условиям гидроотвала «Лог Шамаровский».....   | 60 |
| Выводы по 3 главе.....                                                                                                               | 68 |

|            |                                                                                            |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Глава 4    | Обоснование мероприятий по освоению техногенных массивов.....                              | 69 |
| 4.1        | Комплексное использование территории гидроотвала «Лог Шамаровский».....                    | 69 |
| 4.2        | Определение параметров хранилища фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»..... | 73 |
| 4.2.1      | Устойчивость отвалов слабых пород на прочном основании.....                                | 82 |
| 4.2.2      | Расчеты уплотнения отвального массива.....                                                 | 87 |
|            | Выводы по 4 главе.....                                                                     | 92 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | .....                                                                                      | 93 |
|            | Список литературы.....                                                                     | 95 |

## ВВЕДЕНИЕ

**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 подго-

товке 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 те-

матике 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 тонкодисперсных отложений для повышения вместимости отвальных горно-технических 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 линейные зависимости сцепления  $C(U)$  и угла внутреннего трения  $\varphi(U)$  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 состояний 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 дополни-



тельных 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.

## **Глава 1 Современное состояние методов оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов**

### **1.1 Анализ методов применения теории консолидации в горном деле**

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.

При формировании техногенных массивов из связных пород или при их наличии в основаниях поведение системы «техногенный массив – основание» определяется характером процессов уплотнения и развития сдвиговых деформаций, которые во многом определяют изменение инженерно-геологических свойств отложений во времени. В глинистых слоях под действием вышележащей нагрузки и процесс его рассеивания протекает весьма длительное время (от нескольких лет до нескольких десятилетий). Скорость рассеивания порового давления необходимо иметь в виду при определении темпов отвалообразования. При создании слоистых отвалов следует выбирать рациональный порядок укладки слоев различной водопроницаемости для максимально возможного уплотнения глинистых слоев и увеличения вместимости сооружений [1, 2].

Уплотнением (консолидацией) породы называется процесс более плотной укладки минеральных частиц под действием нагрузки, который сопровождается уменьшением пористости-влажности и повышением плотности породы [3, 4, 5]. При уплотнении водонасыщенной глинистой породы в поровой воде возникает избыточное давление, называемое поровым [4, 5].

Сопротивление сдвигу на любой площадке определяется:

$$\tau = C' + (\sigma - P_u) \operatorname{tg} \varphi', \quad (1.1)$$

где  $C'$  – сцепление для консолидированной породы (определено по эффективным напряжениям);

$\varphi'$  – угол внутреннего трения для консолидированной породы (определен по эффективным напряжениям);

$\sigma$  – полное нормальное напряжение;

$P_u$  – поровое давление.

Как видно из выражения (1.1), по мере уплотнения и понижения (рассеивания) давления в поровой воде сопротивление сдвигу растет, приближаясь к величине сопротивления стабилизированной породы [4]. Поэтому возникает практический интерес к определению порового давления и изучению изменений его во времени. Характер уплотнения глинистой породы значительно изменяется при наличии в порах защемленного воздуха. Наличие вязкого трения (ползучести минерального скелета) и газообразной составляющей, обладающей демпфирующими свойствами, приводит к понижению порового давления и возрастанию степени уплотнения вторичной консолидации в общей осадке [4]. При доле защемленного воздуха в 5% от общего объема пор величина порового давления снижается на 30-40%, роль ползучести минерального скелета увеличивается при повышении плотности породы [5, 6].

Отечественные и зарубежные авторы посвящали многочисленные труды вопросам теории консолидации многофазных грунтов. Основной вклад в изучении этих вопросов внесли В. А. Флорин, Н. М. Герсеванов, К. Терцаги, Ю. К. Зарецкий, Л. Шукле [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Основные направления теории консолидации:

1) Рассматривающие процесс уплотнения двухфазного грунта как результат отжатия воды из пор грунта под воздействием нагрузки (фильтрационная или "первичная" консолидация) [14];

2) Учитывающие влияние на процесс уплотнения реологических свойств скелета, сжимаемости поровой жидкости, вязкости связанной воды, а также взаимодействие фаз [6, 14].

Ю. К. Зарецкий отмечает, что имеющиеся теории различаются друг от друга полнотой описания уравнений состояния грунта, характером взаимодействия отдельных фаз грунта, определяющего формы связи между напряжениями и деформациями грунтовой системы, и закономерностей отношения фаз в единице объема в процессе консолидации [8, 14, 15].

Первые решения теории уплотнения двухфазной земляной среды в постановке одномерной задачи были получены К. Терцаги [12] и Н. М. Герсевановым. Д. Е. Польшиным получено решение о начальном распределении напряжений в полностью водонасыщенном основании после приложения равномерно распределенной полосовой нагрузки (плоская задача) и осуществлена постановка пространственной задачи [7].

Теория фильтрационной консолидации Терцаги-Герсеванова получила дальнейшее развитие в трудах Н. Н. Веригина, В. Г. Короткина, М. В. Малышева, В. П. Сипидина, В. А. Флорина, Н. А. Цытовича, Л. Рендулика, Н. Карильо, Р. Гибсона, Д. Тейлора и др [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

В. А. Флориным при обобщении одномерной задачи на трехмерный случай предложена "основная модель", базирующаяся на принципе гидроемкости Н. М. Герсеванова, и принципе постоянства в процессе уплотнения полных напряжений, которые принимаются равными напряжениям после окончания уплотнения породы под действующими нагрузками. Для учета объемных сил используется модель "объемных сил" Флорина-Био; теория, основанная на этой модели, рассматривается как развитие теории фильтрационной консолидации, использующей "основную модель". Модель "объемных сил" используется в работах Тан Тьонг-Ки, Р. Гибсона, И. Манделя, В. Н. Николаевского, Ю. К. Зарецкого [7, 8, 19, 24, 25].

Наибольшей полнотой отличается предложенная Ю. К. Зарецким теория, основные выводы которой подтверждаются данными экспериментов

[8]. Деформирование во времени многофазного грунта рассматривается Ю. К. Зарецким как результат одновременного развития процесса формоизменения (сдвига) во времени "скелета" грунта и процесса изменения объема. При этом развитие первого процесса объясняется деформированием вязких связей между минеральными частицами, второго - взаимным перемещением фаз грунта и объемными деформациями скелета грунта.

Если по теории Терцаги-Герсеванова компрессионная зависимость (без учета ползучести скелета) записывается в виде:

$$\varepsilon_0 - \varepsilon = a_k q - a_k P_u \quad (1.2),$$

то по Ю. К. Зарецкому

$$\varepsilon_0 - \varepsilon = a_k q - \frac{a_k}{\beta} P_u \quad (1.3),$$

где  $\varepsilon_0, \varepsilon$  — значения коэффициента пористости, соответственно, начальное и при внешней уплотняющей нагрузке;

$q$  — внешняя уплотняющая нагрузка;

$P_u$  — поровое давление;

$\beta$  — коэффициент бокового давления;

$a_k$  — коэффициент сжимаемости при компрессии.

Принятая Ю. К. Зарецким обобщенная модель объемных сил Флорина-Био учитывает переменность коэффициента Пуассона, внутриобъемное набухание грунтов и ползучесть скелета грунта с использованием теории наследственной ползучести. Общие уравнения трехмерной консолидации многофазных грунтов с учетом ползучести скелета, полученные Ю. К. Зарецким, включают как частные случаи теории ползучести грунтов В. А. Флорина и Тан Тьонг Ки.

Значительный вклад в развитие теории консолидации многофазных грунтов внесен Н. М. Гольдштейном, А. И. Ксенофонтовым, З. Г. Тер-Мартirosяном, Тан Тьонг Ки, Д. Тейлором, Л. Шукле и др [13, 24, 26, 27, 28].

В докторской диссертации А.З. Тер-Мартirosяна рассмотрено современное состояние методов количественной оценки НДС водонасыщенных массивов грунтов, взаимодействующих с подземными конструкциями зданий и сооружений. В обзоре рассмотрены история развития методов количественной оценки НДС водонасыщенных массивов грунтов; использование теории фильтрационной консолидации при прогнозе осадок оснований фундаментов конечной ширины; влияние ползучести скелета на НДС водонасыщенного грунта; влияние среднего давления на деформации ползучести скелета грунта; взаимодействие свай с окружающим и подстилающим водонасыщенными грунтами [30].

Динамика порового давления исследовалась преимущественно в лабораторных условиях Я. Л. Коганом, С. Р. Месчаном, А. А. Ничипоровичем, В. М. Павилонским, С. С. Бабицкой [31-36].

Определению величины коэффициента порового давления, оценке влияния сжимаемости поровой жидкости и связанной воды на развитие процесса уплотнения посвящены работы Н. Я. Денисова, А. И. Ксенофонтова, З. Г. Тер-Мартirosяна, В. И. Сипидина, Н. Н. Сидорова, Р. Э. Дашко [27, 29, 37, 38, 39].

Влияние скелета грунта на механизм передачи нагрузки на поровую воду изучалось Н. Н. Масловым [40, 41].

При уплотнении глинистых пород до определенных значений пористости наблюдается явление начального градиента. Специальными исследованиями процесса консолидации глинистых пород с учетом начального напорного градиента занимались В. А. Флорин, С. А. Роза, М. Ю. Абелев, Э. М. Добров [19, 42-45].

Применительно к условиям депрессионного уплотнения глинистых толщ широкий комплекс экспериментальных исследований явления начального градиента на универсальных стабилometрах ВАОГЕМ выполнен Н. П. Верецагиным [46].

Процессы консолидации глинистых водонасыщенных пород на горно-промышленных объектах главным образом изучались для решения задач обеспечения устойчивости отвалов на слабых основаниях. Имеется репрезентативный объем информации по вопросам фильтрационной консолидации однородных многослойных оснований отвалов, других насыпей или дамб гидротехнических сооружений [3, 47-53].

Представительные исследования слабых грунтов выполнены М. Ю. Абелевым. По М. Ю. Абелеву к слабым следует относить связные грунты, имеющие прочность на сдвиг в условиях природного залегания при испытании устройством вращательного среза менее 0,075 МПа, удельное сопротивление статическому зондированию конусом с углом при вершине  $\alpha = 30^\circ$  менее 0,02 МПа либо модуль осадки при нагрузке 0,25 МПа более 50 мм/м (модуль деформации ниже 5 МПа). При отсутствии данных испытаний к слабым грунтам следует относить: торф и заторфованные грунты, илы, сапропели, глинистые грунты с коэффициентом консистенции более 0,5, иольдиевые глины, грунты мокрых солончаков [54]. К слабым водонасыщенным глинистым грунтам относят грунты различного происхождения (аллювиальные, морские, делювиальные и т.д.), которые в итоге литогенеза или остальных природных причин стали сильносжимаемыми и водонасыщенными. К данной группе относят илы, ленточные глины, водонасыщенные лессовые макропористые и заторфованные грунты, а также намывные тонко-дисперсные грунты (гидроотвалы, хвостохранилища) [44, 45, 55-59].

Особое место занимают задачи уплотнения пород тела отвальных насыпей. Методы определения порового давления в водонасыщенных породах насыпей являются весьма приближенными вследствие сложности граничных условий данной задачи. Решение плоской задачи фильтрационной консолидации насыпей с использованием способа конечных разностей рассмотрено в монографии В. А. Флорина [19]. Теоретическая оценка процессов уплотнения насыпей для плоской задачи дана также Ф. Шлоссером, предпринявшим попытку учета вторичных временных эффектов [60]. Учет не-

стабилизированного состояния породных масс при оценке устойчивости откосов целесообразно осуществлять с использованием инженерных методов предельного равновесия по слабейшим поверхностям, положение которых устанавливается подбором. Термин "метод предельного равновесия" введен Г. Л. Фисенко [50-52] при выделении двух основных групп задач в рамках разработанной В. В. Соколовским [61] теории предельного равновесия сыпучей среды и относится к задачам, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется лишь на внутренней границе некоторой области массива. Использование методов предельного напряженного состояния сыпучей среды (решающих задачи, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется в каждой точке некоторой области) для оценки устойчивости водонасыщенных породных масс с учетом их нестабилизированного состояния вызывает потребность в совместном решении системы уравнений предельного равновесия и теории уплотнения. Совместное решение вызывает большие затруднения [62], т.к. очертание линий скольжения зависит от объемных изменяющихся во времени фильтрационных сил, а значения напоров зависят от напряжений в условиях предельного равновесия. Для оценки устойчивости карьерных откосов в условиях нестабилизированного состояния слагающих их пород наиболее пригодны инженерные методы алгебраического суммирования сил (или касательных напряжений при криволинейном паспорте прочности породы) или многоугольника сил в зависимости от формы поверхности (линии) скольжения [50, 63].

Выполненные к настоящему времени теоретические исследования в области ползучести горных пород и консолидации грунтов обеспечили получение многочисленных аналитических решений.

Эти методы решения, несмотря на их теоретическую строгость в пределах поставленных задач, далеко не всегда могут быть использованы для прогноза динамики геомеханических процессов на карьерах по следующим причинам:



- 1) отсутствует четкая дифференциация предлагаемых решений для пород различных инженерно-геологических классов;
- 2) имеющиеся методы решения задач ползучести и консолидации не учитывают динамики горных работ и требуют трудоемкого, преимущественно лабораторного, определения многочисленных исходных показателей;
- 3) слабо разработаны пригодные для широкого использования в проектной и производственной практике инженерные расчетные методы, которые, несмотря на их меньшую точность в механико-математическом отношении, были бы более правомерными с позиций учета физической природы описываемых процессов (как это, например, имеет место применительно к разработанным Г. Л. Фисенко инженерным методам расчета устойчивости карьерных откосов);
- 4) не были составлены программы расчета уплотнения тела и основания отвальных сооружений с учетом динамики их формирования и перерывов в наращивании.

## **1.2 Уплотнение и несущая способность намывных и слабых оснований**

Необходимо производить проверку несущей способности тонкодисперсных грунтов с использованием методов предельного напряженного состояния при оценки устойчивости сухих техногенных массивов, расположенных на слабых намывных и естественных основаниях, а также при решении вопросов рекультивации внутренних зон гидроотвалов и хвостохранилищ [51, 64, 65, 66, 67].

Для планирования работ по дальнейшему использованию намывных территорий необходимо определить продолжительность периода консолидации тонкодисперсных водонасыщенных грунтов [67]. Несущая способность тонкодисперсных грунтов возрастает в процессе их консолидации, что поз-

воляет производить рекультивацию территории, а также формировать сухие отвалы на намывных основаниях [1, 59, 64].

Время «отдыха» намывных тонкодисперсных грунтов определяется на основании решения задач уплотнения и предельного напряженного состояния грунтов. При создании песчаных призм в намывных и естественных слабых отложениях и блоковой отсыпке отвальных насыпей нагрузка от них принимается как полосовая, а при учете действия массы оборудования, используемого при рекультивации – как прямоугольная.

Различаются начальное критическое давление  $P_n$ , при котором порода находится в фазе уплотнения, и предельное критическое давление  $P_{np}^{kp}$ , при котором исчерпывается полностью несущая способность грунта [3, 4, 15]. Для ориентировочного определения несущей способности слабых оснований  $P_{np}^{kp}$  сравнивается с действующими нагрузками:

$$P_{np}^{kp} = 5,14 C + q, \quad (1.4)$$

где  $q$  – давление от подушки из дренирующего материала, предварительно укладываемой для подготовки слабых оснований (при отсутствии подушки  $q=0$ ) [4, 5].

Для осесимметричной пространственной задачи (площадь загрузки ограничена кругом или квадратом)

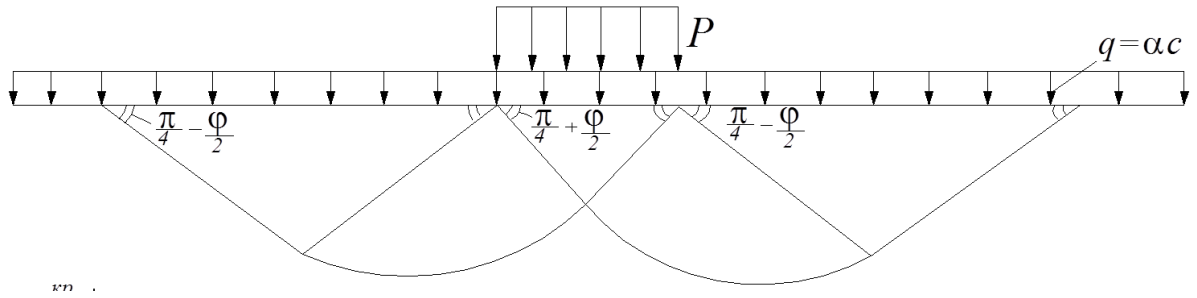
$$P_{np}^{kp} = 5,7 C + q, \quad (1.5)$$

где  $q$  – предварительно приложенное к основанию уплотняющее давление (от предотвала или намывной подушки), равное  $\alpha C$  [4, 5].

Для оценки максимально несущей способности основания используется формула Прандтля-Райснера:

$$\frac{P_{np}^{kp}}{C} = \frac{(\alpha + \operatorname{ctg} \varphi)(1 + \sin \varphi) \exp(\pi \operatorname{tg} \varphi) - \operatorname{ctg} \varphi (1 - \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)}, \quad (1.6)$$

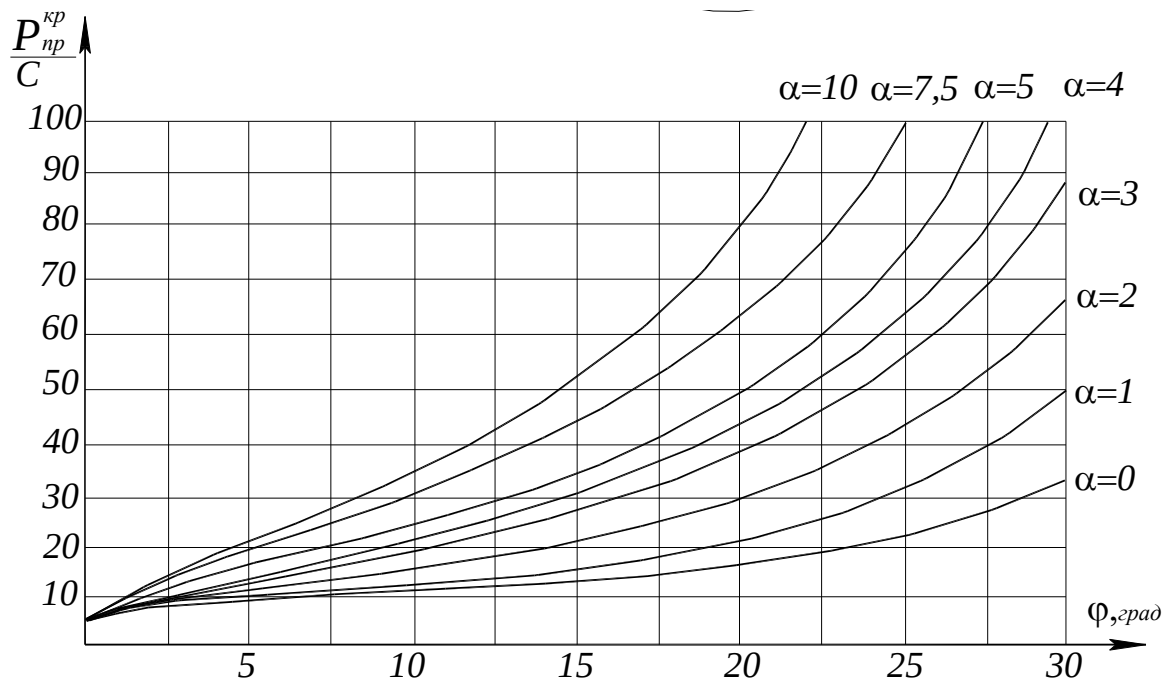
Расчетная схема к оценке несущей способности слабых оснований изображена на рисунке 1.1.



**Рисунок 1.1** – Расчетная схема к оценке несущей способности слабых оснований

На рисунке 1.2 для расчетов по формуле (1.6) при  $\alpha = 0 \div 10$  построен график к определению  $P_{np}^{kp}/C$  в зависимости от угла  $\varphi$  [4]. Тогда коэффициент пригрузки будет равен:

$$\alpha = \frac{q}{c}, \quad (1.7)$$



**Рисунок 1.2** – Графики зависимости  $P_{np}^{kp} / C$  от  $\varphi$  при различных значениях  $\alpha$

А несущая способность основания по отношению к заданной нагрузке  $P_{дон}$  обеспечивается при выражении:

$$P_{дон} = \frac{P_{np}^{kp}}{\eta}, \quad (1.8)$$

где  $\eta$  – коэффициент запаса ( $\eta=1,2$ ) [4, 5, 59, 68, 69].

В применении к задачам определения длительности «отдыха» намывных массивов с точки зрения их рекультивации либо укладки «сухих» отвалов рассматривается уплотнение выделяемых из намывной толщи расчетных слоев, мощность которых  $h_p$  определяется глубиной залегания нижней границы области предельного состояния намывных грунтов с учетом условия [4, 40]:

$$\tau_{max} = \tau_k, \quad (1.9)$$

где  $\tau_{max}$  – максимальное касательное напряжение, равное  $0,3P$  при полосовой нагрузке интенсивностью  $P$ ;

$\tau_k$  – сопротивление грунтов сдвигу (вращательному срезу) [1, 2, 4].

С применением решения задачи об уплотнении намывного слоя (переменной мощности) под действием своей собственной массы слагающих его грунтов после завершения намыва по графикам зависимостей для известных значений степени уплотнения  $U$  и параметра  $\mu$ :

$$\mu = \frac{hv_n}{C_v}, \quad (1.10)$$

где  $h$  – мощность слоя, м;

$v_n$  – скорость намыва, м/год;

$C_v$  – коэффициент консолидации породы, м<sup>2</sup>/год.

Далее определяется параметр  $m$  [1, 2, 4, 70]:

$$m = \frac{\pi^2 C_v t_0}{4h_p^2}, \quad (1.11)$$

где  $t_0$  – время «отдыха» слоя, год.

Время «отдыха» слоя  $t_0$ , по окончании которого территорию гидроотвала можно использовать для дальнейших работ, определяется из соотношения:

$$t_0 = \frac{4mh_p^2}{\pi^2 C_v}, \quad (1.12)$$

Предложенная А.М. Гальпериным [1, 2, 70] методика позволяет решать следующие группы задач:

- определение степени уплотнения техногенных массивов (аналитическим путем или посредством полевых замеров порового давления) с дальнейшим установлением величины допустимых внешних нагрузок;

- установление времени «отдыха» гидроотвала в зависимости от величины внешней нагрузки оборудования для рекультивации или дополнительного объема вскрыши.

Определение длительности перерывов на намыве техногенных массивов от собственного веса намываемых грунтов («пассивного отдыха») дает возможность планировать меры по изменению состояния техногенных массивов с целью ускорения уплотнения и форсированного достижения расчетных допустимых нагрузок.

При использовании применения песчаных дрен и дренажных прорезей расчеты прочности намывных оснований возможно выполнять способами, которые используются в строительной практике [2, 4, 45, 55].

Для первого способа в основании отстраивают поверхности скольжения, по которым определяют сдвигающие и удерживающие силы с учетом значений порового давления в соответствующих точках для различных периодов времени [4].

Для второго способа расчета прочности основания предусматривается учет изменений влажности в процессе консолидации и использование зависимостей сопротивления грунтов сдвигу от влажности. М. Ю. Абелевым дано экспериментальное обоснование использования для случаев применения вертикальных и горизонтальных дрен следующей зависимости, предложенной Н. Н. Масловым [4, 40, 41]:

$$W_t = W_{нач} - (W_{нач} - W_{кон}) U_\Sigma, \quad (1.13)$$

где  $W_t$  – влажность грунта в момент  $t$ , %;

$W_{нач}$  – начальная влажность в момент приложения нагрузки, %;

$W_{кон}$  – влажность грунта после окончания его уплотнения под данной нагрузкой, %;

$U_{\Sigma}$  – общая степень консолидации, определяемая для случая совместного применения вертикальных песчаных дрен или прорезей и песчаной подушки [2, 4].

Выполненные М. Ю. Абелевым натурные эксперименты проводились с дренажными прорезями неглубокого заложения (около 2 м). Для оперативного контроля и прогноза состояния намывных горнотехнических сооружений следует использовать методы, обеспечивающие надежную оценку пространственно-временной изменчивости прочностных характеристик массивов, мощность которых измеряется десятками метров.

### **Выводы по 1 главе**

Анализ работ, посвященных консолидации глинистых грунтов, показывает, что применительно к условиям формирования карьерных отвалов с преобладанием песчано-глинистых пород целесообразно использовать решение задач консолидации слоя переменной мощности (для массивов отвальных насыпей, гидроотвалов и хвостохранилищ) с учетом нелинейной зависимости коэффициента консолидации от уплотняющих нагрузок.

Для отвальных насыпей глинистых пород на слабых основаниях эту нелинейную зависимость ( $C_v$  от  $q$ ) следует учитывать для пород тела и основания отвального массива.

Интенсивность уплотнения отвальных массивов определяется скоростью подвигания фронта отвальных насыпей или темпом намыва гидроотвалов, мощностью слоев, последовательностью укладки раздельно-зернистых и тонкодисперсных масс, показателями сжимаемости пород с учетом их нелинейной зависимости от уплотняющих нагрузок.

Следует учитывать наличие градиента напора в глинистых слоях и параметры ползучести при компрессии для расчета степени уплотнения и осадок насыпных и намывных отвальных масс, а также слабых естественных оснований.

## **Глава 2 Лабораторные исследования намывных и естественных тонкодисперсных отложений**

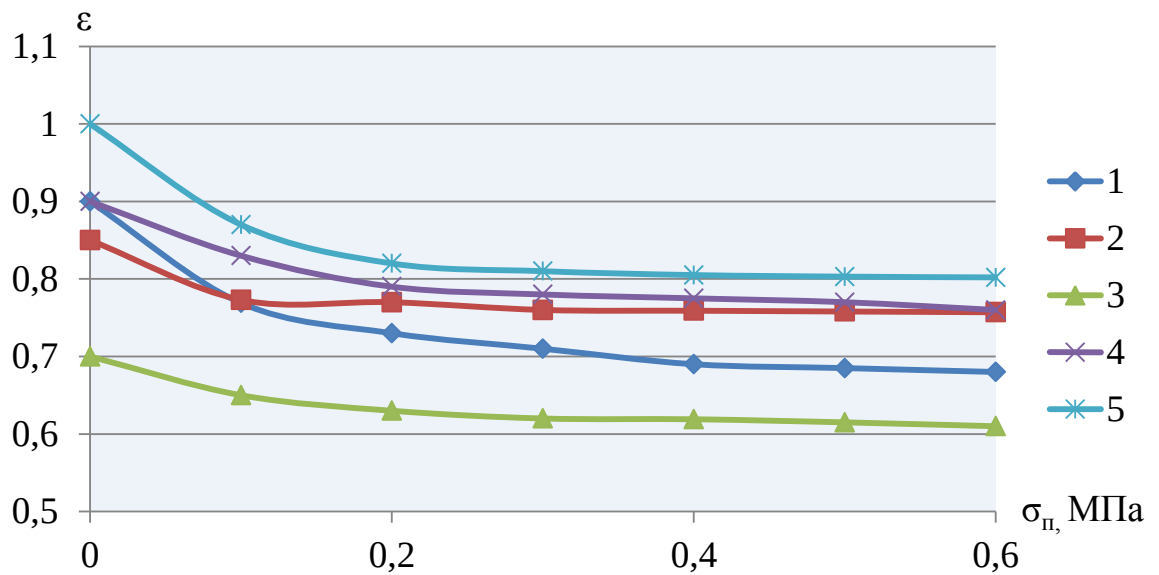
### **2.1 Исходные положения нелинейной фильтрационной консолидации**

Определялись показатели водно-физических свойств (влажность, плотность, плотность минеральных частиц, пористость, водонасыщенность), характеристики компрессии и консолидации, сопротивление сдвигу, гранулометрический состав намывных и естественных отложений [4].

