

На правах рукописи



Нижегородцев Евгений Иванович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ФИЛЬТРАЦИИ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ ВОЛОКНИСТЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ
ЗОЛОТОНОСНЫХ РОССЫПЕЙ**

25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чита – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ЗабГУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Герасимов Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Михайлов Александр Геннадиевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией проблем освоения недр;
Алексеев Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории разработки россыпных месторождений.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита диссертации состоится 7 июня 2018 года в 12⁰⁰ на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.101.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», по адресу: 68000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал.
Тел./факс: 8(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте института www.igd.khv.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Корнеева Светлана Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Золотодобывающая отрасль играет важную роль в экономике Восточной Сибири и Дальнего Востока. Объем добытого золота постоянно растет. При этом большая часть золотодобывающих предприятий ведет добычу открытым способом. Разработка золотоносных месторождений характеризуется возведением различных гидротехнических сооружений из горных пород, выполняющими функции создания водных резервов, отстойников для гравитационного осветления технологической воды, накопителей жидких отходов, наиболее распространёнными из которых являются грунтовые плотины и дамбы. Такие сооружения работают в постоянном контакте с водой, что оказывает влияние на их устойчивость, имеются примеры возникновения аварийных ситуаций на гидротехнических объектах. За последние 5 лет (2011-2016 гг.) зафиксировано порядка десятка аварийных ситуаций на водных объектах предприятий, занимающихся открытой добычей золота в Забайкалье. Основными причинами этих аварий и повреждений сооружений являются: перелив воды через гребень грунтовых плотин; сосредоточенная фильтрация через тело плотины или основание; деформации и оползание откосов грунтовых плотин; сейсмические и волновые воздействия. В ходе административных расследований, плановых и внеплановых проверок контролирующими органами (Федеральная служба по надзору в сфере природопользования) вынесены постановления о наложении штрафов в среднем 30...50 тыс. рублей в каждом случае возникновения аварий. В свою очередь, экологический ущерб в каждом отдельном случае находился в объеме 50... 260 тыс. рублей.

Для повышения устойчивости и снижения деформации массива сооружений на стадии возведения используются устройства фильтрационного управления в теле сооружения из природных и искусственных материалов, позволяющие свести к минимуму случаи возникновения аварийных ситуаций вследствие фильтрации воды через тело и основание гидротехнического сооружения. Отечественная промышленность предлагает ряд новых полимерных материалов, обладающих уникальными свойствами, использование которых позволяет создавать надежные и эффективные устройства на их основе. В этой связи обоснование параметров фильтрации оборотной воды: положения кривой депрессии, фильтрационного расхода воды через сооружение, уклона и высоты устройств из волокнистых полимерных материалов, а также создание методики расчета параметров с учетом размеров сооружений является актуальным.

Применение устройств для управления фильтрацией при возведении плотин на открытых золотоносных месторождениях остается проблемой, требующей разработки и

внедрения технических решений, основанных на применении современных строительных материалов. Проблемами устройства сооружений из горных пород при обратном водоснабжении занимались такие ученые как В.П. Березин, А.М. Бураков, В.М. Волкова, Г.В. Железняков, Н.А. Калашник, М.В. Костромин, В.Г. Лешков, В.С. Литвинцев, Н.Г. Малухин, Ю.А. Мамаев, М.В. Нестеров, Г.А. Нурок, А.А. Ничипорович, Г.П. Пономарчук, А.В. Рашкин, Н.П. Розанов, Ю.В. Субботин, Б.Л. Тальгамер, К.Н. Трубецкой, В.Ф. Хныкин, Р.Р. Чугаев, С.М. Шорохов, В.П. Ягин, И.М. Ялтанец, и другие. В этом направлении работают ИПКОН РАН, Иргиредмет, ИГД ДВО РАН, ИрГТУ, ВНИИ-1, Институт теплофизики СО РАН, ВНИИГС ЦБНТИ Минмонтажспецстрой, МГГУ, МГРИ-РГГРУ, МГТУ, Санкт-Петербургский горный университет, ЗабГУ. Несмотря на изученность проблем возведения сооружений из горных пород, вопросу применения устройств для управления фильтрацией на основе современных полимерных материалов уделяется недостаточное внимание.

Объект исследования: фильтрационный процесс в плотинах и дамбах отстойников обратного водоснабжения гидромеханизированной разработки золотоносных россыпей.

Предмет исследования: основные параметры фильтрационного процесса в плотинах и дамбах с использованием волокнистых материалов.

Цель работы: научно-техническое обоснование основных технологических параметров процесса управления фильтрацией: расхода воды, положения кривой депрессии, уклона и высоты устройств управления фильтрацией с использованием волокнистых полимерных материалов при гидромеханизированной разработке золотоносных россыпей.

Идея работы: оптимальное управление фильтрацией воды в плотинах и дамбах отстойников при гидромеханизированной разработке золотоносных россыпей достигается при использовании волокнистых материалов.

Задачи исследования:

1. Выявление основных причин возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации плотин и дамб из горных пород систем водоснабжения гидромеханизированной разработки золотоносных россыпей на основании данных Управления Росприроднадзора по Забайкальскому краю.