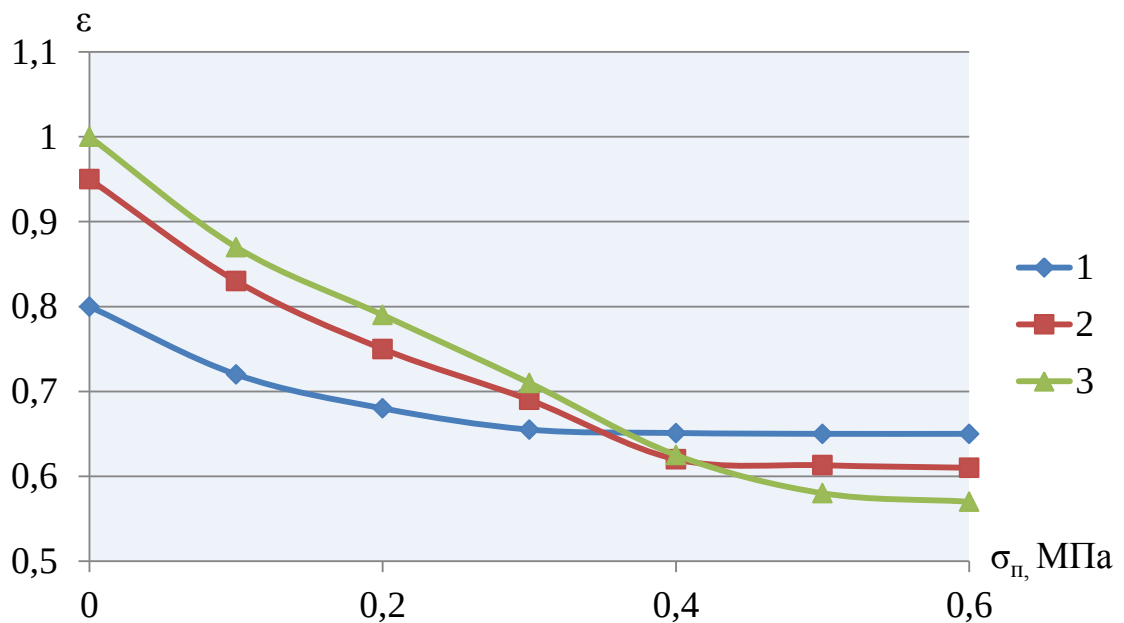
Свойства, характеризующие физическое состояние породы и отношение ее к воде определялись в полевых и лабораторных условиях. Трехосные испытания выполнялись на стабилометрах компрессионного типа М-2 конструкции МИИТа и УСВ-2 конструкции ВИОГЕМа. Также использовались сдвиговый и компрессионно-фильтрационный приборы конструкции Гидропроекта (ГГП-29, ГГП-30, ВСВ-25). Гранулометрический состав определяли с помощью комбинированного гранулометрического анализа, предусматривающего использование ситового и пипеточного методов [4, 71-75].

Обобщенные компрессионные зависимости коэффициента пористости  $\varepsilon$  от уплотняющего давления  $\sigma_n$  для тонкодисперсных грунтов на различных участках (зонах) гидроотвала «Березовый Лог» (КМА) показаны на рисунке 2.1 [4].

Зависимости коэффициента пористости  $\varepsilon$  от уплотняющей нагрузки  $\sigma_n$  для различных зон гидроотвалов разрезов Кузбасса свидетельствуют об увеличении сжимаемости намывных масс при повышении содержания в них глинистых частиц с переходом от пляжной к ядерной (прудовой) зоне. На рисунках 2.2, 2.3 и 2.4 показаны эти компрессионные кривые для разрезов Кузбасса – «Свободный», «Бековский» и «Новобачатский» соответственно.

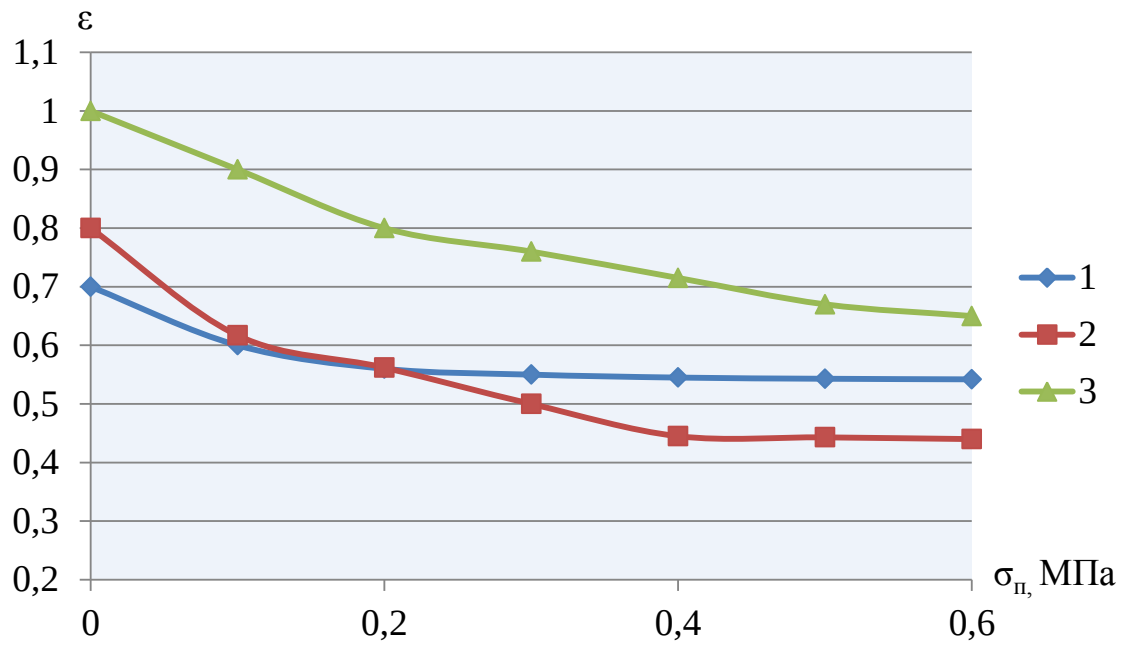


**Рисунок 2.1** – Компрессионные кривые для тонкодисперсных грунтов различных участков гидроотвала «Березовый Лог» (КМА): глинисто-меловых линз в теле песчаной упорной призмы 1, глинисто-меловых паст двух участков первой 2,3 и второй 4, 5 секций ядерной зон

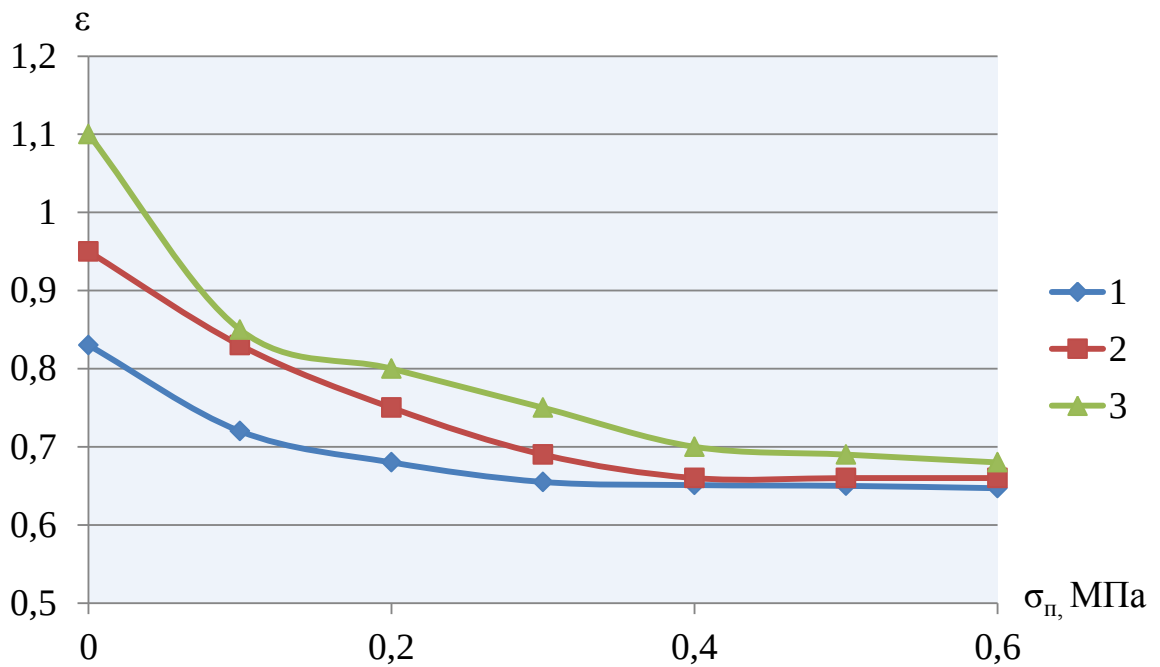


**Рисунок 2.2** – Компрессионные кривые для намывных грунтов пляжной 1, промежуточной 2 и ядерной 3 зон гидроотвалов разреза Кузбасса «Свободный» [68]





**Рисунок 2.3** – Компрессионные кривые для намывных грунтов пляжной 1, промежуточной 2 и ядерной 3 зон гидроотвалов разреза Кузбасса «Бековский» [68]



**Рисунок 2.4** – Компрессионные кривые для намывных грунтов пляжной 1, промежуточной 2 и ядерной 3 зон гидроотвалов разреза Кузбасса «Новобачатский» [68]

С учетом незавершенности уплотнения глинистых водонасыщенных пород необходимо знать характер изменения коэффициента консолидации от действия возрастающих нагрузок. Коэффициент консолидации определяется:

$$C_v = \frac{k_{\phi}(1+\varepsilon_{cp})}{a_{cp}\gamma_w}, \quad (2.1)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м<sup>2</sup>/сут;

$\varepsilon_{cp}$  – средняя приведенная пористость в рассматриваемом диапазоне;

$a_{cp}$  – коэффициент сжимаемости, м<sup>2</sup>/т;

$\gamma_w$  – плотность воды, т/м<sup>3</sup>.

Ю.К. Зарецким предложен подход к определению коэффициента консолидации в рамках представления линейной фильтрационной консолидации [9].

Параметры нелинейной консолидации определялись с использованием результатов компрессионно-фильтрационных испытаний глинисто-меловых пород линз, которые сформировались в теле северной песчаной упорной призмы гидроотвала «Березовый Лог» при одностороннем намыве, и гумусированных суглинков основания [76]. В таблице 2.1 представлены исходные характеристики состояния (до приложения нагрузки) пород основания и тела упорной призмы [2, 76].

Из экспериментальных данных следует, что рассеивание порового давления происходит до достижения осадкой 90% от максимальной величины. Трехосные испытания образцов пастообразных грунтов в условиях закрытой системы выявили, что для них пик порового давления примерно равен внешней нагрузке [4].

При обработке компрессионных зависимостей с учетом нелинейной консолидации вводилась функция  $\psi'$ , характеризующая изменение пористости [9, 76]:

$$\psi' = \frac{\varepsilon - \varepsilon_k}{\varepsilon_0 - \varepsilon_k}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_0$  – начальный коэффициент пористости;

$\varepsilon_k$  – конечный коэффициент пористости, отвечающий предельно плотному состоянию грунта.

**Таблица 2.1** – Характеристики начального состояния (до приложения нагрузки) пород основания и тела упорной призмы гидроотвала «Березовый Лог» [2, 76]

| Порода                                             | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Плотность<br>частиц<br>грунта,<br>г/см <sup>3</sup> | Влажность,<br>% | Начальный<br>коэффициент<br>пористости | Коэффициент<br>водонасыщения |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Суглинок<br>коренной<br>лёссовидный<br>(основание) | 1,98                            | 2,70                                                | 24,2            | 0,67                                   | 0,97                         |
| Суглинки гумусированные<br>(основание)             | 1,85                            | 2,63                                                | 33,7            | 0,88                                   | 1,0                          |
| Глинисто-меловые пасты<br>(намывные)               | 1,90                            | 2,67                                                | 31              | 0,83                                   | 1,0                          |
| Песок<br>намывной                                  | 1,94                            | 2,65                                                | 23,7            | 0,62                                   | 1,0                          |

При обработке компрессионных зависимостей с учетом нелинейной консолидации вводилась функция  $\psi'$ , характеризующая изменение пористости [9, 76]:

$$\psi' = \frac{\varepsilon - \varepsilon_k}{\varepsilon_0 - \varepsilon_k} \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_0$  – начальный коэффициент пористости;

$\varepsilon_k$  – конечный коэффициент пористости, отвечающий предельно плотному состоянию грунта.

Компрессионная зависимость для широкого диапазона уплотняющих давлений:

$$\psi' = \exp(-\alpha_1 P_{эф}), \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{эф}}$  – эффективное давление;

$\alpha_1$  – параметр компрессионной кривой;

$q$  – внешнее давление;

$P_u$  – избыточное поровое давление.

Коэффициент фильтрации  $k_\phi$  как величина переменная, зависящая от изменения пористости, представлялся в виде

$$k_\phi = k_\phi^0 \psi^n, \quad (2.4)$$

где  $k_\phi^0$  – начальный коэффициент фильтрации, соответствующий коэффициенту пористости  $\varepsilon_0$ , м<sup>2</sup>/сут;

$n$  – параметр степенной зависимости [3, 4, 76].

Из решения задачи нелинейной фильтрационной консолидации вытекает, что коэффициент консолидации  $C_v$  может быть приближенно принят в виде (по Ю. К. Зарецкому) [40, 76]:

$$C_v = C_v^0 \exp(-\lambda' q), \quad (2.5)$$

где при  $q < 0,1$  МПа

$$\lambda' = (n - 1)a / 2; \quad (2.6)$$

где при  $q \geq 0,1$  МПа

$$\lambda' = (n - 1)a_1 / 2,5; \quad (2.7)$$

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

$\lambda'$  – угол внутреннего трения [2, 76].

Для большей части ( $> 90$  %) периода консолидации возможно использование для расчета уплотнения формулы и графики линейной теории фильтрационной консолидации, для этого необходимо вводить в них коэффициент консолидации в соответствии с соотношением (2.5).

## 2.2 Определение консолидационных параметров и характеристик ползучести тонкодисперсных отложений

Зависимости  $\varepsilon$  и  $K_\phi$  гумусированных суглинков основания и глинисто-меловых паст от уплотняющей нагрузки, полученные при обработке началь-

ных данных о сжимаемости и величине коэффициентов фильтрации в диапазонах давления от 0 до 1,1 (гумусированные суглинки) и от 0 до 1,5 МПа (пастообразные грунты) показаны на рисунке 2.5 [68].

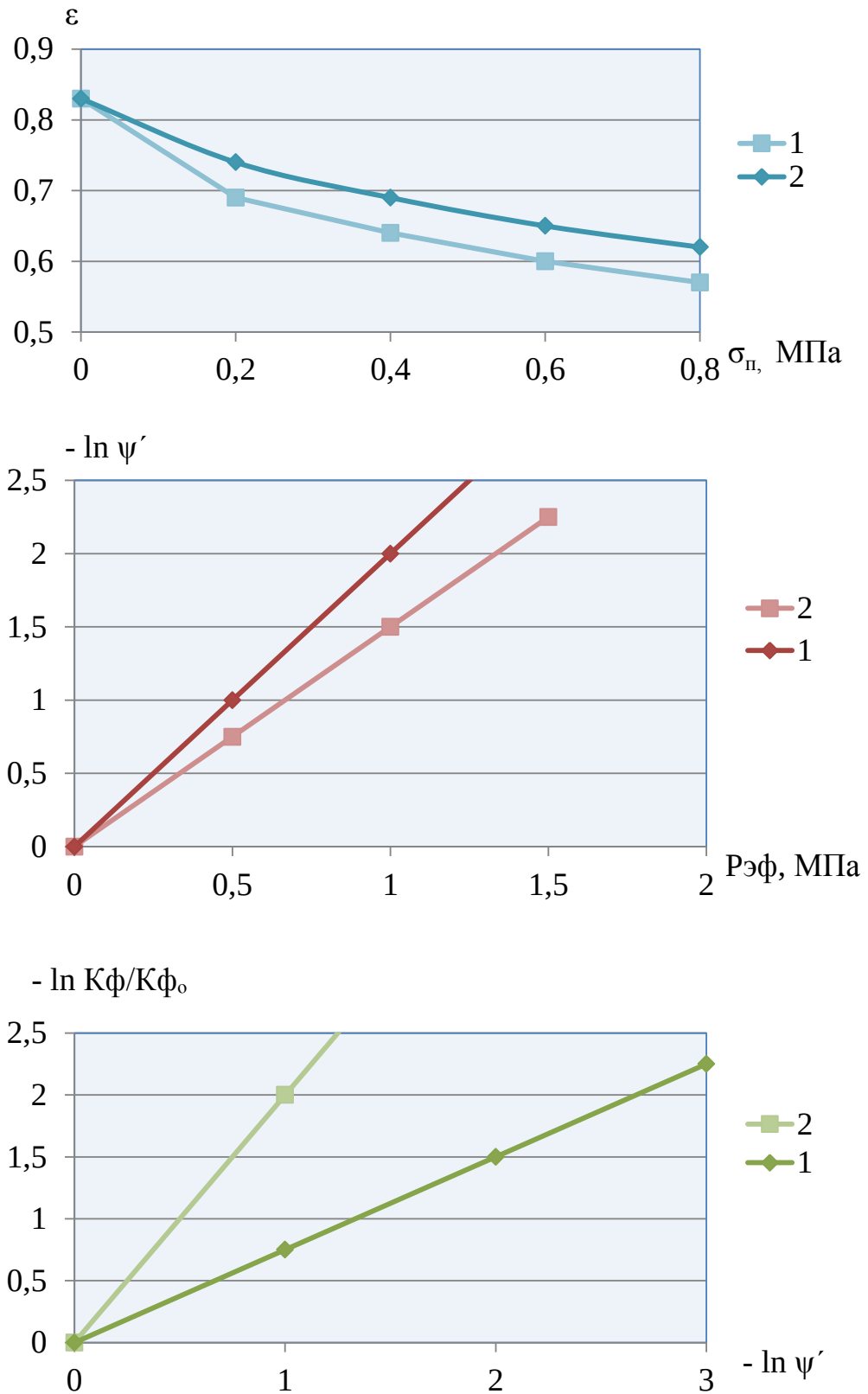
Из зависимостей  $\ln \psi' = f(P_{эф})$  и  $\ln (K_{\phi}/K_{\phi}^0) = \varphi(-\ln \psi')$  для гумусированных суглинков получаем угловые коэффициенты прямых (параметры) :  $\alpha_1 = 0,21$  и  $n = 1,86$ . Тогда параметр  $\lambda' = \alpha_1(n-1)/2,5 = 0,072$  [2, 76].

Для пастообразных намывных грунтов параметры, полученные по той же методике:  $\alpha_1 = 0,18$ ;  $n = 2,12$  и  $\lambda' = 0,08$ .

В работах А.М. Гальперина приведены графики к расчету уплотнения намывных (насыпных) слоев и естественных оснований на различных стадиях их формирования и нагружения [2, 3].

Графики к определению порового давления  $P_u$  и степени уплотнения слоя  $U$  под постоянной нагрузкой используются для обработки результатов опытов на консолидацию. При различных нагрузках (не менее 3-х) образец доводится до стабилизации осадки ( $S(t) = S_{\infty}$ ) и полного рассеивания порового давления ( $P_u = 0$ ). Фиксируется время консолидации  $t_k$  и затем определяется коэффициент консолидации из формулы  $C_v = 4mh^2/\pi^2 t_k$ . Далее определяются параметры ( $\lambda'$  и  $C_v^0$ ) зависимости  $C_v(q)$  при построении ее в координатах  $\ln C_v - q$ . Из графика  $U=f(m)$  при  $q=const$  имеет при  $U=1$ ,  $m=5,4$  [70].

Предложенный метод получения зависимости  $C_v(q)$  по данным опытов на консолидацию является более простым и надежным, потому что он позволяет сразу определять параметры  $C_v^0$  и  $\lambda'$  без нахождения  $k_{\phi}$ .



**Рисунок 2.5** – Зависимости к определению параметров нелинейной консолидации гумусированных суглинков основания (1) и глинисто-меловых грунтов (2) гидроотвала "Березовый Лог" [68]

С учетом вышеизложенного соотношение для определения значений  $C_v$  ( $\text{м}^2/\text{сут}$ ) имеет вид:

$$C_v = 2,189 h^2 / t_k, \quad (2.8)$$

где  $h$  – высота образца, м;

$t_k$  – продолжительность периода уплотнения образца действующим давлением, сут [2, 76].

Для различных зон гидроотвала «Березовый Лог» при лабораторных исследованиях процессов консолидации глинисто-меловых намывных масс с использованием описанного способа получены следующие зависимости  $C_v$  ( $\text{м}^2/\text{сут}$ ) от  $q$  ( $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$ ) [2, 4, 76]:

- для грунтов - линз в упорной призме

$$C_v = 0,11 \exp(-0,08 q); \quad (2.9)$$

- для первой секции

$$C_v = 0,13 \exp(-0,10 q); \quad (2.10)$$

- для второй секции

$$C_v = 0,085 \exp(-0,14 q); \quad (2.11)$$

- для третьей секции

$$C_v = 0,078 \exp(-0,173 q). \quad (2.12)$$

Для меловых паст гидроотвала «Симонова пасека» (Стойленский карьер КМА) получено соотношение [2, 4].

$$C_v = 0,12 \exp(-0,09 q). \quad (2.13)$$

Обработка результатов, полученных при испытаниях на консолидацию образцов из гидроотвалов «Бековского», «Свободного» и «Новобачатского» (Кузбасс), состоявшая в установлении расчетных значений  $C_v$  при различном уплотняющем давлении и построении графиков  $\ln C_v - q$ , позволила получить последующие обобщенные зависимости  $C_v(q)$  [3, 4]:

- для пляжных зон

$$C_v = 3,4 \cdot 10^{-2} \exp(-0,055 q); \quad (2.14)$$

- для ядерных зон

$$C_v = 2,9 \cdot 10^{-2} \exp(-0,08 q); \quad (2.15)$$

С учетом ползучести минерального скелета и сжимаемости поровой жидкости при решении одномерных задач уплотнения грунтов можно уточнить период стабилизации осадок намывных и естественных тонкодисперсных отложений.

Разработана оригинальная методика определения параметров нелинейной фильтрационной консолидации ( $C_v^0$  и  $\lambda$ ) на основании результатов опытов на консолидацию в стабилOMETрах компрессионного типа конструкции ВИОГЕМ. На этих приборах (УСВ-2) производилась серия опытов, испытаниям подвергались образцы намывных глинистых грунтов для трех различных зон гидроотвала «Лог Шамаровский». Опыты на консолидацию выполнялись с образцами при уплотняющих нагрузках в диапазоне от 1 до 6 кг/см<sup>2</sup> [70, 78].

Определялся (устанавливался) момент окончания ( $t_k$ ) фильтрационной консолидации образцов тонкодисперсных пород с односторонним дренажем на верхнем торце образца. На нижнем торце образца фиксируется изменение порового давления под действием постоянной нагрузки  $q$  во времени до достижения поровым давлением нулевого значения. Далее через величину  $t_k$  определяется значение  $C_v$  из соотношения:

$$m = \pi^2 C_v t_k / 4h^2, \quad (2.16)$$

$$C_v = \frac{4mh^2}{\pi^2 t_k}, \quad (2.17)$$

где  $h$  – длина пути фильтрации в слое, м;

$t_k$  – продолжительность периода консолидации, год;

$m$  – параметр в зависимости от степени уплотнения  $U$  вида  $U = f(m)$ ,

$m = 5,4$ .

Затем на графике строим зависимости  $C_v$  от  $q$ . На основании полученных графиков получаем формулу зависимости  $C_v$  от  $q$  для различных зон.

$$C_v = C_v^0 \varepsilon^{\lambda-q}, \quad (2.18)$$

где  $C_v^0$  – начальный коэффициент консолидации, при  $q=0$ , м<sup>2</sup>/сут;

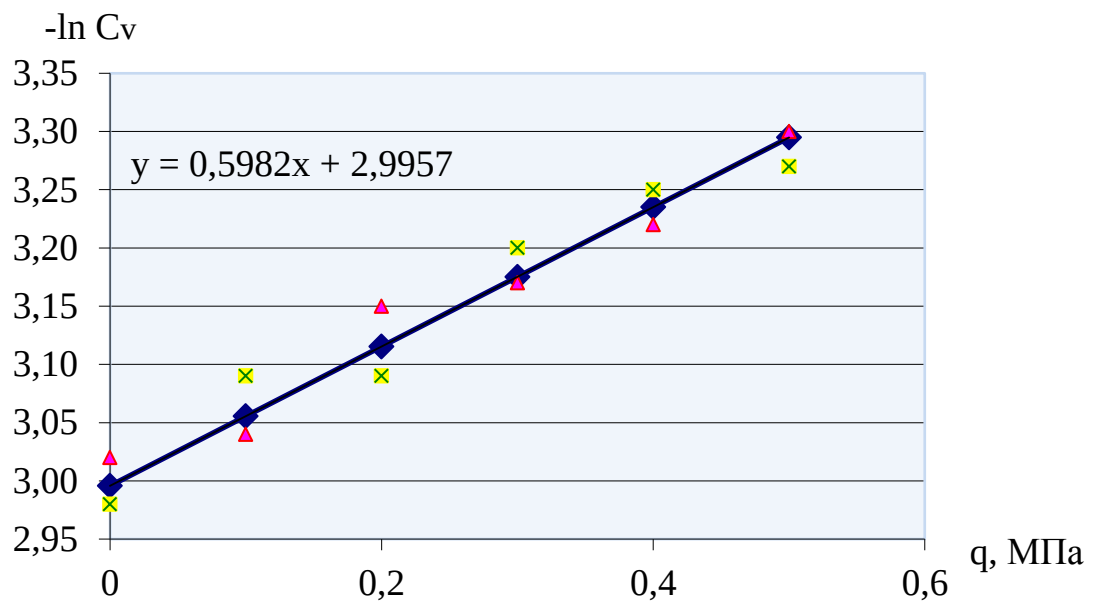
$\lambda$  – параметр нелинейной консолидации;



$q$  – уплотняющая нагрузка, кг/см<sup>2</sup> [4].

**Таблица 2.2** – Исходные данные к расчету параметров нелинейной консолидации для промежуточной зоны гидротова «Лог Шамаровский»

| $C_v^0$ , м <sup>2</sup> /сут | $\lambda$ | $q$ , МПа | $C_v$ , м <sup>2</sup> /сут | $\ln C_v$ | $-\ln C_v$ |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|------------|
| 0,05                          | 0,06      | 0         | 0,050                       | -3,00     | 3,00       |
| 0,05                          | 0,06      | 0,1       | 0,047                       | -3,06     | 3,06       |
| 0,05                          | 0,06      | 0,2       | 0,044                       | -3,12     | 3,12       |
| 0,05                          | 0,06      | 0,3       | 0,042                       | -3,18     | 3,18       |
| 0,05                          | 0,06      | 0,4       | 0,039                       | -3,23     | 3,23       |
| 0,05                          | 0,06      | 0,5       | 0,037                       | -3,29     | 3,29       |



**Рисунок 2.6** – График определения параметров нелинейной консолидации для промежуточной зоны гидротова «Лог Шамаровский»

Из полученного графика (рисунок 2.6) определяется следующая зависимость  $-\ln C_v$  от  $q$ :

$$y = 0,0598x + 2,9957;$$

т.е.  $-\ln C_v = 0,0598 q + 2,9957;$

где  $\lambda = 0,0598$ ;  $-\ln C_v = 3$ .

Угол кривой к горизонтальной оси соответственно:

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda;$$

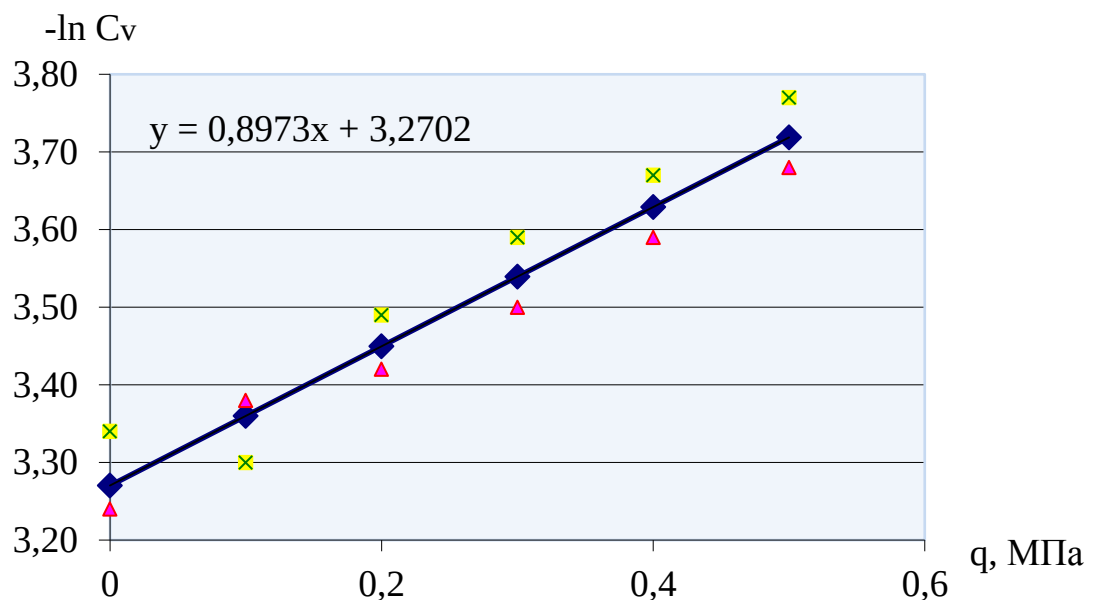
$$\operatorname{tg} \alpha = 0,059;$$

$$\alpha = 3,42^\circ.$$

$$C_v = 0,05 \exp^{-0,06q}. \quad (2.19)$$

**Таблица 2.3** – Исходные данные к расчету параметров нелинейной консолидации для промежуточно-прудковой зоны гидроотвала «Лог Шамаровский»

| $C_v^0$ , м <sup>2</sup> /сут | $\lambda$ | q, МПа | $C_v$ , м <sup>2</sup> /сут | $\ln C_v$ | $-\ln C_v$ |
|-------------------------------|-----------|--------|-----------------------------|-----------|------------|
| 0,038                         | 0,09      | 0      | 0,038                       | -3,27     | 3,27       |
| 0,038                         | 0,09      | 0,1    | 0,035                       | -3,36     | 3,36       |
| 0,038                         | 0,09      | 0,2    | 0,032                       | -3,45     | 3,45       |
| 0,038                         | 0,09      | 0,3    | 0,029                       | -3,54     | 3,54       |
| 0,038                         | 0,09      | 0,4    | 0,027                       | -3,63     | 3,63       |
| 0,038                         | 0,09      | 0,5    | 0,024                       | -3,72     | 3,72       |



**Рисунок 2.7** – График определения параметров нелинейной консолидации для промежуточно-прудковой зоны гидроотвала «Лог Шамаровский»

Из полученного графика (рисунок 2.7) определяется следующая зависимость  $-\ln C_v$  от  $q$ :

$$y = 0,089 x + 3,2702;$$

$$\text{т.е. } -\ln C_v = 0,089 q + 3,2702;$$

$$\text{где } \lambda = 0,089; \quad -\ln C_v = 3,27.$$

Угол кривой к горизонтальной оси соответственно:

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,089;$$

$$\alpha = 5,13^\circ.$$

$$C_v = 0,038 \exp^{-0,09q}. \quad (2.20)$$

**Таблица 2.4** – Исходные данные к расчету параметров нелинейной консолидации для прудковой зоны гидроотвала «Лог Шамаровский»

| $C_v^0$ , м <sup>2</sup> /сут | $\lambda$ | $q$ , МПа | $C_v$ , м <sup>2</sup> /сут | $\ln C_v$ | $-\ln C_v$ |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|------------|
| 0,025                         | 0,14      | 0         | 0,025                       | -3,69     | 3,69       |
| 0,025                         | 0,14      | 0,1       | 0,022                       | -3,83     | 3,83       |
| 0,025                         | 0,14      | 0,2       | 0,019                       | -3,97     | 3,97       |
| 0,025                         | 0,14      | 0,3       | 0,016                       | -4,11     | 4,11       |
| 0,025                         | 0,14      | 0,4       | 0,014                       | -4,25     | 4,25       |
| 0,025                         | 0,14      | 0,5       | 0,012                       | -4,39     | 4,39       |

Из полученного графика (рисунок 2.8) определяется следующая зависимость  $-\ln C_v$  от  $q$ :

$$y = 0,1396 x + 3,6889;$$

$$\text{т.е. } -\ln C_v = 0,1396 q + 3,6889;$$

$$\text{где } \lambda = 0,14; \quad -\ln C_v = 3,69.$$

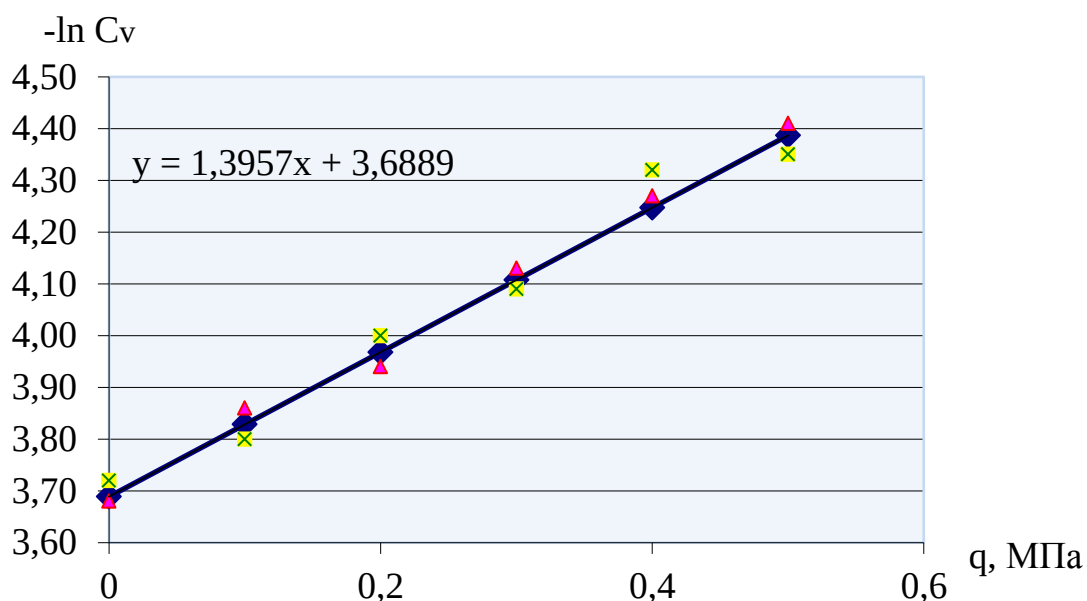
Угол кривой к горизонтальной оси соответственно:

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,1396;$$

$$\alpha = 7,95^\circ$$

$$C_v = 0,025 \exp^{-0,14q}. \quad (2.21)$$

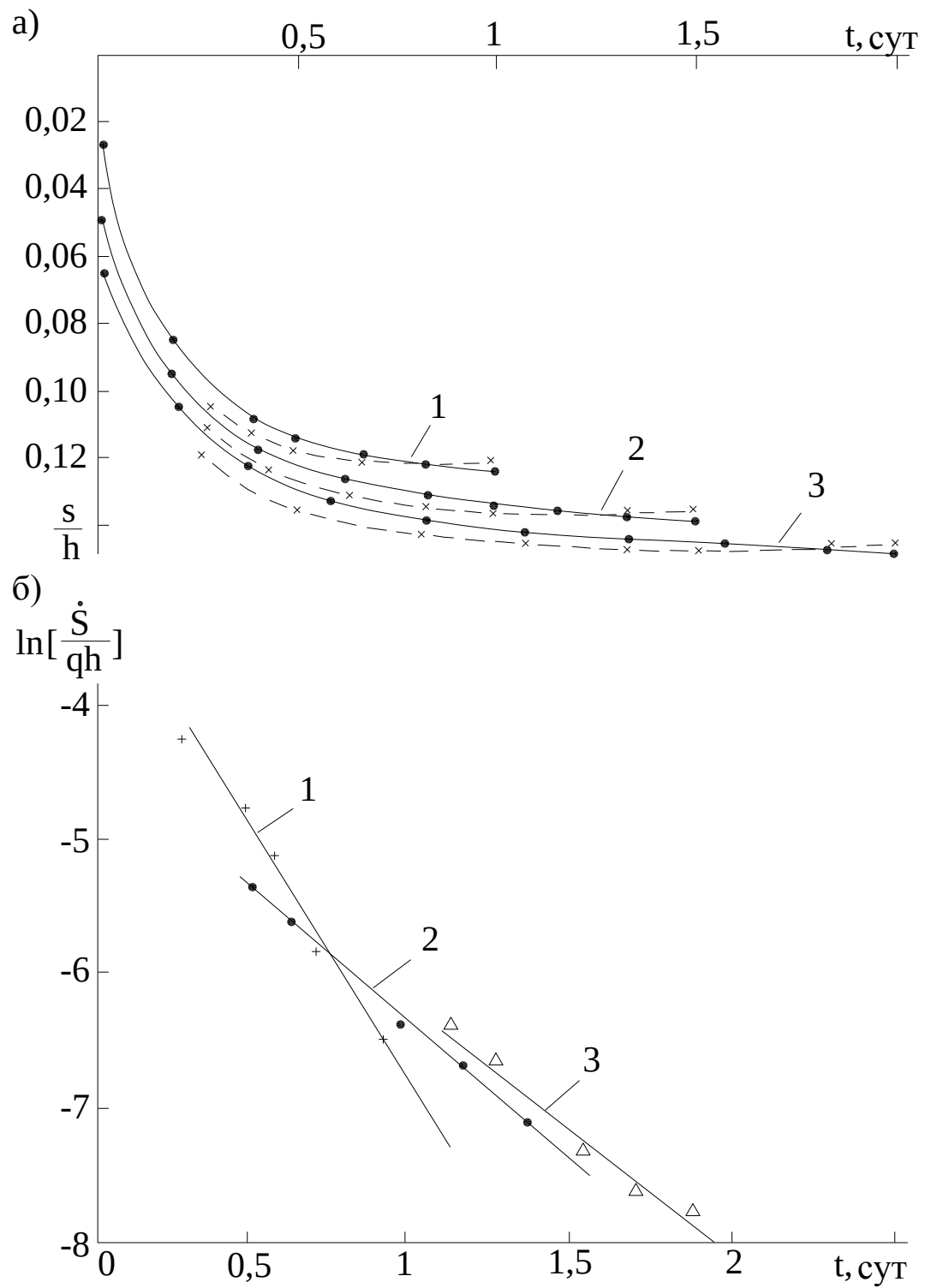


**Рисунок 2.8** – График определения параметров нелинейной консолидации для прудковой зоны гидроотвала «Лог Шамаровский»

До использования описанного подхода степень уплотнения определялась путем зондирования тонкодисперсных отложений различной мощности (до 40 метров) с помощью комбинированного зонда устройствами МГГУ ДИГЭС.

Данная методика была использована для расчетов параметров нелинейной консолидации для трех зон гидроотвала «Лог Шамаровский» Михайловского ГОКа.

На рисунке 2.9 показаны исходные экспериментальные зависимости относительных осадок  $S/h=f(t)$ , полученные при испытаниях на универсальных стабилометрах (а), и их обработка для определения параметра ползучести  $\delta_t$ , при значениях уплотняющего давления  $q=0,2; 0,4; 0,8$  МПа (б) [2, 4]. На рисунке 2.9 показаны пунктиром теоретические зависимости  $S/h = f(t)$ , полученные с использованием установленных характеристик [2, 77]:



**Рисунок 2.9** – Зависимости  $S/h$  (а) и  $\ln [\dot{S}/qh]$  (б) от времени (сплошные – экспериментальные, пунктирные – расчетные кривые) при уплотняющих давлениях 0,4 МПа (1), 0,6 МПа (2), 0,8 МПа (3) для глинисто-меловых намывных отложений [2, 4]

Относительная осадка представлялась в виде:

$$\frac{S(t_k)}{h} = q(a_{0_{перв}} U_{перв} + a_{0_{вт}} U_{вт}) \quad (2.22)$$

$$\frac{S(t_k)}{qh} = a_0 = a_{0_{перв}} + a_{0_{вт}} [1 - \exp(-\delta_1 t)] . \quad (2.23)$$

Общий коэффициент сжимаемости и первичный (до достижения  $P_u=0$ ) коэффициент сжимаемости определяются на основании графика  $S/h=f(t)$ , коэффициент сжимаемости  $a_{0_{вт}}$  (во время вторичной консолидации) – из формулы (2.8). Параметр  $\delta$  выявляют по формуле

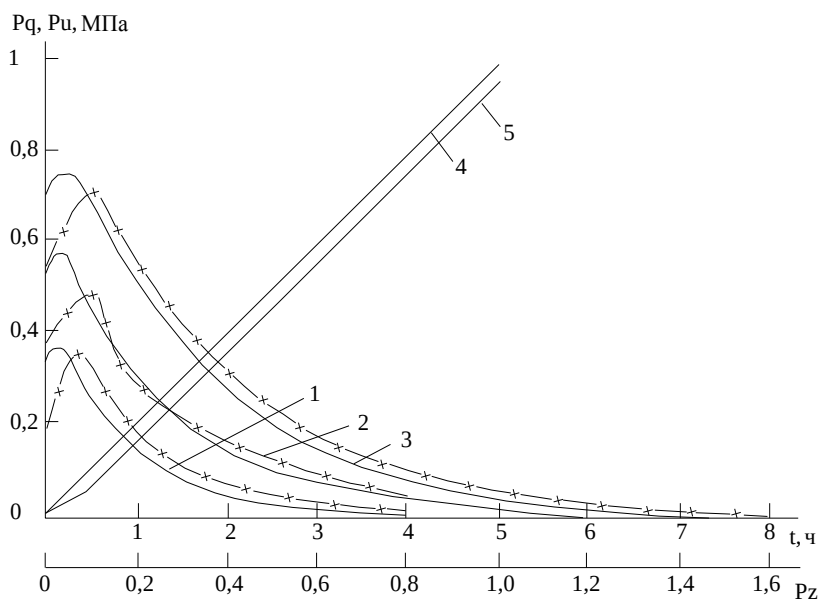
$$\delta = \delta_1 \cdot a_{0_{вт}} / a_{0_{перв}} . \quad (2.24)$$

Значения параметров сжимаемости пород оснований и отложений гидроотвалов приведены в таблице 2.5 [2, 4].

**Таблица 2.5** – Значения параметров сжимаемости пород оснований и отложений гидроотвалов [2, 4]

| Грунт                                               | $q$ ,<br>МПа | $\alpha_0$ ,<br>1/МПа | $\alpha_{0_{перв}}$ ,<br>1/МПа | $\alpha_{0_{вт}}$ ,<br>1/МПа | $\delta$ ,<br>1/сут | $\delta_1$ ,<br>1/сут | $C_v$ ,<br>м <sup>2</sup> /сут |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Глинистая паста<br>(МГОК)                           | 0,4          | 0,313                 | 0,2751                         | 0,0391                       | 0,727               | 5,111                 | 0,0177                         |
|                                                     | 0,6          | 0,234                 | 0,2158                         | 0,0205                       | 0,208               | 2,192                 | 0,0107                         |
| Глинисто-меловая<br>паста (ЛГОК)                    | 0,8          | 0,188                 | 0,1738                         | 0,0152                       | 0,178               | 2,049                 | 0,0079                         |
|                                                     | 0,4          | 0,141                 | 0,112                          | 0,0327                       | 0,555               | 1,867                 | 0,0396                         |
|                                                     | 0,6          | 0,137                 | 0,119                          | 0,0186                       | 0,332               | 2,126                 | 0,0265                         |
| Темно-бурые<br>суглинки (основание<br>отвала, МГОК) | 0,8          | 0,149                 | 0,125                          | 0,0277                       | 0,163               | 0,732                 | 0,0199                         |
|                                                     | 0,2          | 0,309                 | 0,258                          | 0,0536                       | 1,125               | 5,401                 | 0,0793                         |
|                                                     | 0,4          | 0,262                 | 0,2095                         | 0,0554                       | 0,654               | 2,473                 | 0,0397                         |

На рисунке 2.10 представлены экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (пунктирные линии) графики  $P_u = f(t)$  при различных значениях уплотняющего давления [2, 4].



**Рисунок 2.10** – Зависимости порового давления  $P_u$  от времени  $t$  (линии сплошные – экспериментальные, линии пунктирные – расчетные кривые) при уплотняющих давлениях 0,4МПа(1), 0,6МПа(2) и 0,8МПа(3), зависимости от осевого давления  $P_z$ , бокового распора  $P_q$ (4) и порового давления  $P_u$ (5) в условиях закрытой системы для глинисто-меловых намывных грунтов [2, 4]

Далее следует, что выполнение расчетов обратной задачи позволило установить правомерность внедрения рассмотренных аналитических решений [70].

Использование обратных задач рассматривается как универсальный метод определения консолидационных параметров также в работе [5], где приводятся результаты обработки экспериментальных исследований уплотнения семи литологических типов слабых грунтов с ненарушенной и нарушенной структурой.

Свойства сопротивления сдвигу грунтов гидроотвалов КМА и Кузбасса, выявленные в лабораторных условиях для консолидированных ( $U = 1$ ,  $C = C_k$ ,  $\varphi = \varphi_k$ ) и неконсолидированных образцов ( $U = 0$ ,  $C = C_z$ ,  $\varphi = \varphi_z$ ), приведены в таблице 2.6. При определении  $\varphi$  и  $C$  вертикальное давление изменялось в диапазоне 0,2—0,4—0,8 МПа.

**Таблица 2.6** – Характеристики сопротивления сдвигу грунтов гидроотвалов КМА и Кузбасса [3]

| Гидроотвал                                                               | Степень уплотнения   |             |                      |             |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
|                                                                          | 0                    |             | 1                    |             |
|                                                                          | $\varphi_3$ , градус | $C_3$ , Мпа | $\varphi_k$ , градус | $C_k$ , Мпа |
| «Березовый Лог»:                                                         |                      |             |                      |             |
| вторая секция (ядро)                                                     | 6                    | 0,01        | 15                   | 0,035       |
| глинисто-меловые<br>линзы в песчаной<br>упорной призме<br>(пляжная зона) | 5                    | 0,05        | 16                   | 0,025       |
| первая секция<br>(промежуточная зона)                                    | 4                    | 0,01        | 18                   | 0,03        |
| «Симонова пасека»:                                                       |                      |             |                      |             |
| Пляж                                                                     | 7                    | 0,015       | 20                   | 0,02        |
| Ядро                                                                     | 5                    | 0,01        | 16                   | 0,04        |
| «Бековский»:                                                             |                      |             |                      |             |
| Пляж                                                                     | 3                    | 0,005       | 22                   | 0,01        |
| Ядро                                                                     | 3                    | 0,01        | 16                   | 0,015       |
| «Свободный»:                                                             |                      |             |                      |             |
| Пляж                                                                     | 6                    | 0,02        | 29                   | 0,03        |
| Ядро                                                                     | 4                    | 0,016       | 23                   | 0,0175      |
| «Новобачатский»:                                                         |                      |             |                      |             |
| Пляж                                                                     | 7                    | 0,015       | 20                   | 0,010       |
| Ядро                                                                     | 4                    | 0,012       | 16                   | 0,020       |
| «Южный»:                                                                 |                      |             |                      |             |
| Ядро                                                                     | 3                    | 0,005       | 20                   | 0,015       |



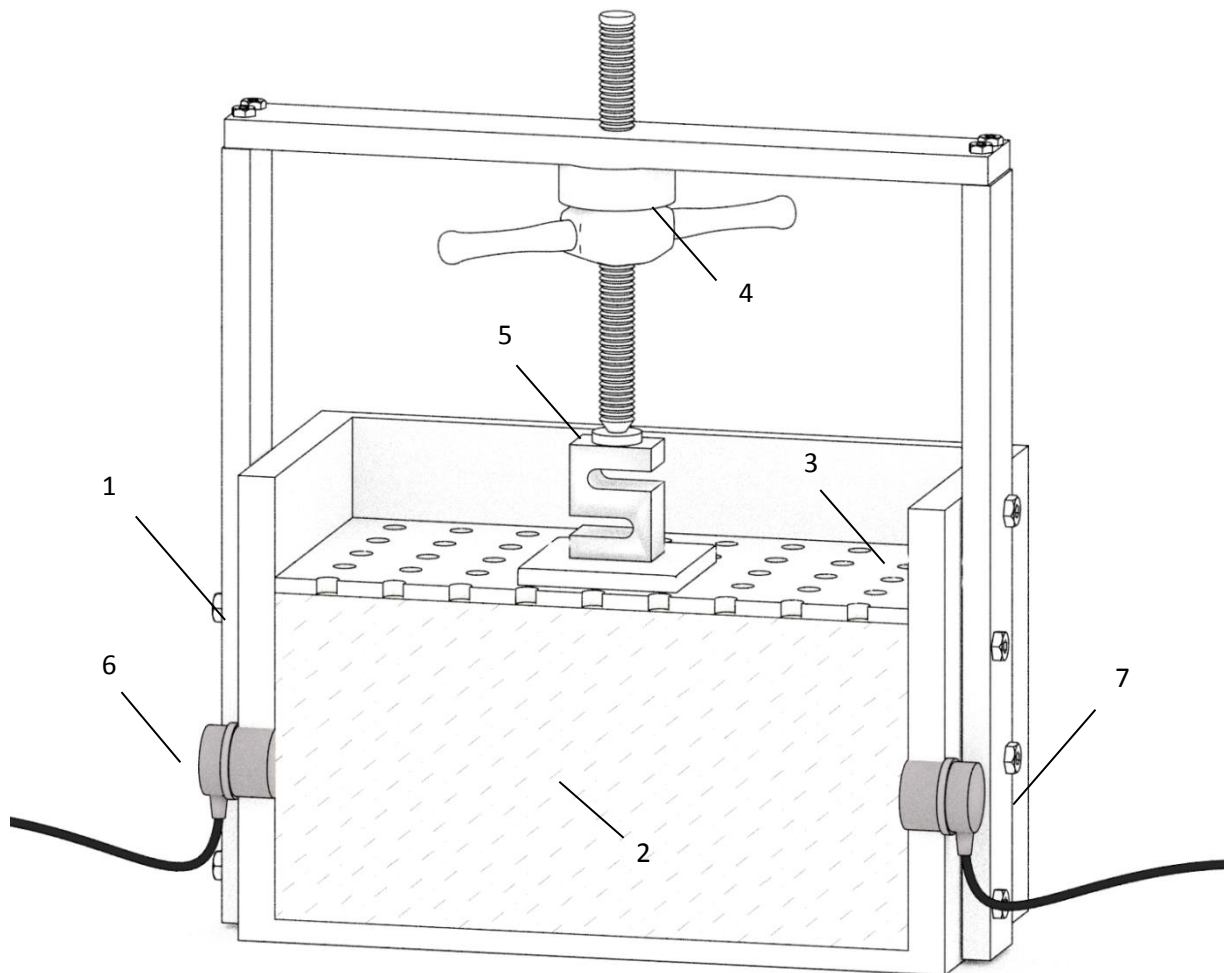
### **2.3 Исследование влияния консолидации тонкодисперсных отложений на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала**

Серьезным недостатком традиционных подходов к оценке состояния отвальных массивов является точечный характер получаемой информации. При этом, с одной стороны, в силу неоднородности и пространственно-временной изменчивости структуры, свойств и состояния исследуемой геосферы для получения соответствующей информации необходимо иметь достаточно большое количество точек контроля и проводимых в них измерений. С другой стороны в силу чисто экономических и технологических причин указанное количество всегда ограничено. Отсюда очевидны объективная необходимость в комплексировании существующих точечных измерений с некими интегральными измерениями, позволяющими оценивать процессы консолидации отвальных массивов тонкодисперсных отложений на достаточно больших базах контроля и в режиме непрерывного или дискретно-непрерывного мониторинга. Такой подход в перспективе позволит повысить надежность инженерно-геологического районирования намывных отложений и прогноза их несущей способности во времени. Очевидно, что его реализация возможна только с привлечением геофизических методов [79]. Проведенный предварительный последующий анализ свидетельствует о перспективности для решения соответствующих задач акустического корреляционного метода межскважинного прозвучивания (АКММП).

АКММП предполагает использование для прозвучивания исследуемой геосферы акустического шумового стационарного сигнала и измерение его корреляционных характеристик в точке приема, как показано в [80-82], применение такого сигнала позволяет повысить базы прозвучивания за счет значительной «заканчиваемой» 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.

Лабораторная установка, на которой проводились экспериментальные исследования представлены на рисунке 2.11.



**Рисунок 2.11** – Схема лабораторного стенда: 1 – контейнер;  
2 – намывные суглинки; 3 – металлический лист; 4 – упорный винт;  
5 – динамометр; 6 – УЗ излучатель; 7 – УЗ приемник

В металлический контейнер 1 с вертикальными стенками помещались намывные суглинки 2, водно-физические свойства которых представлены в таблице 1, а гранулометрический состав в таблице 2.7.

**Таблица 2.7** – Водно-физические свойства исходных намывных суглинков

|                                                 |        |
|-------------------------------------------------|--------|
| Плотность минеральных частиц, г/см <sup>3</sup> | 2,68   |
| Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>      | 1,51   |
| Пористость, %                                   | 43,74  |
| Коэффициент пористости                          | 0,784  |
| Коэффициент водонасыщения                       | 0,98   |
| Коэффициент фильтрации, м/сут                   | 0,0044 |

**Таблица 2.8** – Гранулометрический состав намывных суглинков

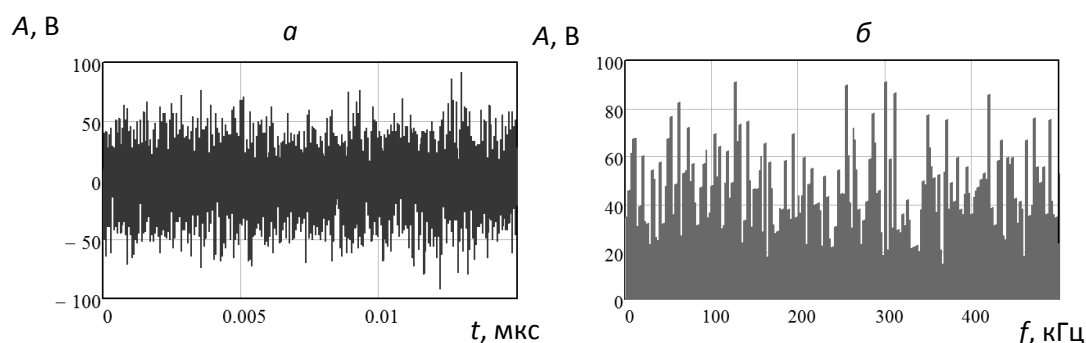
|                    |       |            |             |        |
|--------------------|-------|------------|-------------|--------|
| Размер фракции, мм | >0,05 | 0,05-0,002 | 0,002-0,001 | <0,001 |
| Содержание, %      | 18,37 | 42,2       | 11,7        | 27,73  |

На поверхности смеси размещался стальной лист 3 со сквозными отверстиями для выхода воды, плотно прилегающий к стенкам контейнера по всему периметру. В нижней части контейнера в противоположных стенках были соосно вмонтированы пьезоэлектрические преобразователи 6 и 7 с резонансной частотой  $f_{рез} = 60$  кГц, при этом база прозвучивания составила  $l = 300$  мм. Для нагружения подготовленной смеси пород предназначался упорный винт 4 с ручным приводом и электронным динамометром, ДЭП-1Д-100С-1, верхним пределом измерения 100 кН.

Излучающий ультразвуковой преобразователь подключался к выходу шумового генератора ГШ-1, основные технические характеристики которого представлены в таблице 2.9. Волновая форма и спектр излучаемого сигнала представлены на рисунке 2.12 [81, 83].

**Таблица 2.9** – Технические характеристики генератора шума

| Техническая характеристика | Значение                  |
|----------------------------|---------------------------|
| Рабочая полоса частот      | 10-500 кГц                |
| Амплитуда шума             | 100 В                     |
| Аттенюатор                 | 0 дБ – 6 дБ – 12 дБ       |
| Питание                    | аккумулятор 15В / 4 А-час |
| Время автономной работы    | 5-7 часов                 |

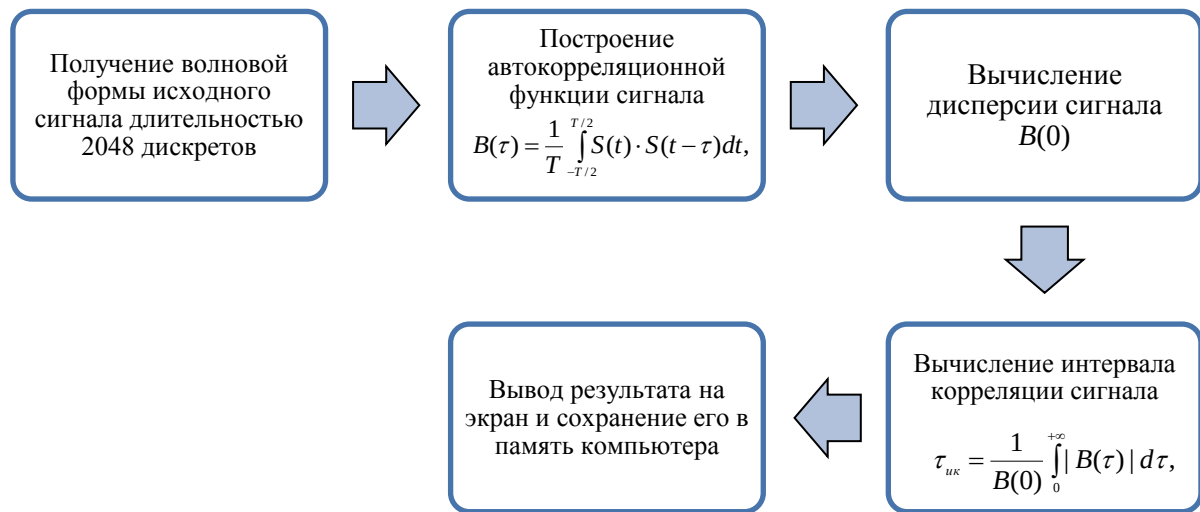
**Рисунок 2.12** – Волновая форма сигнала на выходе генератора шума (а) и его спектр (б)

Выход приемного преобразователя 7 подключался ко входу многоканального АЦП Е20-10 с максимальной частотой дискретизации  $f_{\text{дискр}} = 10 \text{ МГц}$ . АЦП, в свою очередь, подключался к персональному компьютеру с установленным программным обеспечением для потоковой корреляционной обработки сигналов. Алгоритм обработки регистрируемого УЗ сигнала представлен на рисунке 2.13.

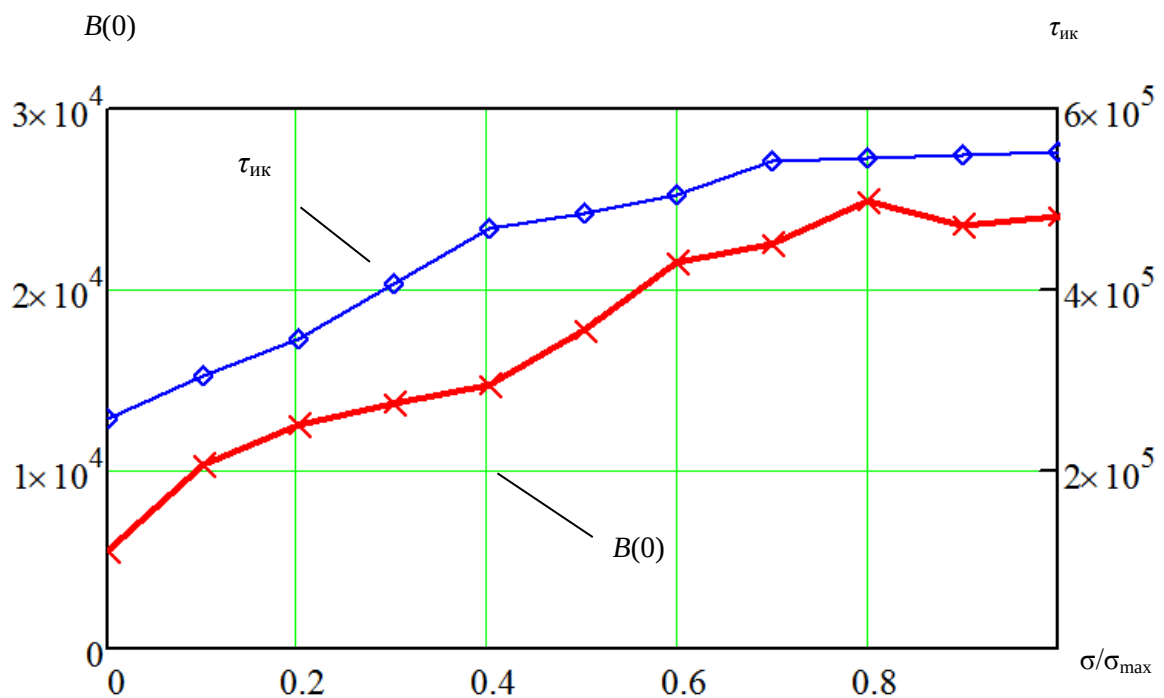
Идея эксперимента заключалась в установлении зависимости корреляционных параметров УЗ шумового сигнала, проходящего через исследуемый участок массива, от уровня механического нагружения, эмитирующего продолжение процессов отвалообразования.

Консолидация суглинков под действием дополнительной нагрузки до уровня  $\sigma_{\text{max}} = 1 \text{ МПа}$  с шагом  $\Delta\sigma = 0,1 \text{ МПа}$ . На каждом шаге нагружения начиная с  $\sigma = 0$  измерялась дисперсия принимаемого сигнала  $B(0)$  и его ин-

тервал корреляции  $\tau_{ик}$ . Таким образом, реализовывался автокорреляционный метод контроля. Результаты измерений представлены на рисунке 2.14.



**Рисунок 2.13** – Алгоритм обработки принимаемого шумового сигнала



**Рисунок 2.14** – Зависимости величин  $B(0)$  и  $\tau_{ик}$  от прилагаемой нагрузки  $\sigma$

Как видно из рисунка 2.14 оба информативных параметра корреляционного контроля возрастают с увеличением нагрузки до уровня  $(0.7 \div 0.8) \sigma_{\max}$ . Далее с увеличением  $\sigma$  параметры  $\tau_{ик}$  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.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, 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 деформационных свойств указанная информация носит интегральный и непрерывный характер. Важно также отметить, что соответствующий метод может быть достаточно просто реализован в натурных условиях. Для этого на начальном этапе формирования гидроотвала в его ложе жестко закрепляются две вертикальные трубы на расстоянии  $L$  друг от друга (определенном исходя из максимально возможной базы прозвучивания). Высота труб должна превышать максимальную потенциальную высоту отвала. Причем глубина, на которую помещаются излучающий и приемный преобразователи, изменяются по мере изменения высоты отвала. В одну из этих скважин и помещается низкочастотный скважинный акустический преобразователь шумовых упругих волн, а в другую приемный преобразователь. Дальнейшие измерительные операции будут аналогичны описанным выше [83].

### **Выводы по 2 главе**

Для сильносжимаемых намывных и естественных тонкодисперсных отложений расчеты уплотнения целесообразно проводить с учетом нелинейного характера фильтрационной консолидации.

Опытные зависимости порового давления и относительной осадки от времени показали, что до 90% осадки глинисто-меловых паст приходится на стадию первичной консолидации (до полного рассеивания давления в поровой воде).

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

Приведенные значения характеристик сопротивления сдвигу при различных значениях степени уплотнения ( $U=0$ ,  $U=1$ ) позволяют оценивать несущую способность слабых оснований на различные моменты времени.

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 деформационных свойств указанная информация носит интегральный и непрерывный характер. Этот метод достаточно легко реализовать в натурных условиях.

## **Глава 3 Инженерно-геологическое районирование намывных территорий**

### **3.1 Принципы районирования**

Выделение различных зон (участков) в пределах намывных и естественных слабых оснований дает возможность оценить направления их освоения. С учетом пространственной изменчивости вещественного состава и физико-механических свойств техногенных отложений выделяются однородные элементы (участки и подучастки).

Для техногенных намывных отложений учитываются следующие основные показатели:

- вещественный состав (гранулярный и минеральный) складированного материала;

- основные водно-физические свойства:

- 1) плотность;
- 2) влажность;
- 3) коэффициент пористости;
- 4) коэффициент водонасыщения.

- показатели механических свойств:

- 1) коэффициент сжимаемости;
- 2) коэффициент консолидации;
- 3) сцепление и угол внутреннего трения в зависимости от степени уплотнения.

Результаты районирования намывных массивов представляются в виде карт и графиков, позволяющие устанавливать границы зон с различными свойствами и оценивать динамику изменения несущей способности во времени для различных зон (участков) с позиции календарного планирования размещения сухих отвалов на намывных основаниях, выполнения рекультивационных работ или дальнейшего наращивания гидротехнических сооруже-



ний (укладки дополнительных объемов гидровскрыши или хвостов обогащения).

Для определения допустимых нагрузок на намывные основания использован расчетный метод предельного напряженного состояния [1, 4]. Степень уплотнения намывных толщ определяли в соответствии с расчетными схемами [1, 3, 4]. Несущую способность оценивали по графику функции  $P_{np}^{kp}/C$  от  $\varphi$ . Исходя из степени уплотнения  $U$  выявляются зависимости сопротивления сдвигу слабых грунтов от времени  $C[U(t)]$  и  $\varphi[U(t)]$ . Графики  $P_{np}^{kp}/C = \psi(\varphi)$  построены для различных значений коэффициента пригрузки  $\alpha = q/C$ , где  $q$  - нагрузка от пористого штампа.

### 3.2 Обобщение материалов районирования для объектов КМА и Кузбасса

Объектами исследований МГИ-МГГУ с 1969 г. были следующие намывные горно-технические сооружения в регионе КМА:

- гидроотвал №1 комбината КМА Руда;
- гидроотвал «Березовый Лог»;
- гидроотвал «Балка Чуфичева»;
- хвостохранилище Лебединского ГОКа;
- хвостохранилище Стойленского ГОКа;
- гидроотвал Лог Шамаровский.

Применительно к условиям крупнейшего отечественного гидроотвала Березовый Лог ЛГОКа (250 млн. м<sup>3</sup>) материалы районирования были использованы для определения положения дренажных элементов в массиве намывных глинисто-меловых пород. МГИ совместно с Трестом «Энергогидромеханизация» был разработан способ возведения намывного основания, предусматривающий создание в толще намывных тонкодисперсных отложений системы гидравлически связанных дренажных элементов (призм, линз и поду-

шек) [1, 4, 69, 68]. Эти элементы форсируют консолидацию тонкодисперсных отложений, уплотняют их за счет отжатия воды (из них). При этом повышается вместимость сооружения на 10-15%, ускоряется водооборот, создаются территории горизонтальной планировки с достаточной несущей способностью (для рекультивационной и другой техники) достигаемой практически одновременно с завершением формирования сооружения ( $P_{\text{доп}} > 2 \text{ кг/см}^2$ ).

Вместимость гидроотвала была увеличена по сравнению с проектной (209 млн. м<sup>3</sup>) до 250 млн. м<sup>3</sup>.

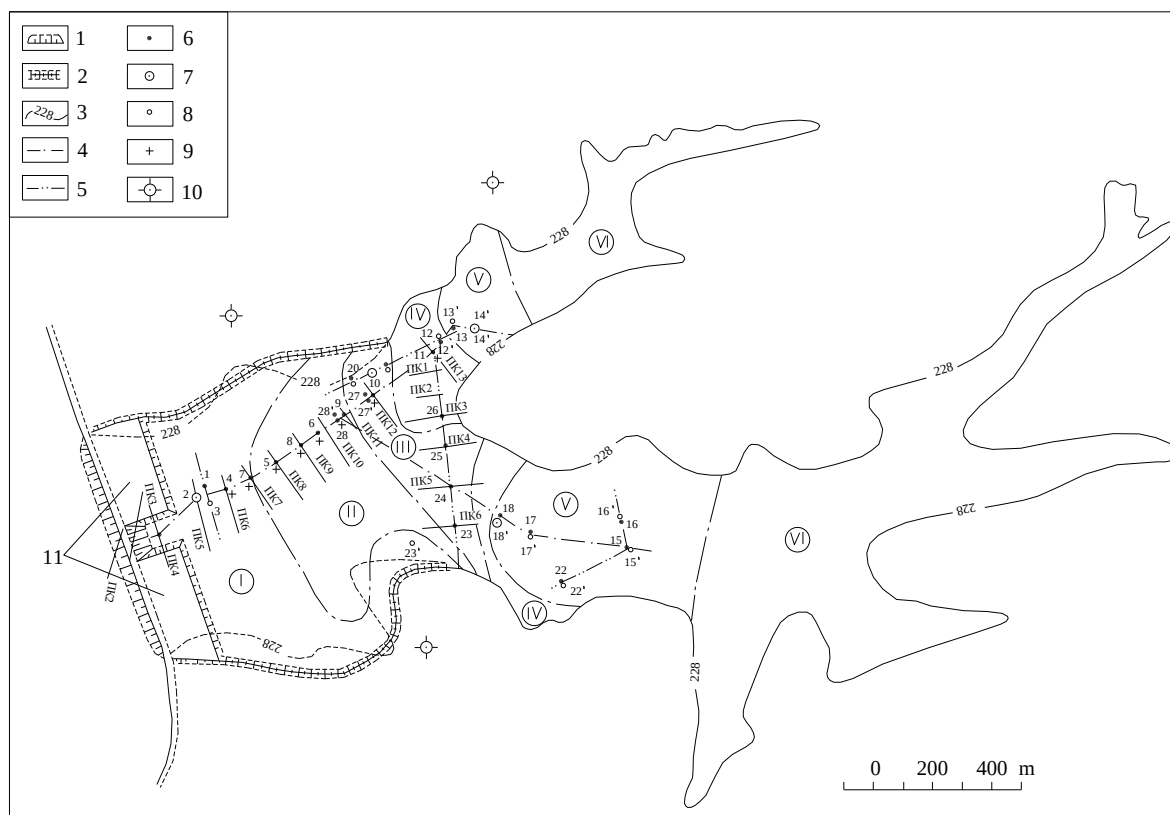
Гидроотвал №1 комбината КМА Руда в настоящее время принадлежит ЛГОКу. На этом гидроотвале в 1964 году произошел крупный оползень (объемом 1,8 млн. м<sup>3</sup>). Причиной оползня была высокая интенсивность намывных работ (до 8 м/год) при практическом отсутствии нормальных условий дренирования, преобладающих в намывном массиве, глинистых отложений, что способствовало развитию высокого порового давления.

Прорыв дамбы привел к перекрытию расположенного ниже гидроотвала русла реки Оскалец. С учетом данных стационарных замеров порового давления в 2005-2007 годах в теле гидроотвала и комплексного зондирования зондом МГГУ установлена возможность размещения на его территории дополнительного объема вскрыши (около 17 млн. м<sup>3</sup>) рыхлой вскрыши.

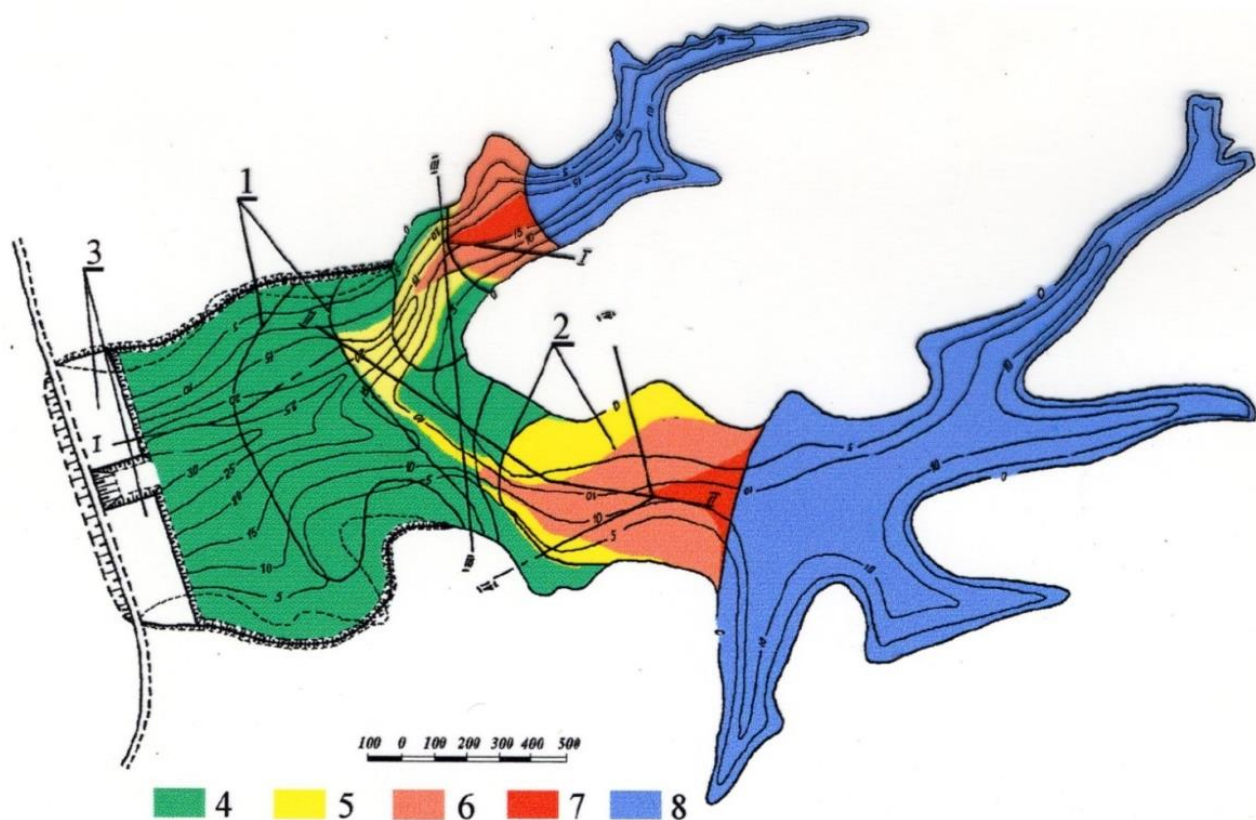
Для гидроотвала меловых пород «Балка Чуфичева» ЛГОКа (период формирования 1978-1988 годы) материалы районирования территории гидроотвала по несущей способности дают основания для дальнейшего наращивания гидроотвала как намывного сооружения при условии формирования ограждающих дамб из скальной вскрыши.

В 1995-1997 годах работы по изучению намывного массива «Лог Шармаровский» выполнялись совместно кафедрой геологии МГГУ с кафедрой механики грунтов и охраны окружающей среды Фрайбергской горной академии (ФГА). Главной задачей совместных работ была разработка комбинированных зондов для опробования слабых глинистых грунтов на основе патентов, полученных МГГУ на зондировочные устройства.

Гидроотвал «Лог Самаровский» Михайловского ГОКа КМА эксплуатировался с 1977 по 1993 гг. На этом объекте выполнен представительный комплекс зондировочных, топогеодезических и лабораторных работ [77, 78]. На рисунках 3.1 и 3.2 представлены карта фактического материала и карта инженерно-геологического районирования гидроотвала «Шамаровский Лог» Михайловского ГОКа. Характеристики физико-механических свойств намывных отложений даны в таблице 3.1 и на рисунках 3.3, 3.4.



**Рисунок 3.1** – Карта фактического материала и инженерно-геологическое районирование гидроотвала "Лог Самаровский". Дамбы: 1 — отсечная, 2 — ограждающая, 3 - граница гидроотвала; Профили: 4 — основные инженерно-геологические, 5 - вспомогательные инженерно-геологические; Скважины: 6 - зондировочные, 7 - стационарные наблюдательные, 8 - инженерно-геологические; 9 - шурфы для отбора проб; 10 - пункты маркшейдерского съемочного наблюдения; 11 - участок первой очереди рекультивации; Зоны: I - пляжная, II - пляжно-промежуточная, III - промежуточная, IV - промежуточно-прудковая, V - прудковая, VI – зеркало воды [2, 4, 69].



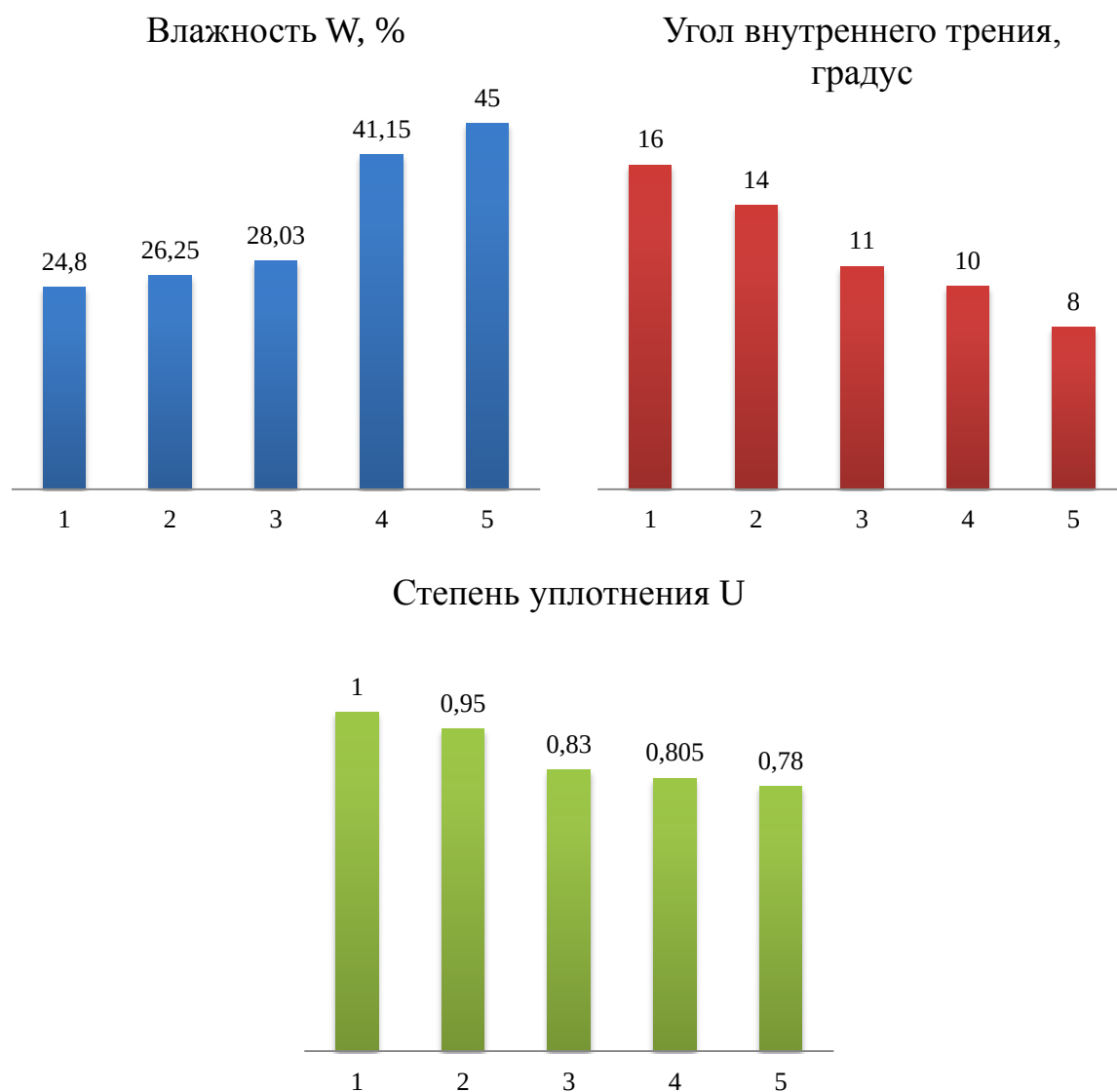
**Рисунок 3.2** – Карта зональности территории гидроотвала «Лог Шамаровский» по несущей способности намывного массива: 1 – границы инженерно-геологических зон; 2 – границы участков с различной несущей способностью намывных грунтов; 3 – рекультивированный участок гидроотвала; 4 – участки гидроотвала с  $P_{\text{доп}} > 1,5 \text{ кг/см}^2$ ; 5 – участки гидроотвала с  $P_{\text{доп}} = 1,0-1,5 \text{ кг/см}^2$ ; 6 – участки гидроотвала с  $P_{\text{доп}} = 0,5-1,0 \text{ кг/см}^2$ ; 7 – участки гидроотвала с  $P_{\text{доп}} < 0,5 \text{ кг/см}^2$ ; 8 – зеркало воды [2, 4, 69].

**Таблица 3.1** – Физико-механические свойства намывных грунтов гидроотвала «Лог Шамаровский»

| Участок<br>(зона)      | Содержание фракций, % |            |             |             |              |          | Плотность грунта,<br>г/см <sup>3</sup> | Плотность минер. частиц, г/см <sup>3</sup> | Влажность W, % | Начальный коэфф. пористости, $\varepsilon_0$ | Угол внутреннего трения $\varphi$ , градус | Сцепление, МПа·10 <sup>-1</sup> | Степень уплотнения | Коэффициент консолидации $C_v(q)$ , м <sup>2</sup> /сут |
|------------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|
|                        | Пески                 |            |             | Пыль        |              | Глина    |                                        |                                            |                |                                              |                                            |                                 |                    |                                                         |
|                        | >0,25мм               | 0,25-0,1мм | 0,05-0,01мм | 0,05-0,01мм | 0,01-0,005мм | <0,005мм |                                        |                                            |                |                                              |                                            |                                 |                    |                                                         |
| Пляжная                | 0,58                  | 22,77      | 12,57       | 47,1        | 7,88         | 9,1      | 2,08                                   | 2,65                                       | 24,8           | 0,59                                         | 16                                         | 0,16                            | 1,0                | >0,13                                                   |
| Пляжно-промежуточная   | 0,12                  | 4,5        | 7,2         | 64,68       | 12,1         | 11,4     | 2,04                                   | 2,65                                       | 26,25          | 0,64                                         | 13-15                                      | 0,15-0,16                       | 0,89-1,0           | >0,13                                                   |
| Промежуточная          | -                     | 0,36       | 1,8         | 27,84       | 47,8         | 22,2     | 1,98                                   | 2,66                                       | 28,03          | 0,72                                         | 9-14                                       | 0,18-0,22                       | 0,67-0,99          | 0,05exp(-0.06q)                                         |
| Промежуточно-прудковая | -                     | 0,1        | 1,6         | 19,3        | 45,24        | 23,76    | 1,85                                   | 2,7                                        | 41,15          | 1,06                                         | 9-12                                       | 0,18-0,23                       | 0,61-1,0           | 0,038exp(-0.09q)                                        |
| Прудковая зона         | -                     | 0,05       | 0,34        | 10,99       | 32,7         | 55,91    | 1,7                                    | 2,72                                       | 45,0           | 1,32                                         | 6-9                                        | 0,2-0,24                        | 0,59-0,97          | 0,025exp(-0.14q)                                        |



**Рисунок 3.3** – Содержание фракций по зонам гидроотвала «Лог Шамаровский» (МГОК)



**Рисунок 3.4** – Прочностные характеристики отложений гидроотвала «Лог Шамаровский» (МГОК) для различных зон: 1 – пляжная зона, 2 – пляжно-промежуточная зона, 3 – промежуточная зона, 4 – промежуточно-прудковая зона, 5 – прудковая зона

По методу кафедры геологии и маркшейдерского дела НИТУ «МИСиС» обратным расчетом, зная величину степени уплотнения, определялся коэффициент консолидации  $C_v$  ( $m^2/сут$ ) в зависимости от уплотняющей нагрузки  $q$  ( $кг/см^2$ ) для трех внутренних зон гидроотвала вида:

$$C_v = C_v^0 e^{-\lambda q} \quad (3.1)$$

промежуточной –

$$C_v = 0,05 \exp^{(-0,06q)}; \quad (3.2)$$

промежуточно-прудковой –

$$C_v = 0,038 \exp^{(-0,09q)}; \quad (3.3)$$

прудковой –

$$C_v = 0,025 \exp^{(-0,14q)}. \quad (3.4)$$

Для пляжной зоны получен

$$C_v \geq 0,13 \text{ м}^2/\text{сут}. \quad (3.5)$$

Полученные соотношения использовали при прогнозных расчетах степени уплотнения и несущей способности намывных отложений во времени [70].

В качестве исходных при расчетах уплотнения использовались компрессионные зависимости в последующем виде [2]:

Пляжная зона

$$\varepsilon = 0,046q^2 - 0,178q + 0,588 \quad 0 \text{ МПа} \leq q \leq 0,2 \text{ МПа}; \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = 0,558 - 0,18q \quad 0,2 \text{ МПа} \leq q \leq 0,4 \text{ МПа}; \quad (3.7)$$

Переходная (промежуточная) зона

$$\varepsilon = 0,041q^2 - 0,156q + 0,72 \quad 0 \text{ МПа} \leq q \leq 0,2 \text{ МПа}; \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = 0,694 - 0,019q \quad 0,2 \text{ МПа} \leq q \leq 0,4 \text{ МПа}; \quad (3.9)$$

Прудковая (ядерная) зона

$$\varepsilon = 0,144q^2 - 0,472q + 1,288 \quad 0 \text{ МПа} \leq q \leq 0,2 \text{ МПа}; \quad (3.10)$$

$$\varepsilon = 1,207 - 0,0385q \quad 0,2 \text{ МПа} \leq q \leq 0,4 \text{ МПа}; \quad (3.11)$$

Для определения несущей способности слабого основания использовались последующие соотношения между характеристиками сопротивления сдвигу техногенных отложений и степенью их уплотнения [2, 4, 69]:

Пляжная зона

$$\varphi(U) = 3 + 13U, \text{ град}, \quad (3.12)$$

$$C(U) = 0,1 + 0,06U, \text{ МПа}; \quad (3.13)$$

Промежуточная зона

$$\varphi(U) = 7 + 7U, \text{ град}; \quad (3.14)$$

$$C(U) = 0,13 + 0,09U, \text{ МПа}; \quad (3.15)$$



## Прудковая зона

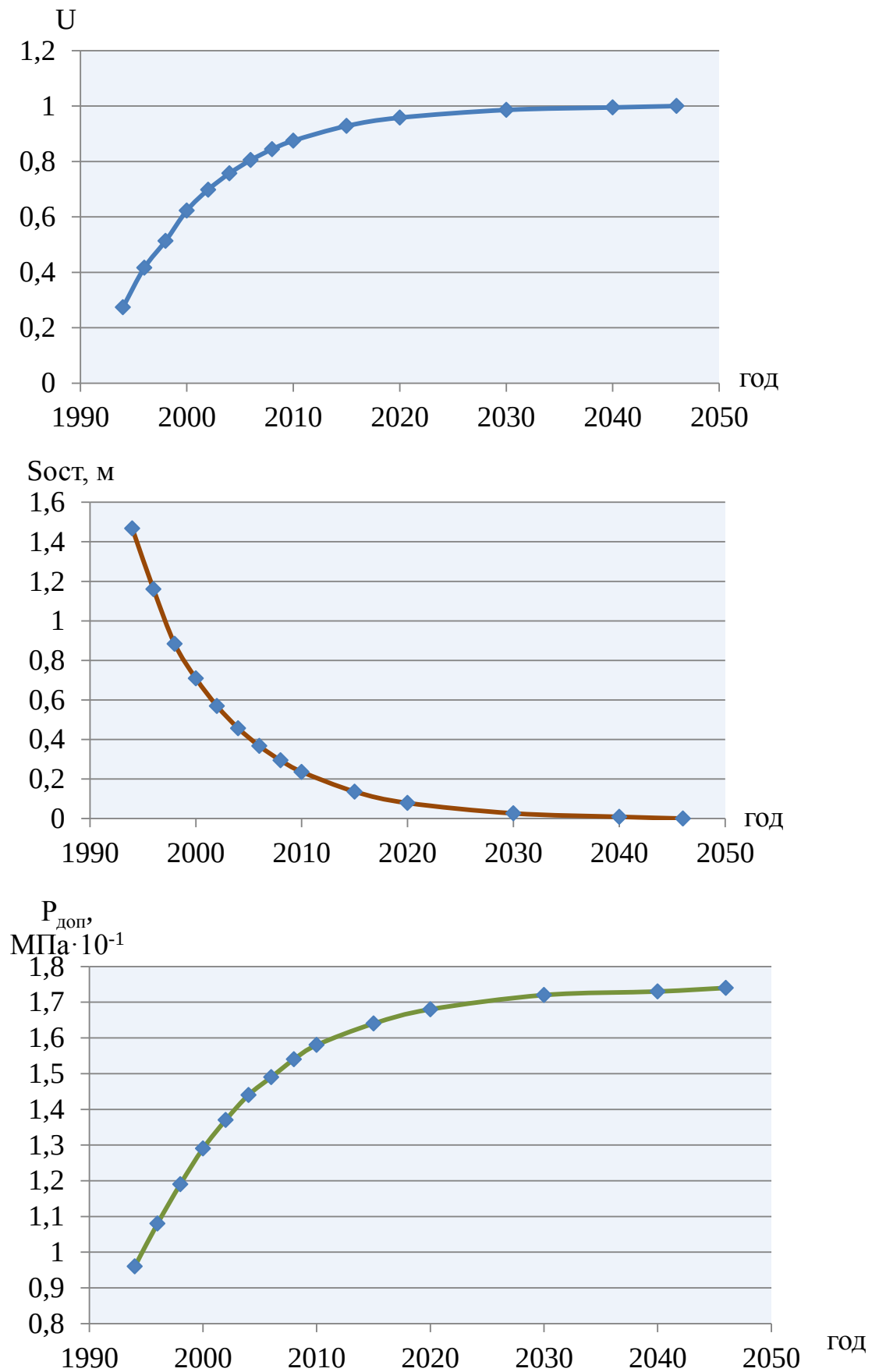
$$\varphi(U) = 4 + 8U, \text{ град}; \quad (3.16)$$

$$C(U) = 0,15 + 0,10U, \text{ МПа} \quad (3.17).$$

Данные о степени уплотнения, несущей способности, осадках намывного массива и динамике развития их во времени, которая представлена в таблице 3.2 и на рисунке 3.5, использованы при выполнении рекультивационных работ для разных зон гидроотвала [70].

**Таблица 3.2** – Прогнозные расчеты уплотнения и несущей способности гидроотвала «Лог Шамаровский» (МГОК) для прудковой зоны

| Год  | Степень уплотнения,<br>$U$ | Остаточная осадка,<br>$S_{ост}$ , м | Допустимая нагрузка<br>на массив<br>$P_{дон}$ , МПа $\times 10^{-1}$ |
|------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1994 | 0,274                      | 1,4673                              | 0,96                                                                 |
| 1996 | 0,416                      | 1,1606                              | 1,08                                                                 |
| 1998 | 0,531                      | 0,8840                              | 1,19                                                                 |
| 2000 | 0,623                      | 0,7096                              | 1,29                                                                 |
| 2002 | 0,698                      | 0,5695                              | 1,37                                                                 |
| 2004 | 0,757                      | 0,4571                              | 1,44                                                                 |
| 2006 | 0,805                      | 0,3669                              | 1,49                                                                 |
| 2008 | 0,844                      | 0,2945                              | 1,54                                                                 |
| 2010 | 0,875                      | 0,2364                              | 1,58                                                                 |
| 2015 | 0,928                      | 0,1364                              | 1,64                                                                 |
| 2020 | 0,958                      | 0,0787                              | 1,68                                                                 |
| 2030 | 0,986                      | 0,0262                              | 1,72                                                                 |
| 2040 | 0,995                      | 0,0087                              | 1,73                                                                 |
| 2046 | 1,00                       | 0,000                               | 1,74                                                                 |



**Рисунок 3.5** – Графики прогноза расчетов уплотнения и несущей способности гидроотвала «Лог Шамаровский» (МГОК) для прудковой зоны

Приведенные зависимости позволяют найти длительность периода, за который массив гидроотвала данной мощности достигает нужной несущей способности.

### **3.3 Реализация программы расчета уплотнения в слое переменной мощности применительно к условиям гидроотвала «Лог Шамаровский»**

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

Программа для определения порового давления, несущей способности и осадок гидроотвалов *rogur.exe* создана в 2016 году и работает под управлением операционной системой DOS. Запуск программы нужно производить следующим образом:

1. Запускается ДОСовский Norton Commander. Далее русификатор [kirill19.com](http://kirill19.com).

2. Запускается программа *rogur.exe*.

3. Появляется меню, для выбора задачи:

*«Намыв слоя переменной мощности»*

*«Пассивный отдых намытого слоя»*

*«Рост вышележащего слоя (нагрузки)»*

*«Отдых под внешней нагрузкой»*

*«Конец работы»*

В первом случае поровое давление  $P_u$  в расчетной точке поверхности скольжения зависит от действия уплотняющей нагрузки от собственного веса в процессе намыва.

Во втором случае поровое давление в намытом слое рассеивается под действием собственного веса.

Третий случай расчета порового давления определяется постепенным возрастанием уплотняющей нагрузки на намытый слой (например, намыв дренажных элементов).

Значение порового давления  $P_u$  для четвертого случая определяется рассеиванием под действием собственной массы слоя и нагрузки намытого сверху слоя.

При выборе одного из первых четырех пунктов меню появляется горизонтальное меню с пунктами: *«Файл Расчет Выход»*.

При выборе пункта *«Файл»* появляется падающее меню с пунктами:

*«Создать файл»*

*«Открыть файл»*

*«Компрессия»*

*«Запись в файл»*

*«Печать поровое давление»*

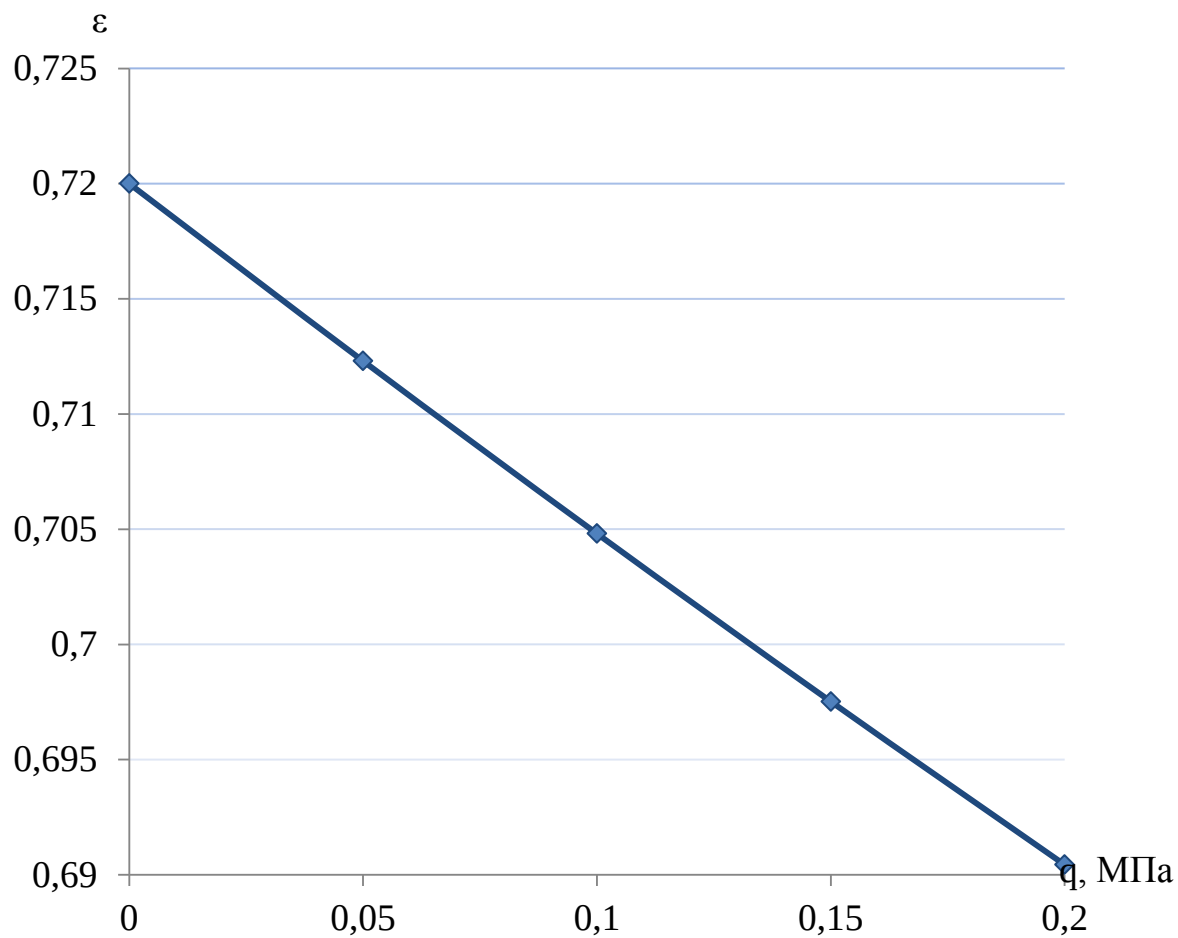
*«Печать Рдоп»*

При выборе пункта *«Создать файл»* всплывающее окно предлагает ввести сначала кривую компрессии. Для этого надо выбрать пункт *«Компрессия»*.

Пример ввода компрессии для всех четырех задач показан на рисунке 3.6.

Далее выбирается пункт *«Создать файл»*.

Для примера рассмотрим задачу об уплотнении намывного грунта на гидроотвале «Лог Шамаровский» Михайловского ГОКа. На рисунке 3.7 представлены исходные данные для расчета степени уплотнения и порового давления для задачи намыв слоя переменной мощности. После ввода данных выбирается пункт меню *«Запись в файл»*. В поле ввода вводится имя файла.



| q, МПа | ε      |
|--------|--------|
| 0      | 0,72   |
| 0,05   | 0,71   |
| 0,1    | 0,7048 |
| 0,15   | 0,6975 |
| 0,2    | 0,6904 |

$$\varepsilon = 0,041q^2 - 0,156q + 0,72$$

**Рисунок 3.6** – Ввод исходных данных для получения уравнения компрессионной кривой

| Файл                                               | Расчет   | Выход    |
|----------------------------------------------------|----------|----------|
| <b>Намыв слоя переменной мощности</b>              |          |          |
| Название параметра                                 | Ед. изм. | Значение |
| Признак расположения слоя на водоупоре или дренаже | 0 или 1  | 0        |
| Объемная плотность грунта                          | тн/м3    | 2.00     |
| Нач. коэф. консолидации                            | м2/сут   | 0.05     |
| Показатель консолидации                            | см2/кг   | 0.06     |
| Угол внутреннего трения неконсолидированный        | град     | 7.00     |
| Коэффициент угла внутреннего трения                | град     | 7.00     |
| Сцепление неконсолидированное                      | кг/см2   | 0.13     |
| Коэффициент сцепления                              | кг/см2   | 0.09     |
| Начальный коэффициент пористости                   |          | 0.72     |
| Коэффициент beta                                   |          | 0.7      |
| Уровень воды                                       |          | 1.0      |
| Предварительная уплотняющая нагрузка               | кг/см2   | 0        |
| Скорость намыва слоя                               | м/год    | 1        |
| Год начала намыва                                  | год      | 1977     |
| Время намыва                                       | год      | 16       |
| Esc - Выход в меню                                 |          |          |

**Рисунок 3.7 – Ввод исходных данных для задачи «Намыв слоя переменной мощности»**

После этого выбирается пункт меню «Расчет».

Для первой и третьей задачи появляется пункт меню «Расчет порового давления». На рисунке 3.8 представлен расчет степени уплотнения и график распределения порового давления по глубине по окончании намыва. На рисунке в строке под названием даны значения следующих величин:

$h$  – высота уплотняемого слоя;

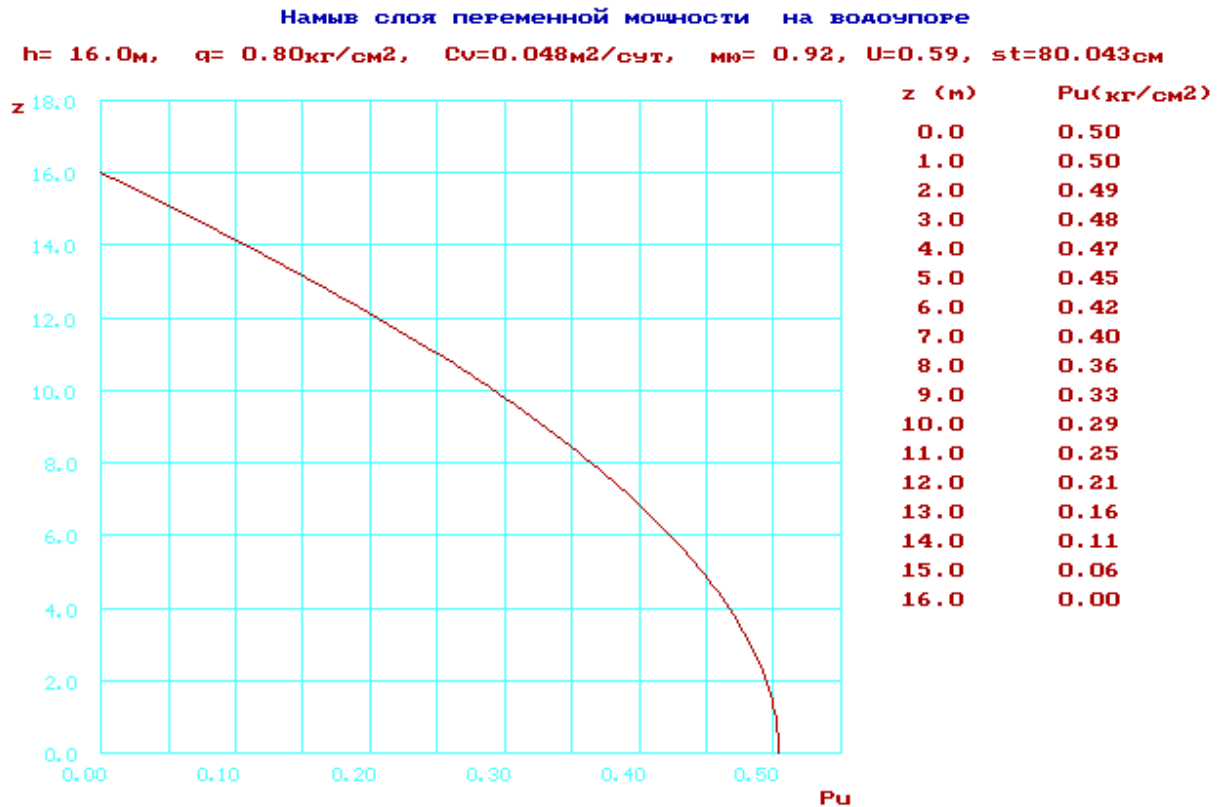
$q$  – нагрузка от собственного веса;

$C_v$  – коэффициент консолидации;

$U$  – степень уплотнения;

$S_t$  – текущая осадка гидроотвала;

$$\mu = v_u^2 t / C_v,$$



**Рисунок 3.8** – Расчет порового давления для задачи  
«Намыв слоя переменной мощности»

Для задачи «Пассивный отдых намытого слоя» поле ввода исходных данных имеет вид (Рисунок 3.9)

После записи исходных данных в файл выбирается пункт «Расчет», появляется меню из двух пунктов: «Расчет порового давления» и «Расчет  $P_{доп}$ ». Результаты расчета будут представлены в виде представленном на рисунке 3.10.

| Файл                                             | Расчет              | Выход    |
|--------------------------------------------------|---------------------|----------|
| <b>Пассивный отдых намытого слоя</b>             |                     |          |
| Название параметра                               | Ед. изм.            | Значение |
| Признак расположения слоя на водоупоре или арене | 0 или 1             | 0        |
| Объемная плотность грунта                        | тн/м <sup>3</sup>   | 2.00     |
| Нач. коэф. консолидации                          | м <sup>2</sup> /сут | 0.05     |
| Показатель консолидации                          | см <sup>2</sup> /кг | 0.06     |
| Угол внутреннего трения неконсолидированный      | град                | 7.00     |
| Коэффициент угла внутреннего трения              | град                | 7.00     |
| Сцепление неконсолидированное                    | кг/см <sup>2</sup>  | 0.13     |
| Коэффициент сцепления                            | кг/см <sup>2</sup>  | 0.09     |
| Начальный коэффициент пористости                 |                     | 0.72     |
| Коэффициент beta                                 |                     | 0.7      |
| Уровень воды                                     |                     | 1.00     |
| Предварительная уплотняющая нагрузка             | кг/см <sup>2</sup>  | 0        |
| Скорость намыва слоя                             | м/год               | 1        |
| Год начала намыва                                | год                 | 1977     |
| Время намыва                                     | год                 | 16       |
| Время отдыха                                     | год                 | 23       |
| Высотная отметка после намыва                    | м                   | 220.     |
| Коэффициент запаса для R <sub>доп</sub>          |                     | 1.2      |
| Esc - Выход в меню                               |                     |          |

Рисунок 3.9 – Исходные данные для задачи

«Пассивный отдых намытого слоя»

| Пассивный отдых намытого слоя на водоупоре |                       |                         |                     |                                        |                     |
|--------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------|
| Год                                        | Степень<br>уплотнения | Остаточная<br>осадка(м) | Осадок<br>за год(м) | R <sub>доп</sub> (кг/см <sup>2</sup> ) | Высотная<br>отметка |
| 1993.0                                     | 0.591                 | 1.5485                  | 0.0000              | 1.35                                   | 220.000             |
| 1994.0                                     | 0.656                 | 1.3020                  | 0.2465              | 1.43                                   | 219.754             |
| 1995.0                                     | 0.710                 | 1.0998                  | 0.2022              | 1.50                                   | 219.551             |
| 1996.0                                     | 0.754                 | 0.9298                  | 0.1700              | 1.55                                   | 219.381             |
| 1997.0                                     | 0.792                 | 0.7862                  | 0.1436              | 1.60                                   | 219.238             |
| 1998.0                                     | 0.824                 | 0.6648                  | 0.1214              | 1.65                                   | 219.116             |
| 1999.0                                     | 0.852                 | 0.5622                  | 0.1026              | 1.69                                   | 219.014             |
| 2000.0                                     | 0.874                 | 0.4754                  | 0.0868              | 1.72                                   | 218.927             |
| 2001.0                                     | 0.894                 | 0.4020                  | 0.0734              | 1.74                                   | 218.854             |
| 2002.0                                     | 0.910                 | 0.3400                  | 0.0621              | 1.77                                   | 218.792             |
| 2003.0                                     | 0.924                 | 0.2875                  | 0.0525              | 1.79                                   | 218.739             |
| 2004.0                                     | 0.936                 | 0.2431                  | 0.0444              | 1.81                                   | 218.695             |
| 2005.0                                     | 0.946                 | 0.2056                  | 0.0375              | 1.82                                   | 218.657             |
| 2006.0                                     | 0.954                 | 0.1739                  | 0.0317              | 1.83                                   | 218.625             |
| 2007.0                                     | 0.961                 | 0.1470                  | 0.0268              | 1.84                                   | 218.599             |
| 2008.0                                     | 0.967                 | 0.1243                  | 0.0227              | 1.85                                   | 218.576             |
| 2009.0                                     | 0.972                 | 0.1051                  | 0.0192              | 1.86                                   | 218.557             |
| 2010.0                                     | 0.977                 | 0.0889                  | 0.0162              | 1.87                                   | 218.540             |
| 2011.0                                     | 0.980                 | 0.0752                  | 0.0137              | 1.87                                   | 218.527             |
| 2012.0                                     | 0.983                 | 0.0636                  | 0.0116              | 1.88                                   | 218.515             |
| 2013.0                                     | 0.986                 | 0.0538                  | 0.0098              | 1.88                                   | 218.505             |
| 2014.0                                     | 0.988                 | 0.0455                  | 0.0083              | 1.88                                   | 218.497             |
| 2015.0                                     | 0.990                 | 0.0385                  | 0.0070              | 1.89                                   | 218.490             |
| 2016.0                                     | 0.991                 | 0.0325                  | 0.0059              | 1.89                                   | 218.484             |

Рисунок 3.10 – Расчет степени уплотнения, осадок, R<sub>доп</sub> для задачи

«Пассивный отдых намытого слоя»



Исходные данные для задачи «Рост вышележащего слоя (нагрузки)» вводятся в форму (рисунок 3.11):

| Рост вышележащего слоя (нагрузки)                |                     |          |
|--------------------------------------------------|---------------------|----------|
| Название параметра                               | Ед. изм.            | Значение |
| Признак расположения слоя на водоупоре или арене | 0 или 1             | 0        |
| Объемная плотность грунта                        | тн/м <sup>3</sup>   | 2.00     |
| Нач. коэф. консолидации                          | м <sup>2</sup> /сут | 0.05     |
| Показатель консолидации                          | см <sup>2</sup> /кг | 0.06     |
| Угол внутреннего трения неконсолидированный      | град                | 7.00     |
| Коэффициент угла внутреннего трения              | град                | 7.00     |
| Сцепление неконсолидированное                    | кг/см <sup>2</sup>  | 0.13     |
| Коэффициент сцепления                            | кг/см <sup>2</sup>  | 0.09     |
| Начальный коэффициент пористости                 |                     | 0.72     |
| Коэффициент beta                                 |                     | 0.7      |
| Уровень воды                                     |                     | 1.0      |
| Предварительная уплотняющая нагрузка             | кг/см <sup>2</sup>  | 0        |
| Скорость намыва слоя                             | м/год               | 1        |
| Год начала намыва                                | год                 | 1977     |
| Время намыва                                     | год                 | 16       |
| Время отдыха                                     | год                 | 23       |
| Время намыва вышележащего слоя                   | год                 | 5.0      |
| Скорость намыва вышележащего слоя                | м/год               | 1.0      |
| Уровень воды в вышележащем слое                  |                     | 1.0      |

Esc - Выход в меню

Рисунок 3.11 – Исходные данные для задачи «Рост вышележащего слоя (нагрузки)»

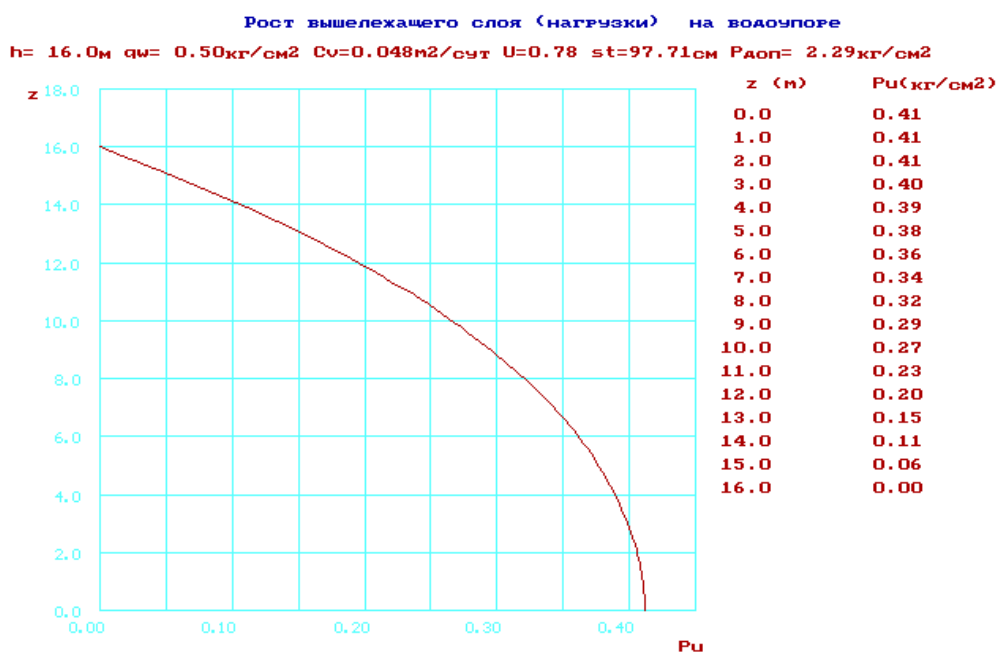


Рисунок 3.12 – Расчет порового давления для задачи «Рост вышележащего слоя (нагрузки)»

Исходные данные для задачи «Отдых под внешней нагрузкой» вводятся в форму (рисунок 3.13):

| Файл                                             | Расчет              | Выход    |
|--------------------------------------------------|---------------------|----------|
| Отдых под внешней нагрузкой                      |                     |          |
| Название параметра                               | Ед. изм.            | Значение |
| Признак расположения слоя на водоупоре или арене | 0 или 1             | 0        |
| Объемная плотность грунта                        | тн/м <sup>3</sup>   | 2.00     |
| Нач. коэф. консолидации                          | м <sup>2</sup> /сут | 0.05     |
| Показатель консолидации                          | см <sup>2</sup> /кг | 0.06     |
| Угол внутреннего трения неконсолидированный      | град                | 7.00     |
| Коэффициент угла внутреннего трения              | град                | 7.00     |
| Сцепление неконсолидированное                    | кг/см <sup>2</sup>  | 0.13     |
| Коэффициент сцепления                            | кг/см <sup>2</sup>  | 0.09     |
| Начальный коэффициент пористости                 |                     | 0.72     |
| Коэффициент beta                                 |                     | 0.7      |
| Уровень воды                                     |                     | 1.0      |
| Предварительная уплотняющая нагрузка             | кг/см <sup>2</sup>  | 0        |
| Скорость намыва слоя                             | м/год               | 1        |
| Год начала намыва                                | год                 | 1977     |
| Время намыва                                     | год                 | 16       |
| Время отдыха                                     | год                 | 23       |
| Время намыва вышележащего слоя                   | год                 | 5.0      |
| Скорость намыва вышележащего слоя                | м/год               | 1.       |
| Уровень воды в вышележащем слое                  |                     | 1.0      |
| Время отдыха вышележащего слоя                   | год                 | 5.       |
| Высотная отметка после намыва                    | м                   | 223      |
| Коэффициент запаса для $R_{доп}$                 |                     | 1.2      |
| Esc - Выход в меню                               |                     |          |

Рисунок 3.13 – Исходные данные для задачи «Отдых под внешней нагрузкой»

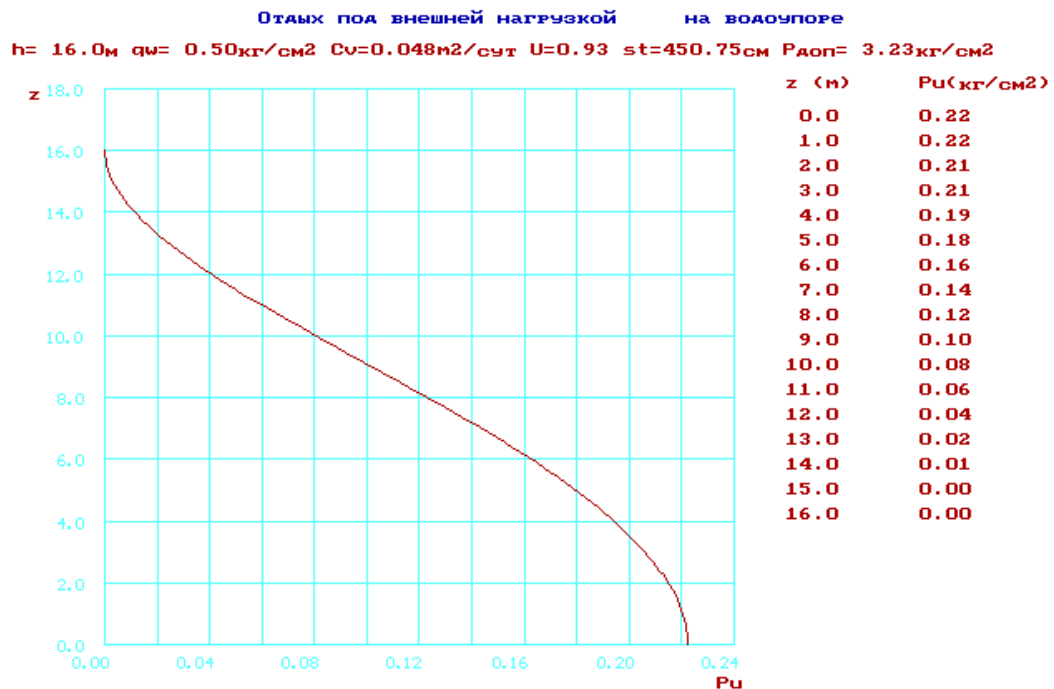


Рисунок 3.14 – Расчет порового давления для задачи «Отдых под внешней нагрузкой»

| Год    | Отдых под внешней нагрузкой |                         |                     | на водоупоре       |                     |
|--------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|        | Степень<br>уплотнения       | Остаточная<br>осадка(м) | Осадка<br>за год(м) | $P_{доп}(кг/см^2)$ | Высотная<br>отметка |
| 2021.0 | 0.839                       | 0.7740                  | 0.0000              | 3.01               | 223.000             |
| 2022.0 | 0.866                       | 0.6483                  | 0.1257              | 3.07               | 222.874             |
| 2023.0 | 0.888                       | 0.5424                  | 0.1059              | 3.12               | 222.768             |
| 2024.0 | 0.906                       | 0.4531                  | 0.0893              | 3.17               | 222.679             |
| 2025.0 | 0.922                       | 0.3778                  | 0.0753              | 3.20               | 222.604             |
| 2026.0 | 0.935                       | 0.3143                  | 0.0635              | 3.23               | 222.540             |

**Рисунок 3.15** – Расчет степени уплотнения, осадок,  $P_{доп}$  для задачи  
«Отдых под внешней нагрузкой»

Из рассмотренных примеров расчетов следует, что программа охватывает все стадии существования намывного массива. Завершается оформление заявочных материалов на получение регистрационного свидетельства на данную программу. Программа базируется на расчетных зависимостях, предложенных на кафедре Геологии МГИ-МГГУ [3, 6, 68].

### Выводы по 3 главе

Инженерно-геологическое районирование дает возможность сопоставлять различные участки техногенных массивов, а также прогнозировать дальнейшее использование территорий. Районирование предполагает выделение в пределах исследуемых территорий однородных в инженерно-геологическом отношении классификационных единиц определенного уровня.

Показаны примеры разработки инженерных решений по освоению намывных массивов гидроотвалах Лебединского ГОКа, «Березовый Лог» и «Балка Чуфичева», на основе (с использованием) материалов инженерно-геологического районирования этих объектов. Материалы инженерно-геологического районирования гидроотвала Лог Шамаровский Михайловского ГОКа рассматриваются как основа для разработки комплекса мероприятий по дальнейшему использованию территории этого намывного сооружения (которые рассматриваются в следующей главе).

## **Глава 4 Обоснование мероприятий по освоению техногенных массивов**

### **4.1 Комплексное использование территории гидроотвала «Лог Шамаровский»**

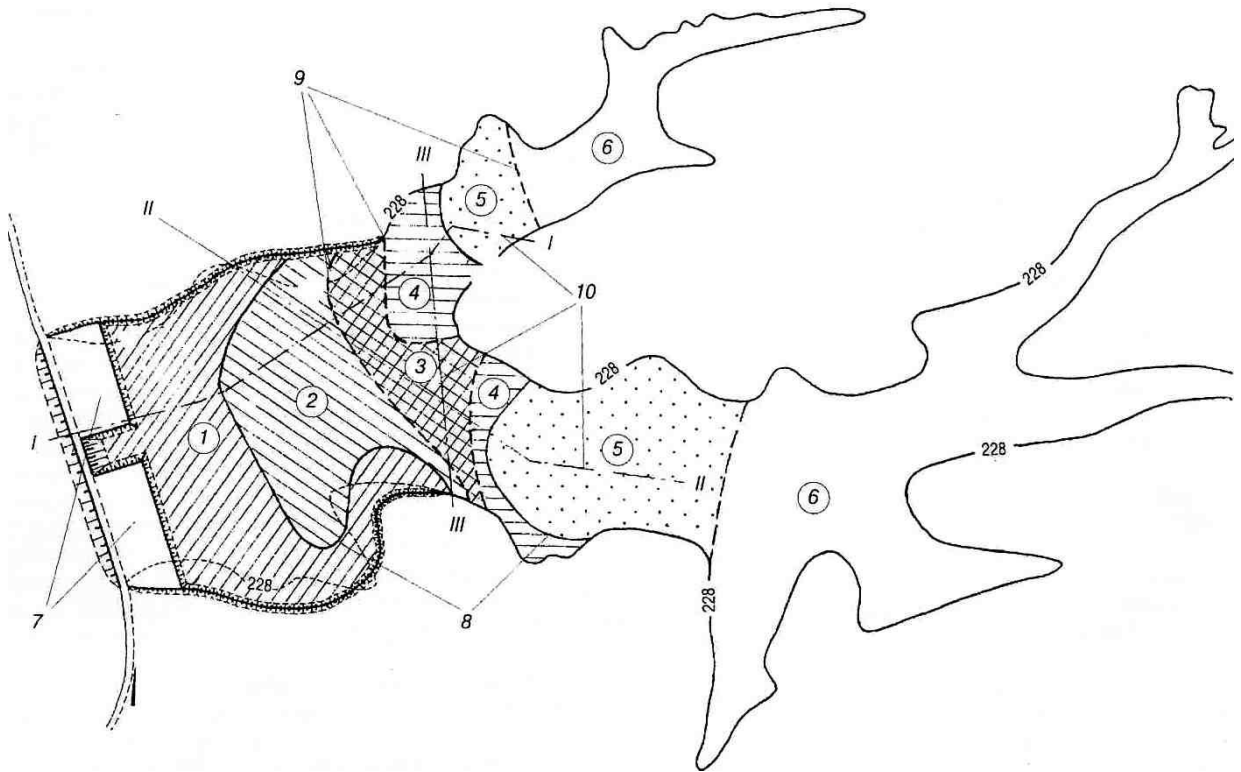
В качестве основного объекта исследования выбран гидроотвал «Шамаровский Лог» Михайловского ГОКа (КМА, Курская область), инженерно-геологические свойства техногенных отложений которого показательны для большинства намывных массивов Михайловского района КМА и Кузбасса.

Гидромеханизированные технологии на Михайловском карьере до 1993 года применяли для разработки и транспортирования покровных четвертичных отложений мощностью до 35 м. Складирование отходов рудообогащения на МГОКе продолжается гидравлическим способом.

Формирование гидроотвала «Лог Шамаровский» производили в 1977-1993 гг. Гидроотвал (овражно-балочного типа) создан путем разделения хвостохранилища на р. Песочной намывной дамбой из хвостов обогащения с пригрузкой из окисленных некондиционных кварцитов [85-88].

Различные способы намыва определили сложное, слоистое строение техногенного массива и нечеткое положение границ инженерно-геологических зон [14, 88]. Результаты исследований позволили выделить на территории гидроотвала «Шамаровский Лог» три основные зоны: пляжную, площадью 58 га; промежуточную, состоящую из трех подзон, площадью 61,5 га; прудковую, площадью 166 га, с зеркалом воды площадью 104,5 га [77].

По результатам исследований на гидроотвале «Шамаровский Лог» составлена карта инженерно-геологического районирования его территории (рисунок 4.1) [77, 85, 14].



**Рисунок 4.1** – Карта инженерно-геологического районирования территории гидроотвала: 1 – пляжная зона; 2 – пляжно-промежуточная зона; 3 – промежуточная зона; 4 – промежуточно-прудковая зона; 5 – прудковая зона; 6 – зеркало воды; 7 – рекультивированный участок; 8 – граница между инженерно-геологическими зонами; 9 – граница между подзонами; I-I, II-II, III-III – инженерно-геологические профили [14, 77, 85, 88]

Используя значения степени уплотнения, по методике МГГУ обратным расчетом, определялся коэффициент консолидации  $C_V$  (м<sup>2</sup>/сут) в зависимости от уплотняющей нагрузки  $q$  (кг/см<sup>2</sup> или МПа·10<sup>-1</sup>) вида  $C_V = C_V^0 \exp^{-\lambda q}$  для трех внутренних зон гидроотвала [77]:

Для промежуточной зоны:  $C_V = 0,05 \exp^{-0,06q}$ .

Для промежуточно-прудковой зоны:  $C_V = 0,038 \exp^{-0,09q}$ .

Для прудковой зоны:  $C_V = 0,025 \exp^{-0,14q}$ ,

где  $q$  – уплотняющая нагрузка от собственного веса намывного грунта, МПа·10<sup>-1</sup>.

Полученные соотношения использовались при прогнозных расчетах степени уплотнения и несущей способности намывных грунтов во времени.

Программа расчетов позволяет определить степень уплотнения и через нее – установить текущие значения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения, текущих и остаточных значений осадок намывного массива и допустимых внешних нагрузок на него до момента стабилизации осадок [77].

Данная методика оценки несущей способности техногенных отложений позволяет определить величину внешних нагрузок и время «отдыха», которое необходимо для уплотнения (упрочнения) техногенного массива.

Интенсивность намыва гидроотвала составляла 1-2 м в год. Гидроотвал имеет общую площадь 250 га, всего в него складировано около 21 млн. м<sup>3</sup> вскрышных пород – супесей и лессовидных суглинков четвертичного возраста. В данный момент техногенный массив находится в стадии «отдыха» [77].

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:

$$\varphi(U) = \varphi_z + (\varphi_k - \varphi_z) U; \quad (4.1)$$

$$C(U) = C_z + (C_k - C_z) U, \quad (4.2)$$

где  $U$  – степень уплотнения;

$\varphi$  – угол внутреннего трения;

$C$  – сцепление;

$\varphi_k, C_k, \varphi_z, C_z$  – соответственно величина  $\varphi$  и  $C$  для консолидированного состояния глинистых грунтов и в условиях закрытой системы (без возможности дренажа) по данным трехосных (стабилометрических) испытаний.

Параметры  $\varphi$  и  $C$  используются при расчете несущей способности оснований с учетом коэффициента пригрузки.

Степень уплотнения  $U_{\Sigma}$  и общая осадка намывного слоя  $S_{\Sigma}$  определяется способом суперпозиции.

$$S_{\Sigma} = U_{\Sigma} S_{\infty}^{\Sigma} \quad (4.3)$$

Расчет максимальной несущей способности основания выполняют по формуле Прандтля-Рейснера (см. формулу 1.6) [1, 3, 4]. Графики на рисунке 1.2 (глава 1) [77].

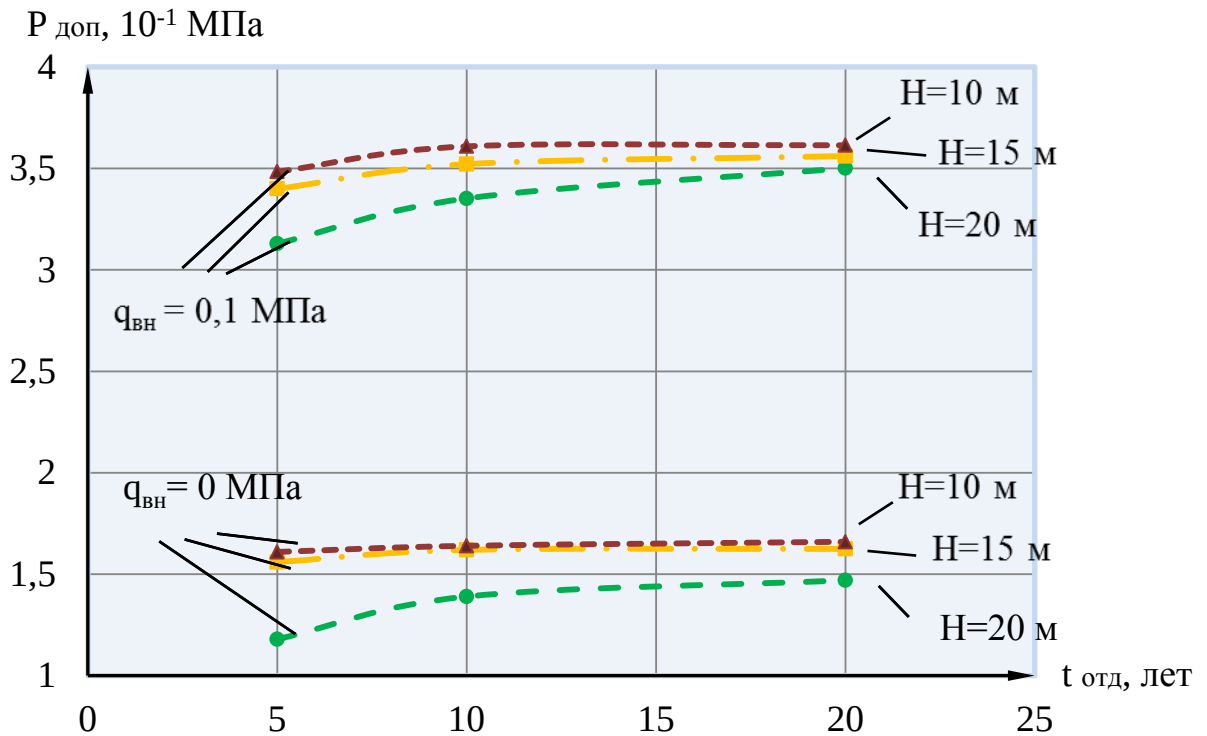
После анализа расчетных значений степени уплотнения, несущей способности, осадок намывного массива и динамики формирования их во времени, предложен комплекс работ по рекультивации гидроотвала.

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 [77, 85].

На рисунке 4.2 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 осуществляются 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 [77, 78].



**Рисунок 4.2** – – Зависимости допустимых нагрузок  $P_{\text{доп}}$  на намывное основание от времени отдыха гидроотвала  $t_{\text{отд}}$  при мощности слоя  $H=10\text{м}$ ,  $15\text{м}$ ,  $20\text{м}$  при внешних нагрузках  $q_{\text{вн}}=0 \text{ МПа}$  (уплотнение слоя под действием собственного веса);  $q_{\text{вн}}=0,1 \text{ МПа кг/см}^2$

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.

#### 4.2 Определение параметров хранилища фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»

ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» входит в четверку больших российских компаний по производству фосфорсодержащих удобрений, кормовых добавок, фосфорной и серной кислот. ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» находится в городе Воскресенске – одном из про-



мышленных центров Подмосквья, в 88 километрах к юго-востоку от Москвы.

Основными видами продукции, производимой ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», являются азотно-фосфорные и азотно-фосфорно-калийные удобрения (NPK), которые используются на всех видах почв и при выращивании различных типов сельскохозяйственных культур. Также предприятие производит фосфорные и серные кислоты разных марок.

Вся производимая предприятием продукция обладает достойным качеством и соответствует российским и международным стандартам.

Главным сырьем для производства продукции компании является апатит, сера и аммиак.

Существует действующий полигон складирования вторичных промышленных материалов - Лопатинский отвал, он находится в четырех километрах к северо-востоку от территории предприятия ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» и занимает площадь 55 га. Вследствие того, что карьер в течение пяти лет использовался как свалка, карьерная выемка заполнена не только вскрышными породами (пески, супеси, суглинки, глины), но и строительными мусором и отходами. Под полигон ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» территория начала использоваться с 1979 года для складирования отходов производства, которые были представлены на первом этапе фосфогипсами и пиритовыми огарками.

Действующий отвал фосфогипса показан на рисунке 4.3.

Климат района умеренно-континентальный со средним морозным периодом 103 дня и среднегодовой температурой воздуха 3,8°C. Максимальные значения летних и зимних температур +38°C и – 44°C. Нормативная глубина сезонного промерзания пород для суглинков 140 см, для супесей, мелких и пылеватых песков – 168 см. Средняя многолетняя сумма осадков за год равна 646 мм, при этом в теплый период времени с апреля по октябрь выпадает 388 мм или примерно 60% от годового объема. Средняя продолжительность залегания снежного покрова 138 дней.



**Рисунок 4.3** – Действующий отвал фосфогипса

При рассмотрении условий устойчивости отвалов, кроме отмеченных водоносных комплексов естественного происхождения, следует учитывать наличие техногенного водоносного горизонта, функционирующего в теле отвального массива (в нижней части) и его основании, сложенном пиритовыми огарками и строительным мусором. Питание техногенного водоносного горизонта формируется за счет инфильтрации атмосферных осадков и дегидратации фосфогипсов [89-91].

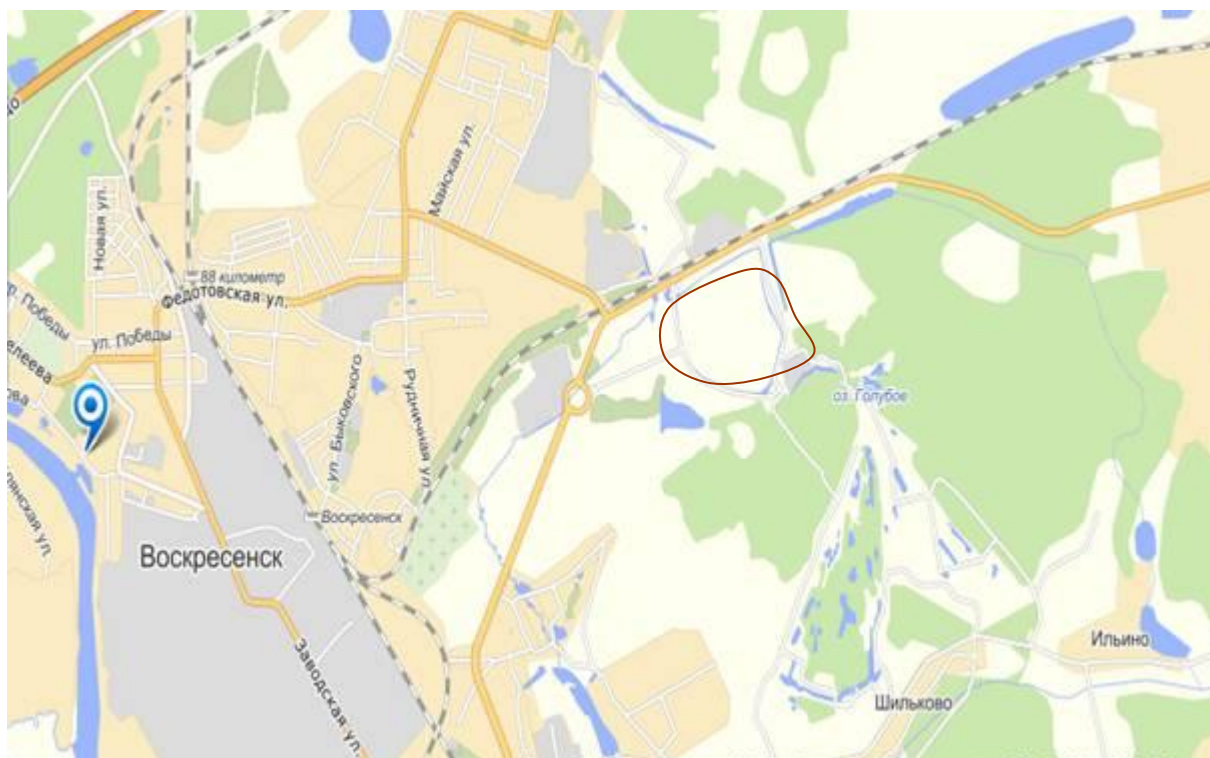
Инженерно-геологические условия района площадки отвала определяются распространением техногенных пород отвалов фосфогипса и естественных отложений, выделенных при геологическом описании.

Физико-механические свойства выделенных инженерно-геологических элементов, полученные по результатам многочисленных исследований в предыдущие годы, приведены в таблице 4.1 [91].

В настоящее время действующий полигон имеет холмистую поверхность. Высота ярусов отвала колеблется от 17 до 36 м. Заложение откосов меняется от 1:1,1 до 1:1,7. Переменной является также высота ярусов отсыпки. Вдоль полигона с северной стороны проходит асфальтированная автодорога Воскресенск-Егорьевск. Расстояние от полигона до жилой застройки (с. Воскресенское, д. Шильково, Ильино) не менее 2-3 километров (рисунок 4.4).

**Таблица 4.1** – Физико-механические свойства пород площадки отвала

| №№<br>ИГЭ | Наименование породы               | Плотность,<br>$\rho$ , т/м <sup>3</sup> | Угол внут-<br>реннего тре-<br>ния<br>$\varphi$ , град. | Сцепление,<br>$C$ , кг/см <sup>2</sup> |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1         | Фосфогипс рыхлый                  | 1.37                                    | 31                                                     | 0                                      |
| 2         | Фосфогипс плотный                 | 1,49                                    | 27                                                     | 0,6                                    |
| 3         | Фосфогипс пластичный              | 1,73                                    | 24                                                     | 0,56                                   |
| 4         | Пиритовые огарки                  | 1.67                                    | 26                                                     | 0.20                                   |
| 5         | Супеси насыпные                   | 2,05                                    | 19                                                     | 0.33                                   |
| 6         | Суглинки насыпные                 | 2,01                                    | 16                                                     | 0.23                                   |
| 7         | Пески мелкие                      | 1.61                                    | 29                                                     | 0                                      |
| 8         | Пески пылеватые                   | 1,61                                    | 27                                                     | 0,26                                   |
| 9         | Глины волжские                    | 1,68                                    | 13                                                     | 0,56                                   |
| 10        | Глины келловейско-<br>оксфордские | 1,75                                    | 16                                                     | 0,51                                   |
| 11        | Известняк                         | 2,00                                    | 22                                                     | 5,00                                   |



**Рисунок 4.4** – Схема территориального размещения отвала фосфогипса

Предприятие ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» в различные годы своей деятельности размещало в отвалы два вида гипсовых отходов: дигидрат сульфата кальция (фосфогипс) и фосфополугидрат сульфата кальция. При этом на первом этапе, сопровождавшимся формированием насыпи на высоту около 50 м, отсыпалась смесь дигидрата и полугидрата [89, 91]. В последние годы при производстве фосфорной кислоты используется технология, предусматривающая образование отходов в виде полугидрата [89, 91].

Инструментальные измерения параметров отвала № 2 производились ОАО «Воскресенские минеральные удобрения». Углы откоса отвала составили [89, 91]:

- на северном участке от  $32^\circ$  до  $41^\circ$  при высоте отвала от 29 до 36 м;
- на восточном участке от  $30^\circ$  до  $42^\circ$  при высоте отвала от 25 до 33 м;
- на южном участке от  $36^\circ$  до  $38^\circ$  при высоте отвала от 21 до 27 м;
- на западном участке от  $32^\circ$  до  $43^\circ$  при высоте отвала от 17 до 28 м.

Лопатинский отвал спроектирован по классической веерной схеме размещения от периферии к центру поярусно путем разгрузки самосвалов частично под откос, частично на верхнюю площадку и далее сталкиванием породы бульдозером [89, 91]. Особая укатка пород при складировании откосов не применялась, уплотнение отсыпанных масс происходило в процессе их хранения под действием веса вышележащей породной массы. По укрупненным подсчетам объемы заскладированных отходов в отвал по состоянию на 2015 г. оцениваются около 40 млн. тонн [89, 91].

К югу от площадки, на расстоянии около 0,7 км, находятся верховье реки Молчановки, которая впадает в реку Медведку, являющуюся левобережным притоком реки Москвы. Водосборная площадь реки Молчановки - 7,8 км<sup>2</sup>.

Площадка расположена в правобережной части долины реки Молчановки. Рельеф правобережного склона осложнен, что является следствием того, что здесь ранее располагался карьер фосфоритов, позднее рекультивированный. Нарушение рельефа существенно уменьшило сток реки.

В пределах водосбора реки Молчановки располагается три искусственных водоема, которые не пересыхают в течение года. Наиболее крупный из них, расположенный к востоку от существующего полигона в границах его расширения, представляет собой траншею, которая осталась не засыпанной при рекультивации карьера фосфоритов. Ниже (южнее) границ полигона по течению реки расположено три пруда. Ближайший был создан для водоснабжения карьера и в настоящее время не используется, два нижних используются для полива сельскохозяйственных угодий.

Основной объем стока реки Молчановки (60-70%) проходит в весеннее половодье (апрель - май). В маловодные годы в период межени сток ее незначителен и до реки Медведки не доходит. Только паводковый сток Молчановки обеспечивает водообмен в прудах и поступает в реку Медведку.

Грунтовые воды вскрыты на глубине от 1,1 до 10,2 м в насыпных грунтах. Питание грунтовых вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Расход талых вод на формирование ресурсов грунто-



вых вод оценивается от 1,3 до 1,5 л/с-км<sup>2</sup>. Разгрузка воды происходит в сторону прудов, расположенных на западе, севере и северо-востоке. Уклоны грунтовых вод - от 0,006 до 0,022. Годовая амплитуда колебаний уровня грунтовых вод составляет 1,0 - 1,2 м.

Площадка расширения полигона по геологическому и гидрогеологическому состоянию находится в благоприятных условиях, так как расположена в зоне развития юрских глин, предотвращающих попадание загрязненной воды в продуктивные водоносные горизонты. За время эксплуатации подольско-мячковского водоносного горизонта ухудшения качества воды не зафиксировано, это говорит о том, что юрские глины являются надежной защитой касимовского и подольско-мячковского горизонтов от техногенного воздействия расположенного в непосредственной близости полигона.

Для предотвращения вредного воздействия существующего полигона на окружающую среду предусмотрен круговой открытый дренаж, в который поступает поверхностный сток с территории полигона и из водоносного горизонта, который формируется в толще отсыпанного фосфогипса. Из-за повышенной кислотности, высокой минерализации (от 7 до 8 г/л), наличию различных химических элементов, содержание которых превышает нормы, вода из дренажа перекачивается на очистные сооружения с помощью двух дренажных насосных станций.

Дренажные насосные станции - заглубленные, круглые диаметром 4,5 м, расположены в стороне от дренажной канавы (на расстоянии от 30 до 35 м), оборудованы насосами марки ТХИ-90/49. Наблюдения за грунтовым потоком свидетельствуют об удовлетворительной работе существующей дренажной системы.

Пространство между основанием откоса полигона и дренажной канавой, а также откосы канавы по всему периметру заросли кустарником, травой и деревьями.

Для решения вопроса устойчивости отвала изучены следующие факторы:

- сопротивление сдвигу отвальных пород;

- прочностные свойства пород основания отвалов, включая характеристики сопротивления сдвигу по контактам отвал – основание или контактам в породах основания отвалов;

- технология отвалообразования и параметры формируемого отвала [92, 95, 96].

Из наблюдаемых на отвалах видов деформаций – оползней, осыпей, просадок и оплывин более небезопасным и широко распространенным видом являются оползни [96]. Основной причиной оползней является несоответствие параметров отвалов несущей способности отвальной массы и пород основания отвалов. В зависимости от положения нижней границы поверхности скольжения оползни разделяют на – надподошвенные, контактные и под-  
подошвенные [96].

Надподошвенные оползни отвалов характеризуются плавной криволинейной поверхностью скольжения, образующейся в теле отвала и выходящей в нижнюю бровку откоса.

Пододошвенные оползни характеризуются ломаной поверхностью скольжения, проходящей по контакту отвал – основание либо контакту меж слоями в породах основания.

Данными видами оползней определяются и схемы расчета устойчивости отвалов, соответствующие конкретной схеме возможной деформации отвала [96, 98-100].

Горно-геологические условия отвалообразования, встречающиеся в практике, могут быть сведены к следующим положениям:

- отвалы прочных или слабых пород на прочном основании;
- то же, на наклонном слоистом основании;
- то же, на слабом слое.

Расчеты предельных параметров отвалов производятся с коэффициентом запаса, величина которого зависит от следующих характеристик:

- погрешности методов расчета, включая и погрешности самих расчетов;
- погрешности определения основных расчетных характеристик сопротивления сдвигу отвальной смеси;

- изменения этих характеристик с течением времени;
- погрешности определения плотности отвальных пород, составляющих призму возможного обрушения [91, 101-104].

Погрешности за счет остальных причин оказываются существенно меньше. Так, погрешность определения средней величины объемного веса пород, составляющих призму возможного обрушения, не превышает 2–3%, погрешности методов расчета – 3–5%, погрешность определения главных расчетных характеристик зависит от способа их определения [89-91].

Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости для различных условий отвалообразования (по ВНИМИ) представлены в таблице 4.2 [93].

**Таблица 4.2** – Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости [93]

| Отвалообразующие породы                                    | Типы отвала               | Основание отвала                                        | Рекомендуемый коэффициент запаса устойчивости |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Скальные и полускальные породы                             | Внешний<br>Внутренний     | Прочное<br>Слоистое                                     | 1,05<br>1,05* – 1,10                          |
| Рыхлые песчано-глинистые породы                            | Внешний<br><br>Внутренний | Прочное<br>Слоистое<br>Прочное<br>Слоистое              | 1,10<br>1,10* – 1,20<br>1,10* – 1,15<br>1,20  |
| Слабые глинистые породы                                    | Внешний<br><br>Внутренний | Прочное<br>Слоистое,<br>слоистое<br>Прочное<br>Слоистое | 1,20<br>1,20* – 1,30<br>1,20<br>1,20* – 1,30  |
| Скальные, полускальные.<br>Рыхлые песчано-глинистые породы | Нагруженный               | Любое                                                   | 1,10* – 1,20<br>1,20* – 1,30                  |

\* Допустимо при использовании в расчетах показателей физико-механических параметров пород отвалов и их оснований, определенных методом обратных расчетов либо натурными испытаниями [90].



#### 4.2.1 Устойчивость отвалов слабых пород на прочном основании

В расчетных схемах, как правило, исследуют два типа отвальных смесей: отвалообразующие породы, которые близки по своим прочностным свойствам и породы, которые по прочности заметно отличаются.

В первом типе отвальных смесей сопротивление сдвигу определяется как средневзвешенная величина для совокупности физико-механических характеристик пород нарушенной структуры, составляющих отвал [98].

При втором случае, наибольшее влияние на сопротивление сдвигу будут оказывать породы с наиболее низкими физико-механическими свойствами.

При содержании в отвалообразующих породах от 15 до 40% глинистого заполнителя происходит снижение сопротивления сдвигу – от сопротивления сдвигу прочных пород до сопротивления сдвигу глинистого заполнителя.

Максимальная высота устойчивых отвалов слабых пород на прочном основании ограничивается значением, при котором сопротивление смеси сдвигу достигает максимума –  $\tau = \max$  [91, 104].

В диапазоне напряжений от 0 до точки характеризующей напряжение, при котором начинается разворот и разрушение отдельных кусков пород вдоль поверхности скольжения, сопротивление сдвигу будет определяться только углом трения, близким к углу естественного откоса [91, 104].

При больших напряжениях уплотнение с увеличением сопротивления пород сдвигу происходит до тех пор, пока нижняя часть массива отвала не перейдет в двухфазное состояние и сопротивление сдвигу смеси достигнет максимума. Высота отвала при этом является предельной [93, 104].

Для расчёта устойчивости породных масс техногенных массивов более подходят методы алгебраического суммирования сил и многоугольника сил. Расчёты устойчивости в большей степени содержат в себе определение сдвигающих и удерживающих сил (напряжений) и установление, на базе сопо-

ставления этих сил, коэффициентов запаса устойчивости откосов данного профиля [91].

Для того чтобы произвести оценку устойчивости отвальных насыпей требуется следующее:

- 1) точные характеристики о свойствах пород основания и располагаемого на нём отвала;
- 2) информация о параметрах необходимого техногенного массива;
- 3) графическая модель данного откосного сооружения и произвести расчёт способом алгебраического суммирования и многоугольника сил, с определением коэффициента запаса устойчивости [91, 100].

Физико-механические свойства отвальных пород и основания приведены в таблице 4.3.

**Таблица 4.3** – Физико-механические свойства отвальных пород и основания

| Наименование<br>Породы | Показатели физико-механических свойств |               |           |
|------------------------|----------------------------------------|---------------|-----------|
|                        | $\rho$ , т/м <sup>3</sup>              | $\phi$ , град | C, МПа    |
| Фосфогипс<br>Рыхлый    | 1,4-1,55                               | 25-31         | 0,03-0,06 |
| Фосфогипс<br>Плотный   | 1,65-1,75                              | 27-34         | 0,05-0,8  |
| Юрская глина           | 1,7-1,8                                | 11-14         | 0,09-0,15 |
| Известняк              | 1,95-2                                 | 26-30         | 5-20      |
| Фосфогипс<br>Рыхлый    | 1,4-1,55                               | 25-31         | 0,03-0,06 |
| Фосфогипс<br>Плотный   | 1,65-1,75                              | 27-34         | 0,05-0,8  |
| Юрская глина           | 1,7-1,8                                | 11-14         | 0,09-0,15 |
| Известняк              | 1,95-2                                 | 26-30         | 5-20      |

Поверхность скольжения проходит в теле отвала и частично – по глинистым породам основания.

Коэффициент запаса устойчивости определяется по методу алгебраического суммирования сил следующим образом:

$$\eta = \frac{\sum (N_i \operatorname{tg} l_i) + \sum C_i \cdot l_i}{\sum T_i}, \quad (4.4)$$

где  $l_i$  – угол внутреннего трения (по слоям);

$c_i$  – сцепление (по слоям);

$N_i = p \cos \alpha_i$  – нормальная составляющая веса блоков;

$\alpha_i$  – угол наклона основания блока;

$T_i = p_i \sin \alpha_i$  – тангенциальная составляющая веса блоков в пределах оползневого клина.

В методе многоугольника сил рассматриваются условия достижения реакцией  $E_n = 0$  в последнем (нижнем блоке) при заданном коэффициенте запаса  $\eta$ .

Если углы откоса меньше  $45^\circ$  и большое число блоков границы между ними, то можно принимать вертикальными, а направления реакций – совпадающими с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока, то есть под углом  $\delta$  к основанию рассматриваемого блока, при этом [88, 97]

$$\delta_i = \alpha_i - \alpha_{i+1}, \quad (4.5)$$

В этом случае реакция между блоками может быть определена аналитически по формуле Г.М.Шахунянца:

$$E_i = \frac{\eta \cdot P_i \sin \alpha_i - P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i}{\cos \delta_i + \sin \delta_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i} + E_{i-1}, \quad (4.6)$$

где  $P_i$  – масса пород в пределах блока;

$\alpha_i$  – угол наклона основания блока;

$\delta_i = \alpha_i - \alpha_{i+1}$  – угол наклона реакции к основанию  $i$ -го блока [97].

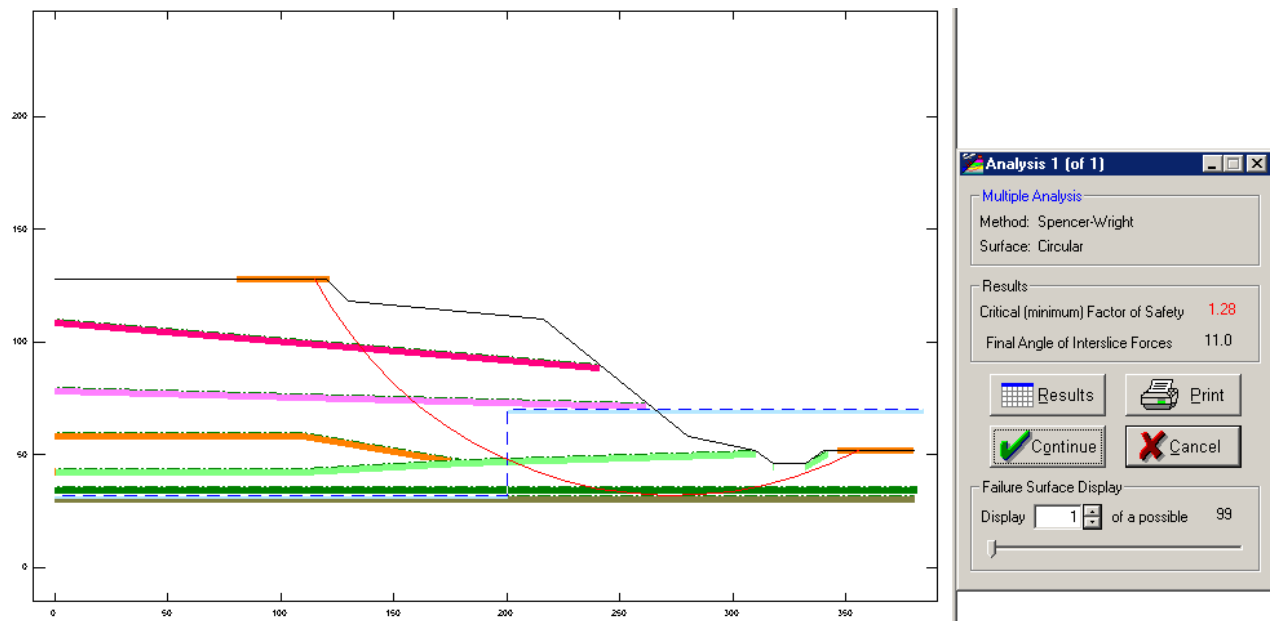
При уменьшении угла  $\delta$  знаменатель формулы стремится к единице.

Результаты расчета устойчивости отвала даны в таблице 4.4.

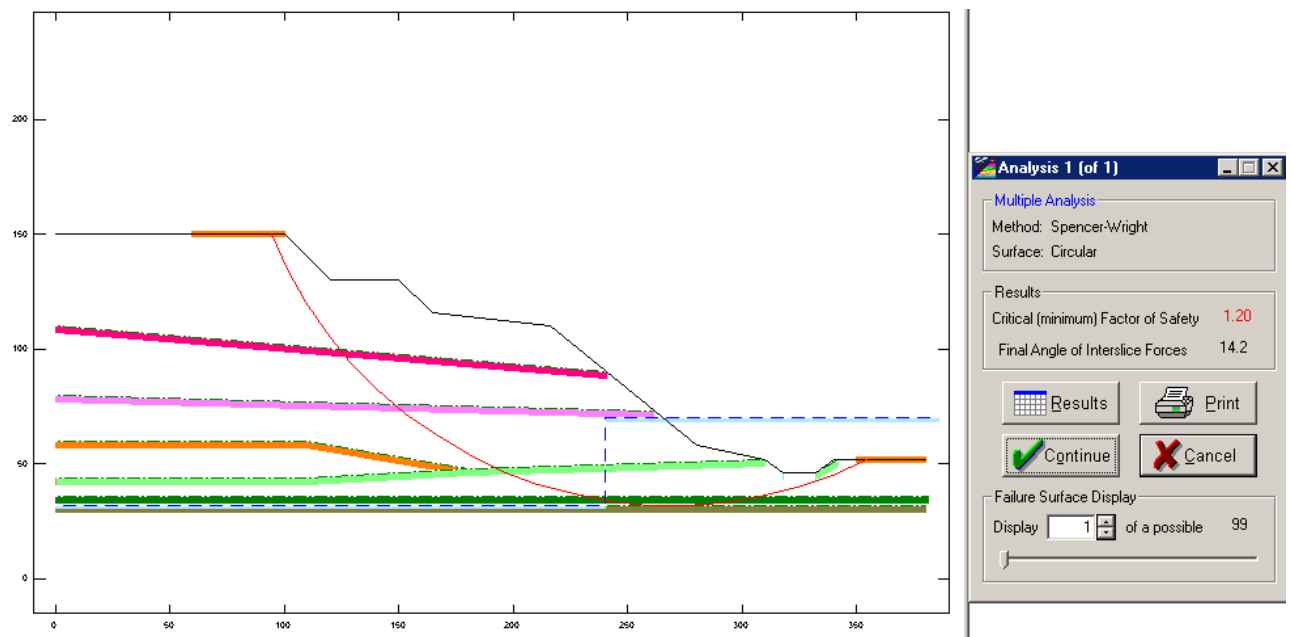
**Таблица 4.4** – Результаты расчета устойчивости отвала

| № разреза   | Значения коэффициента запаса устойчивости (нормативные) | Значения коэффициента запаса устойчивости (расчетные) |
|-------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Вариант I   |                                                         |                                                       |
| 1 – 1       | 1.1 – 1.2                                               | 1.21 – 1.34                                           |
| 2 – 2       | 1.1 – 1.2                                               | 1.11 – 1.22                                           |
| 3 – 3       | 1.1 – 1.2                                               | 1.54 – 1.68                                           |
| 4 – 4       | 1.1 – 1.2                                               | 1.12 – 1.23                                           |
| 5 – 5       | 1.1 – 1.2                                               | 1.83 – 1.96                                           |
| 6 – 6       | 1.1 – 1.2                                               | 1.62 – 1.76                                           |
| 7 - 7       | 1.1 – 1.2                                               | 1.15 – 1.28                                           |
| Вариант II  |                                                         |                                                       |
| 1 – 1       | 1.1 – 1.2                                               | 1.23 – 1.37                                           |
| 2 – 2       | 1.1 – 1.2                                               | 1.12 – 1.25                                           |
| 3 – 3       | 1.1 – 1.2                                               | 1.57 – 1.69                                           |
| 4 – 4       | 1.1 – 1.2                                               | 1.13 – 1.25                                           |
| 5 – 5       | 1.1 – 1.2                                               | 1.34 – 1.47                                           |
| 6 – 6       | 1.1 – 1.2                                               | 1.54 – 1.66                                           |
| 7 - 7       | 1.1 – 1.2                                               | 1.13 – 1.26                                           |
| Вариант III |                                                         |                                                       |
| 1 – 1       | 1.1 – 1.2                                               | 1.1                                                   |
| 2 – 2       | 1.1 – 1.2                                               | 1.1                                                   |
| 3 – 3       | 1.1 – 1.2                                               | 1.4                                                   |
| 4 – 4       | 1.1 – 1.2                                               | 1.1                                                   |
| 5 – 5       | 1.1 – 1.2                                               | 1.15                                                  |
| 6 – 6       | 1.1 – 1.2                                               | 1.17                                                  |
| 7 - 7       | 1.1 – 1.2                                               | 1.1                                                   |

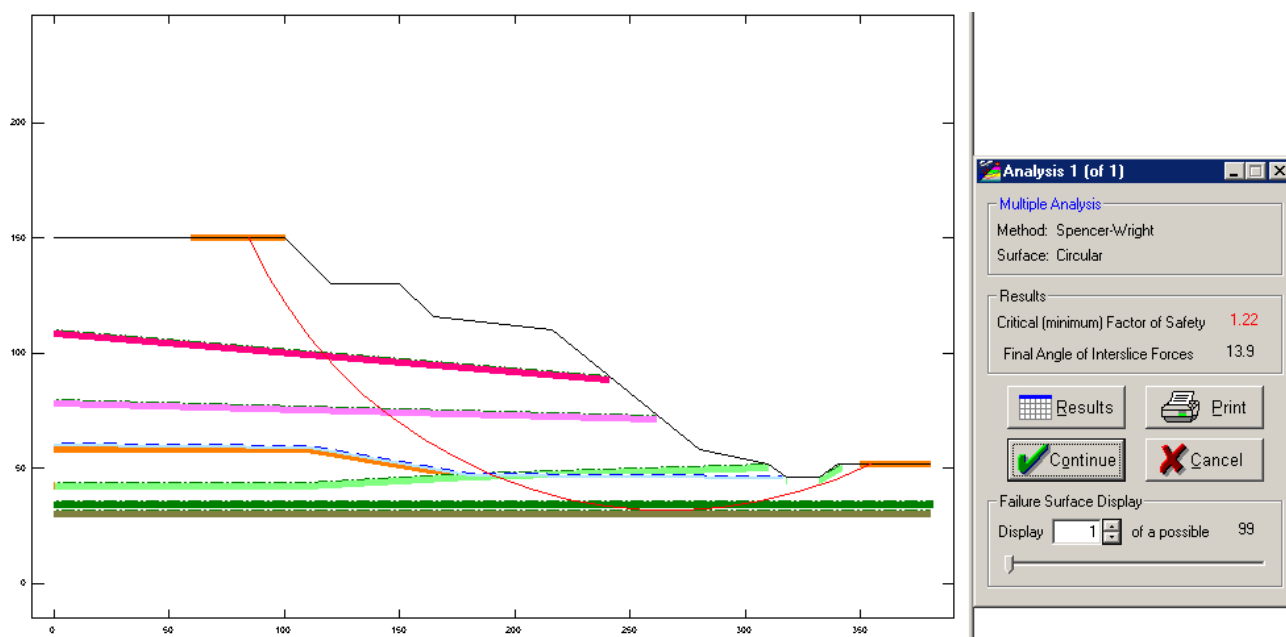
На рисунках 4.5, 4.6 и 4.7 представлены профили отвалов высотой 60 и 100 м, также показан коэффициент запаса устойчивости.



**Рисунок 4.5** – Профиль II-II. Высота отвала – 60 м. Коэффициент запаса устойчивости 1,30



**Рисунок 4.6** – Профиль II-II. Высота отвала 100 м. Коэффициент запаса устойчивости 1,20



**Рисунок 4.7** – Профиль II-II. Высота отвала 100 м. Коэффициент запаса устойчивости 1,22

#### 4.2.2 Расчеты уплотнения отвального массива

В пределах техногенного массива выделяются 3 зоны по глубине (от верхней площадки): 1-0-40 м; 2-40-80 м; 3 - 80-120 м [91, 93].

В таблицах приводятся данные по водно-физическим свойствам отвальных масс, результатам компрессионных испытаний, проведенных в СПбГИ и ФГУП ВСЕГИНГЕО (таблица 4.5; рисунки 4.5-4.7). При этом испытания на компрессию в СПбГИ производились на искусственных фосфогипсовых пастах, а во ФГУП ВСЕГИНГЕО на естественных материалах через 3 часа после их отбора из отвала. Плотность отвального материала по слоям принималась по данным натурных определений: соответственно I слой –  $\gamma=1,5 \text{ т/м}^3$ ; II –  $\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$ ; III –  $\gamma=1,7 \text{ т/м}^3$ .

Максимальная (стабилизированная) осадка отдельных слоев определялась по формуле:

$$S_{\infty} = \frac{ahP\beta}{1 + \varepsilon_0} = \frac{a_0 hP\beta}{E_0} = \frac{h\beta P}{E_0}, \quad (4.7)$$

где  $a = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta P}$  – коэффициент сжимаемости;

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i$  – изменение коэффициента пористости в диапазоне уплотняющих нагрузок  $P_i - P_{i-1}$  ;

$a_0 = \frac{a}{1 + \varepsilon_0}$  – приведенный коэффициент сжимаемости;

$P$  – уплотняющая нагрузка (по слоям:  $P_1=0,3$  МПа,  $P_2=0,94$  МПа,  $P_3= 1,68$  МПа);

$h$  – мощность рассматриваемого слоя, м;  $\beta$  - безразмерный коэффициент, зависящий от коэффициента бокового распора  $\lambda$  по соотношению

$$\beta = \frac{(1-\lambda)(1+2\lambda)}{1+\lambda}, \quad (4.8)$$

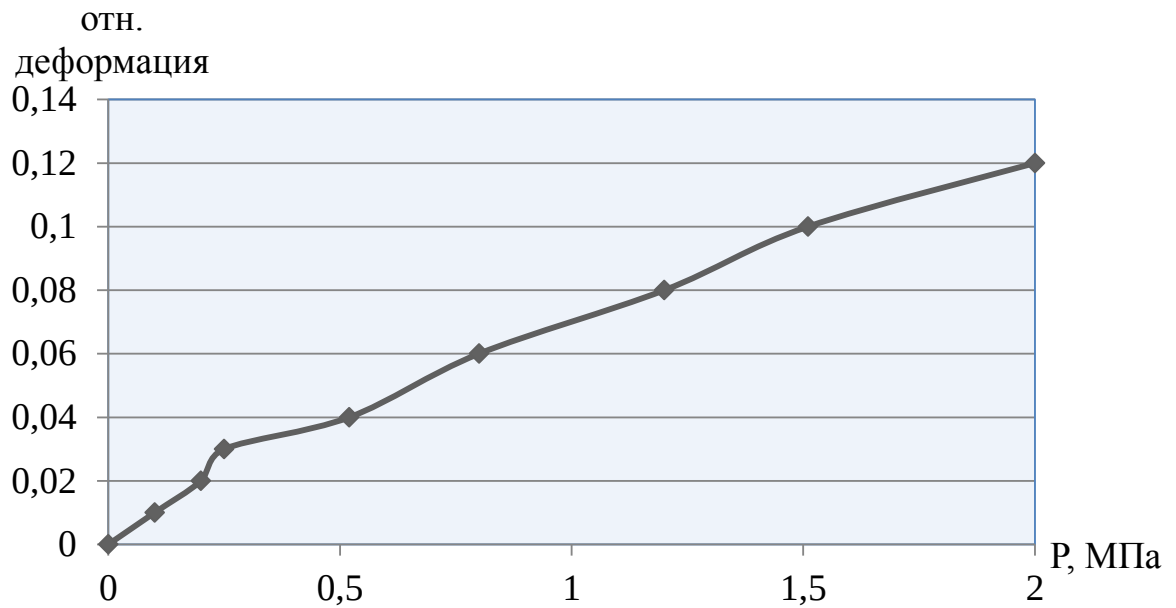
где  $\varepsilon_0$  – начальный коэффициент пористости.

Результаты компрессионных испытаний и графики к ним показаны в таблице 4.5 и на рисунках 4.7, 4.8, 4.9.

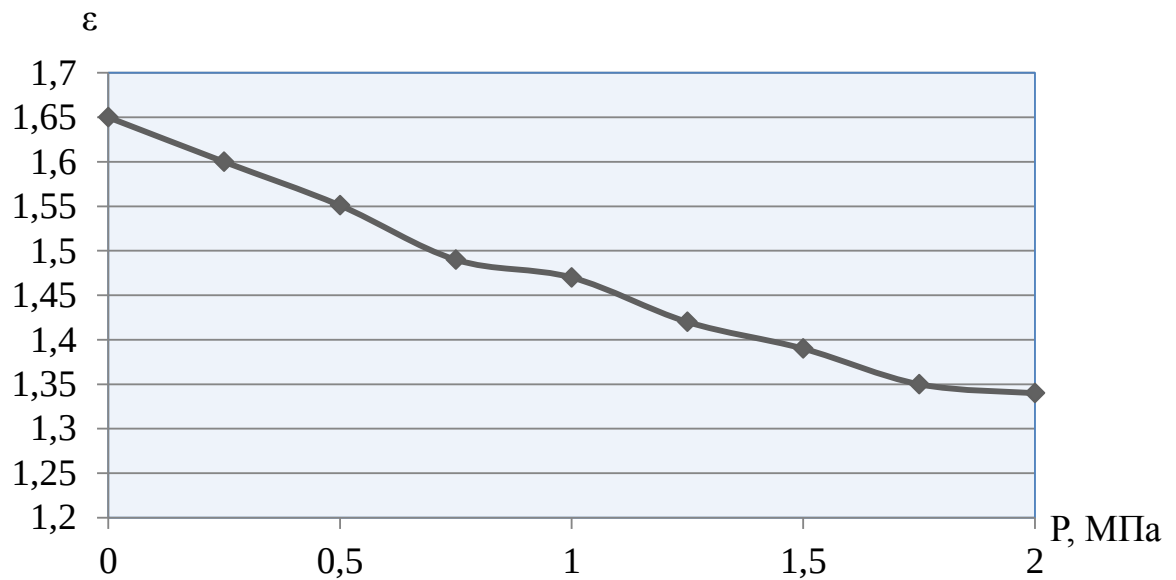
**Таблица 4.5** – Результаты компрессионных испытаний (СПбГИ) [ 93]

Физические свойства

|                                   |                                       |       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------|
| Влажность природная               | W, %                                  | 13,5  |
| Плотность грунта                  | $\rho$ , г/см <sup>3</sup>            | 1,16  |
| Плотность скелета грунта          | $\rho_c$ , г/см <sup>3</sup>          | 1,02  |
| Плотность частиц грунта           | $\rho_{\text{ч}}$ , г/см <sup>3</sup> | 2,70  |
| Пористость                        | ц, д.е.                               | 0,623 |
| Коэффициент пористости            | $\varepsilon$ , д.е.                  | 1,652 |
| Полная влагоемкость               | $W_{\text{п}}$ , %                    | 61,2  |
| Коэффициент влагонасыщения        | S, д.е.                               | 0,220 |
| Влажность на границе текучести    | $W_L$ , %                             | -     |
| Влажность на границе раскатывания | $W_p$ , %                             | -     |
| Число пластичности                | I, %                                  | -     |
| Показатель текучести              | I, д.е.                               | -     |
| Влажность после испытания         | W, %                                  | 41,3  |

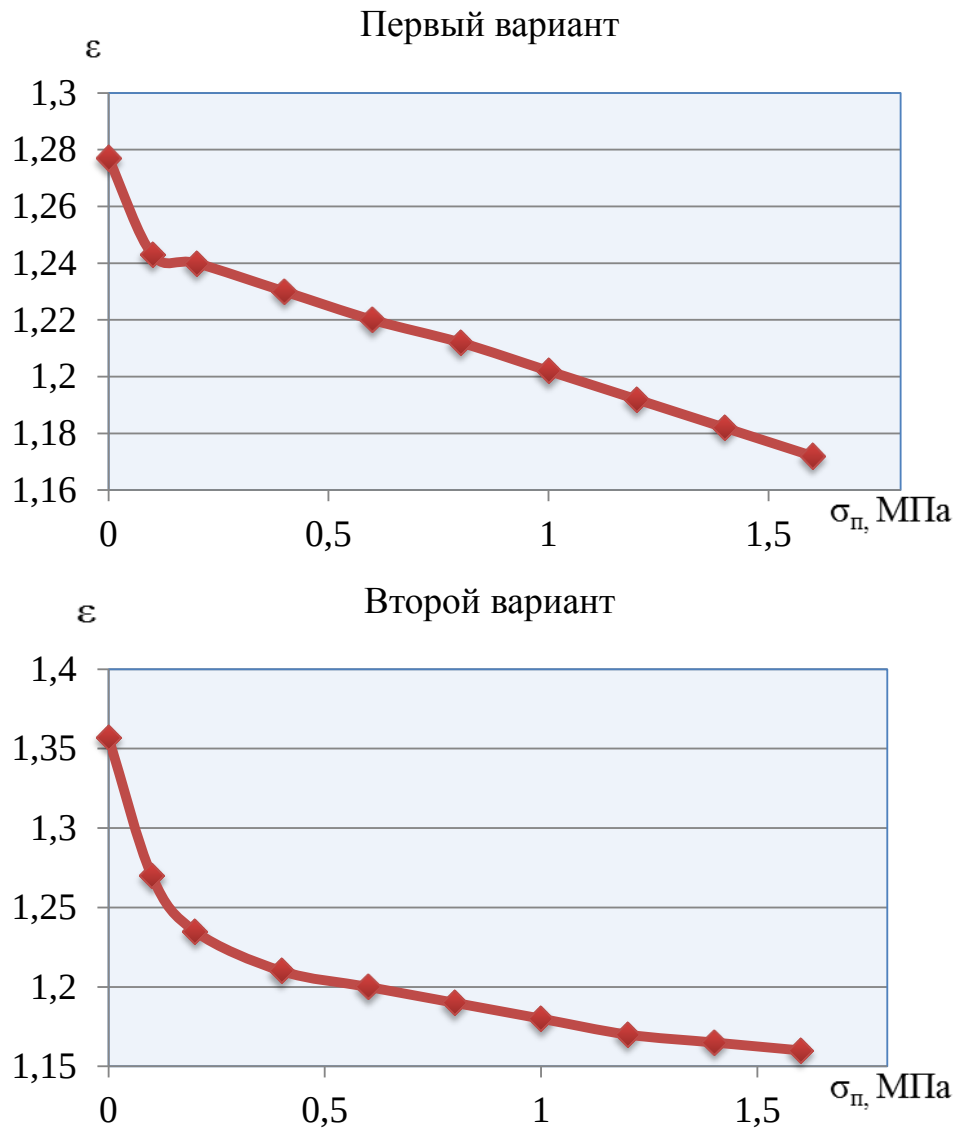


**Рисунок 4.7** — Зависимость относительной осадки ( $\Delta h/h$ ) от уплотняющего давления (СПБГИ)



**Рисунок 4.8** — Компрессионная зависимость (СПБГИ)





**Рисунок 4.9 – Компрессионные кривые (ВСЕГИНГЕО)**

Значения коэффициента сжимаемости для различных слоев отвального массива:

верхнего

$$a_1 = \frac{1,652 - 1,586}{3} = 0,022 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные СПБГИ)}$$

$$a_1 = \frac{1,365 - 1,224}{3} = 0,047 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные ВСЕГИНГЕО)}$$

среднего

$$a_2 = \frac{1,539 - 1,84}{3,2} = 0,018 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные СПБГИ)}$$

$$a_2 = \frac{1,199 - 1,184}{3,2} = 0,0047 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные ВСЕГИНГЕО)}$$

нижнего

$$a_3 = \frac{1,432 - 1,383}{3,4} = 0,0144 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные СПБГИ)}$$

$$a_3 = \frac{1,172 - 1,16}{3,4} = 0,0035 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ (данные ВСЕГИНГЕО)}$$

Расчеты стабилизированных осадок для 2-х вариантов исходных данных о компрессионных характеристиках

Верхний слой

$$S_{\text{в}}^{\text{СГИ}} = \frac{0,022 \cdot 40 \cdot 3 \cdot 0,7}{2,652} = 0,696 \text{ м}$$

$$S_{\text{в}}^{\text{BC}} = \frac{0,047 \cdot 40 \cdot 3 \cdot 0,7}{2,365} = 1,669 \text{ м}$$

Средний слой

$$S_{\text{с}}^{\text{СГИ}} = \frac{0,018 \cdot 40 \cdot 9,2 \cdot 0,7}{2,539} = 1,826 \text{ м}$$

$$S_{\text{с}}^{\text{BC}} = \frac{0,0047 \cdot 40 \cdot 9,2 \cdot 0,7}{2,199} = 0,55 \text{ м}$$

Нижний слой

$$S_{\text{н}}^{\text{СГИ}} = \frac{0,0144 \cdot 40 \cdot 15,8 \cdot 0,7}{2,432} = 2,619 \text{ м}$$

$$S_{\text{н}}^{\text{BC}} = \frac{0,0035 \cdot 40 \cdot 15,8 \cdot 0,7}{2,172} = 0,713 \text{ м}$$

С учетом полученных данных прогнозные значения суммарных осадок отвального массива составят [95]:

$$\text{минимальное } \sum S_{\infty}^{\min} = 1,922 \text{ м}$$

$$\text{максимальное } \sum S_{\infty}^{\max} = 5,141 \text{ м.}$$

Кроме того, следует также учитывать эффект уплотнения от укатки двух верхних ярусов автомобилями и бульдозерами  $\sum S_{\text{уп}}^{\text{е}} \approx 0,5 \text{ м}$ .

### Выводы по 4 главе

Для освоения территории гидроотвала «Лог Шамаровский» ОАО МГОК на основании анализа результатов выполненных ранее исследований состояния техногенного намывного массива предложено создать в пределах прудковой зоны орнитологический пруд и осуществить дополнительную укладку хвостов обогащения в тело гидроотвала с последующей лесохозяйственной рекультивацией. Предусматриваются выполнение следующих работ:

- намыв в правом рукаве гидроотвала хвостов рудообогащения с целью вытеснения воды и уплотнения тонкодисперсных намывных грунтов прудковой зоны;
- создание орнитологического пруда в левом рукаве гидроотвала;
- рекультивация правого рукава гидроотвала.

В правом рукаве гидроотвала поверх хвостов обогащения укладываются потенциально плодородные суглинистые грунты, которые создают защитный слабоводопроницаемый слой мощностью около 0,5 м.

Наращивание полигона складирования фосфогипса отходов ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» рассматривалось с позиции уплотнения складировемого материала в пределах различных инженерно-геологических элементов и оценки устойчивости при наращивании отвала до высоты 120 метров.

Расчеты уплотнения позволили установить величину суммарных осадок отвального массива около 6 м. При этом коэффициент запаса устойчивости при генеральном угле наклона откоса изменяющимся в пределах от 25 до 35 выдерживается в пределах нормативных значений. Естественно, необходимы мероприятия по мониторингу состояния откосных сооружений, приведенные в проекте наращивания в разделе «3.5. Контроль состояния техногенного массива отвала фосфогипса».

## 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 экономии 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  $P_{доп}$ . 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. м<sup>3</sup> фосфогипса и исключить изъятие около 10 га территории.

## Список литературы

1. Гальперин А.М. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: учебное пособие: в 2 т. / Гальперин А.М. Москва: Горная книга, 2006. – 650 с.
2. Гальперин А.М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянец, А.В. Крючков, В.С. Круподеров, В.В. Мосейкин, В.П. Жариков, В.В. Семенов, Х. Клапперих, Н. Тамашкович, Х. Чешлок. Москва: Горная книга, 2012. – 336 с.
3. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горно-технических сооружений. Москва: Недра, 1977. – 246 с.
4. Медяник М.В. Инженерно-геологическое обоснование консервации и рекультивации гидроотвалов. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. 2003. – 138 с.
5. Гальперин А.М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. Москва: Недра, 1988. – 199 с.
6. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов. М.: Издательство МГГУ, 2003. – 473 с.
7. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практическое применения. М. Госстройиздат, 1948. – 247 с.
8. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. Москва: Наука, 1967. – 270 с.
9. Зарецкий Ю.К. Консолидация торфяного основания. Основания, фундаменты, механика грунтов. 1970, № 6. – С. 12-15.
10. Зарецкий Ю.К., Вялов С.С. Вопросы структурной механики глинистых грунтов. – Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971, № 3. – С. 1-5.
11. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М., Стройиздат, 1988. – 350 с.

12. Терцаги К. Теория механики грунтов. Госстройиздат. М., 1961. – 507 с.
13. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов. М., Стройиздат. 1973. - 185 с.
14. Кириченко Ю.В. Инженерно-геологическое обеспечение экологической безопасности формирования техногенных массивов. Дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. М., 2001. – 386 с.
15. Кириченко Ю.В. Управление состоянием массивов гидроотвалов и использование их территорий. В кн. Добыча угля открытым способом. М., ЦНИЭИУголь, 1983, № 6. – С. 16-18.
16. Веригин Н.Н. Консолидация грунта под гибким фундаментом. Основания, фундаменты и механика грунтов. М., 1961, №5. С. 5-8.
17. Веригин Н.Н. Об уплотнении грунтов под нагрузкой. – Прикл. матем. техн. физ., 1961, №1. С. 23-27.
18. Малышев С.В. Уплотнение водонасыщенного грунта при постепенном увеличении толщины слоя. Основания, фундаменты и механика грунтов. 1959, №3. – С. 24-27.
19. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Том II. Москва: Госстройиздат. 1960. – 407 с.
20. Цытович Н.А. Механика грунтов. М., Высшая школа, 1983. – 288 с.
21. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высшая школа, 1981. – 317 с.
22. Цытович Н.А., Ю.К.Зарецкий, М.В.Малышев, М.Ю.Абелев, З.Г.Тер-Мартirosян. Прогноз скорости осадок оснований. Москва: Стройиздат. 1967. – 238 с.
23. Цытович Н.А., Березанцев В.Г., Далматов Б.И., Абелев М. Ю. Основания и фундаменты, Учебник для ВУЗов, М.: Высшая школа, 1970. – 348 с.

24. Тан Тьонг – Ки. Вторичные временные дефекты и консолидация глин. – Сб. «Вопросы геотехники», №3 . Днепропетровское книжное изд-во, 1959. С. 132-141.
25. Николаевский В.Н. К динамике насыщенных жидкостью уплотняемых пористых сред. Инж. журнал, 1962, выпуск 3. – С.54-67.
26. Гольдштейн М.Н. О структуре и сжимаемости грунтов. – «Вопросы геотехники», №2, 1956. – С. 6-30.
27. Ксенофонов А.И. Одномерная задача консолидации водонасыщенного глинистого грунта с учетом вязкости «скелета» грунта и поровой воды. – В кн.: Деформации оснований сооружений. Труды МИИТ, вып. 397. М., 1972. С. 68-79.
28. Тейлор Д. Основы механики грунтов. М., Госстройиздат. – 596 с.
29. Тер-Мартirosян З.Г. Напряженно-деформированное состояние массивов многофазных грунтов в прикладных задачах геомеханики и строительства. Дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. М., МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1976. – 386 с.
30. Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов. Дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. М., МИСИ им. В.В. Куйбышева, 2016. – 324 с.
31. Коган Я.Л. Аппаратура и методика определения порового давления в глинистых грунтах. М., изд. Гидропроекта, 1960. – 26 с.
32. Месчан С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. М., Недра, 1978. – 207 с.
33. Месчан С.Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М., «Недра», 1974. – 192 с.
34. Ничипорович А.А. Соппротивление глинистых грунтов сдвигу при расчете гидротехнических сооружений на устойчивость. М., Стройиздат, 1948. – 128 с.



35. Павилонский В.М. Экспериментальные исследования порового давления в глинистых грунтах. – Информ. Материалы ВОДГЕО, 1959, №4. – 72 с.
36. Бабицкая С.С. О критерии разрушения и влияния промежуточного главного напряжения на прочность. – «Вопросы геотехники», изд. ДИИТ, 1964, №7. – С.19-31.
37. Денисов И. Я. Инженерная геология. М., Госстройиздат, 1960. – 407 с.
38. Сидоров Н.Н., Сипидин В.П. Современные методы определения характеристик механических свойств грунтов. Л., Стройиздат, 1972. – 136 с.
39. Дашко Р.Э., Каган А.А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М., «Недра», 1977. – 237 с.
40. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., «Высшая школа», 1968. – 629 с.
41. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. М., Стройиздат, 1977. – 320 с.
42. Роза С.А. Механика грунтов. М., «Знание», 1962. – 229 с.
43. Добров Э.М. Прогноз консолидации глинистых грунтов с учетом начального градиента напора, а также переменной их водопроницаемости и вязкости. Белгород, ВИОГЕМ. Сборник трудов, вып. 10, 1969. – С.85-93.
44. Абелев М. Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. Москва: Стройиздат, 1973. – 288 с.
45. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. Москва: Стройиздат, 1983. – 248 с.
46. Верещагин Н.П. Исследование некоторых процессов и явлений возникающих в массивах горных пород при водопонижении (на примере Яковлевского и Южно-Белозерского железорудных месторождений). дисс. на соиск. уч.степ. канд. геол.-мин. наук. ВСЕГИНГЕО, 1975. – 184 с.

47. Отчет о НИР «Разработка мероприятий по обеспечению безопасных условий формирования и максимальной удельной емкости отвалов ОАО «Лебединский ГОК» в границах существующих земельных отводов». ВИОГЕМ, г.Белгород, 2004. – 56 с.

48. Отчет МГГУ по теме ГЕО-260 «Локальный гидрогеомеханический мониторинг гидроотвалов «Березовый Лог», «Балка Чуфичева» и хвостохранилища ОАО «Лебединский ГОК» в 2005 г. – 58 с.

49. Отчет МГГУ по теме ГЕО-309 «Комплексные геологические исследования хранилищ отходов рудообогатения для обеспечения экологической безопасности освоения техногенных месторождений КМА», 2001г. – 69 с.

50. Фисенко Г.Л., Ревазов М.А., Галустьян Э.Л. Укрепление откосов в карьерах. М., Недра, 1974. – 208 с.

51. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 1965. – 378 с.

52. Фисенко Г.Л. Решение проблемы устойчивости бортов угольных разрезов и карьеров. Л., изд. ВНИМИ, Труды ВНИМИ, сб. №108, 1978. – С. 10-24.

53. Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л., Шпакова М.В. Расчет устойчивости карьерных откосов по программе Stability Analysis. ГИАБ №8, 2011. – С.56-63.

54. Крюковский Д.В. Несущая способность основания земляного полотна, сложенного торфом, при действии вибродинамических нагрузок. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, 2013. – 210 с.

55. Абелев М.Ю. Аварии фундаментов промышленных и гражданских сооружений Учебное пособие Москва, 2011 г Издательство ФАОУ ДПО ГАСИС. – 66 с.

56. Абелев М. Ю., Селиванов М. Б., Шумилов С. А., Лейбман Д. М. Анализ аварий (страховых случаев) при производстве строительных работ. Вестник МГСУ, 2009, № 1. С. 50-53.

57. Абелев М.Ю. Особенности строительства сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. Промышленное и гражданское строительство. 2010 г. №3. С. 12-13.
58. Абелев М.Ю. Оценка просадочности грунтового массива из лесовых грунтов. Основания, фундаменты и механика грунтов, №6, 2001. – С. 18-21.
59. Пуневский С.А. Инженерно-геологическое обеспечение размещения отвальных насыпей на слабых естественных и намывных основаниях. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, 2007. – 131 с.
60. Schlosser F. Hypotheses et theories pour la prevision des tassements des remblais sur sols compressibles. “Ann.ponts et chaussées”, 1971, № 6. С. – 223-258.
61. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. Физматиздат, М., 1960. – 343 с.
62. Штрассе В. Использование методов гидрогеологии и механики грунтов при восстановлении территорий, нарушенных карьерами, в Восточной Германии. Изв. Вузов. Геология и разведка, 1998, № 6. – С. 91-95.
63. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. М., Госстройиздат, 1962. – 201 с.
64. Демченко А.В., Пантюхина Е.А. Применение теории консолидации грунтов для обоснования технологии формирования намывных горно-технических сооружений. Маркшейдерский вестник, №4 (107), 2015. – С.63-64.
65. Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров отвалов сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах. / Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Крячко О.Ю. и др., Л., ВНИМИ, 1985. – 84 с.
66. Рекомендации по расчету устойчивости скальных откосов. – М.: Гидропроект, 1986. – 52 с.
67. Локтионов С.В. Инженерно-геологическое обоснование размещения и комплексного использования пород скальной вскрыши Староосколь-

ского железорудного района: на примере Лебединского ГОКа. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, 2009. – 146 с.

68. Гальперин А.М., Дьячков Ю.Н. Гидромеханизированные природоохранные технологии. Москва: Недра, 1993. – 256 с.

69. Жилин С.Н. Инженерно-геологическое обоснование повышения вместимости намывных сооружений в регионе КМА. Авт. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М., 2006. – 217 с.

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

71. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Москва: Стандартинформ, 2012. – 83 с.

72. Методическое пособие по изучению влияния динамических нагрузок горного оборудования на несущую способность горных пород и устойчивость откосов на карьерах. Белгород, изд. ВИОГЕМ, 1969. – 86 с.

73. Бишоп А., Хенкель Д. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. Госстройиздат. Москва: Госстройиздат. 1961. – 231 с.

74. Гальперин А.М., Ческидов В.В., Пантюхина Е.А. Совершенствование системы удаленного гидрогеомеханического мониторинга откосных сооружений ОАО «Стойленский ГОК». ГИАБ.-2015, №11. - С. 342-350.

75. Гидрогеомеханический мониторинг намывных массивов гидротавально-хвостового хозяйства ОАО «Лебединский ГОК». Отчет НИР. МГГУ, Москва, 2005. – 104 с.

76. Щербакова Е.П. Геолого-экологическое обеспечение природоохранных технологий освоения техногенных массивов. Дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. М., 2005. – 328 с.

77. Galperin A.M., Pantyukhina E.A. The assessment of compatibility 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.

78. Пантюхина Е.А. Применение теории консолидации грунтов для решения горно-технологических задач. Маркшейдерия и Недропользование, №4 (77), 2015. – С. 38-40.

79. Хмелевской В.К., Костицин В.И. Основы геофизических методов. – Пермь: Изд-во Пермского университета, 2010. – 400 с.

80. В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, А.А. Кормнов. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок, ФТПРПИ. – 2015. №3. - С.41-47.

81. Shkuratnik, V.L., Nikolenko, P.V., Kormnov, A.A. Estimation of ultrasonic correlation logging sensitivity in crack detection in excavation roof, Gornyi Zhurnal, 2016, Vol. 2016, Issue 1, pp. 54-57.

82. Николенко П.В., Кормнов А.А. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2016. №8. - С.265-271.

83. Семенова Е.А. Исследование влияния консолидации тонкодисперсных отложений на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала. Горный информационно-аналитический бюллетень, №09 (спец. выпуск №24), 2016 г. – 8 с.

84. Кириченко Ю.В., Никитин В.В., Саркисян А.А. Геолого-маркшейдерское обеспечение рекультивации гидроотвала Михайловского ГОКа. М., Маркшейдерский вестник №3, 1997. – С.25-29.

85. Кириченко Ю.В., Саркисян А.А. Геомеханическое обеспечение рекультивации гидроотвала «Лог Шамаровский» МГОКа// Горный информационно-аналитический бюллетень М., МГГУ, 1997, Вып.5. – С. 165-172.

86. Кириченко Ю.В., Саркисян А.А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств намывных грунтов гидроотвалов Михай-

ловского ГОКа// Тез.докл.научн.-техн.конференции, Белгород, 1997. – С. 112-117.

87. Кириченко Ю.В., Щёкина М.В. Современные методы и способы контроля геомеханических процессов в намывных горнотехнических сооружениях. Горный информационно-аналитический бюллетень М., МГГУ, Выпуск 6, 1998. – С. 90 - 94.

88. Щёкина М.В. Разработка методов прогноза и оперативного контроля геомеханических процессов в намывных массивах с применением компьютерных технологий. Дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Москва, 2010. – 162 с.

89. Ивочкина М.А. Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса. Дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2013. – 172 с.

90. Ивочкина М.А. Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости Воскресенских отвалов фосфогипса / М.А. Ивочкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., №1, 2013. – С. 345-349.

91. 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, №9, 2016 г. – 10 с.

92. Разработка системы мониторинга устойчивости откосов существующего полигона фосфогипса и ее внедрение: отчет о НИР / Кутепов Ю.И. СПб, Университет «Горный», 2012. – 50 с.

93. Расчет устойчивости полигона складирования вторичных материалов промышленности ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»: отчет о НИР / Кутепова Н.А. СПб, ООО НПФ «Карбон», 2012. – 70 с.

94. Проект Нарращивание полигона складирования вторичных материалов промышленности ОАО "Воскресенские минеральные удобрения" 050/025 ПЗ-1 ОАО "Трест "Энергогидромеханизация"" Москва 2012. – 113 с.

95. Прогноз изменений кривой депрессии в отвале фосфогипса при его наращивании на полигоне №2 ОАО «Воскресенские минеральные удобрения: отчет о НИР / Москва, ООО «Ингеострой», 2003. - 15 с.
96. Фисенко Г.Л. и др. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб., 1998. – 208 с.
97. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. ВНИМИ-ВИОГЕМ. Л., изд. ВНИМИ, 1971. – 186 с.
98. Рекомендации по проектированию плотин из грунтовых материалов. Раздел: расчет устойчивости откосов грунтовых плотин. П-783-88. Москва, Гидропроект, 1988. – 47 с.
99. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях – I часть. / Кутепов Ю.И., Норватов Ю.А., Кутепова Н.А. Л., ВНИМИ, 1989. – 56 с.
100. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях – II часть. / Кутепов Ю.И., Норватов Ю.А., Кутепова Н.А., Крячко О.Ю. Л., ВНИМИ, 1990. – 55 с.
101. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Ленинград, 1987. – 126 с.
102. Методическое пособие по изучению влияния динамических нагрузок горного оборудования на несущую способность горных пород и устойчивость откосов на карьерах. Белгород, изд. ВИОГЕМ, 1969. – 86 с.
103. Методические рекомендации по укреплению откосов на карьерах пригрузкой скальными породами. Белгород, изд. ВИОГЕМ, 1981. – 27 с.
104. Фадеев А.Б., Картузов М.И., Кузнецов Г.В. Методические указания по обеспечению устойчивости откосов и сейсмической безопасности зданий и сооружений при ведении взрывных работ на карьерах. Л., изд. ВНИМИ, 1977. – 18 с.