2. Установление зависимостей влияния давления горных пород на угол уклона и высоту слоя волокнистых материалов, на величину сил сцепления волокнистых материалов с горными породами, на фильтрационный расход воды на основе экспериментальных исследований.

3. Разработка новой фильтрационной модели, описывающей процесс фильтрации в сооружении из горных пород во взаимодействии с волокнистыми полимерными материалами, позволяющей оценить влияние устройства из волокнистых материалов на управление и параметры фильтрации оборотной воды из отстойников.

4. Установление рациональных параметров: угла наклона и высоты слоя устройств управления фильтрацией на основе волокнистых полимерных материалов во взаимодействии с горными породами, разработка методики их расчета на водопроницаемом и водонепроницаемом основаниях сооружений с применением ЭВМ.

5. Определение экономической эффективности с использованием волокнистых полимерных материалов с целью управления фильтрацией во взаимодействии с горными породами в условиях гидромеханизированной добычи россыпного золота.

Методы исследования.

Поставленные задачи решены с помощью следующих методов: методы математической статистики для обработки экспериментальных данных с применением ЭВМ, моделирования фильтрационных процессов методом конечных элементов, технико-экономического прогноза применения предложенных решений.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установление зависимостей изменения фильтрационного расхода воды и сил сцепления волокнистых полимерных материалов с горными породами от внешнего давления, создаваемого массивом сооружения при гидромеханизированной разработке месторождений, что позволило обосновать оптимальные параметры устройств управления фильтрацией.

2. Построение фильтрационной модели (на основе метода конечных элементов) плотины с устройством управления фильтрацией на основе использования волокнистых материалов.

3. Разработка методики расчета основных параметров (высоты слоя и уклона) устройств управления фильтрацией горных пород на основе волокнистых полимерных материалов, позволяющая оптимизировать процесс проектирования плотин и дамб гидромеханизированных предприятий.

Основные научные положения:

1. На основании математической фильтрационной модели разработана прогнозная оценка основных технологических параметров, влияющих на управление процессом фильтрации воды в сооружениях из горных пород с помощью волокнистых материалов, позволяющая исключить суффозию и разрушительные фильтрационные деформации.

2. Оптимальные параметры фильтрации воды в массиве сооружения из горных пород основаны на закономерностях снижения фильтрационного расхода воды в устройствах с применением волокнистых полимерных материалов от давления горных пород: нелинейный характер при увеличении давления до 8 кПа и линейный выше 8 кПа, за счет особенностей деформирования волокнистой среды.

3. Эксплуатационная надежность сооружений из горных пород достигается оптимальным управлением фильтрацией воды волокнистыми полимерными материалами на основании методики определения основных параметров фильтрационных устройств с учетом веса массива горных пород.

Степень достоверности. Достоверность экспериментальных исследований подтверждена использованием средств измерений, прошедших государственную метрологическую поверку, соблюдением требований к чистоте эксперимента и оценке погрешностей.

Достоверность полученных зависимостей обеспечивается достаточным объемом аналитических, лабораторных исследований, применением современных способов обработки статистической информации на ЭВМ с доверительной вероятностью 93%; использованием систем математического моделирования (метод конечных элементов).

Достоверность методики расчета подтверждается высокой сходимостью результатов расчета с данными систем математического моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в следующем: установление зависимости изменения фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый материал, от внешнего давления. Впервые установлены предельные значения уклона волокнистого материала в сторону нижнего бьефа. Практическая значимость состоит в следующем: определена эффективная, с позиции рентабельности, трудозатрат, результативности фильтрования структура устройства для управления фильтрацией на основе использования волокнистых полимерных материалов с оптимальными параметрами высоты слоя и уклона. Получила развитие методика расчета изменения параметров фильтрации волокнистыми материалами в зависимости от внешнего давления, создаваемого массивом горных пород сооружения, данная методика расчета реализована в программах для ЭВМ (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015612310, 2015615908). Основные результаты исследования приняты к использованию в качестве технических предложений на участках золотодобычи предприятий: ООО «Закаменск» (Республика Бурятия), ООО «Мангазея Майнинг»

(Забайкальский край), использованы в учебном процессе Забайкальского Государственного Университета по дисциплинам «Основы горного дела», «Геотехнология открытая», это подтверждается актами об использовании результатов научной работы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: IV Международной научной конференции «Технические науки в России и за рубежом» (Москва, 2015г.); XL, XLI, XLII научно-практических конференциях студентов, магистрантов и аспирантов ЗабГУ (Чита, 2013, 2014, 2015 г.); на заседании кафедры разработки месторождений полезных ископаемых ИрГТУ.

Личный вклад автора заключается: в постановке цели и задач исследований, проведении необходимого объема экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов, усовершенствовании ранее предложенной конструкции устройства управления фильтрацией на основе волокнистых полимерных материалов, а также методики определения параметров, формулировании выводов при составлении материалов публикаций и докладов.

Публикации: по материалам исследований опубликовано 10 научных работ в том числе, 5-в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 в журналах, сборниках научных статей, 2 в сборниках материалов научных конференций, 1 монография, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, библиографического списка из 115 наименований и приложений. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 24 таблицы, 6 приложений.

В первой главе диссертации изложен результат обобщения литературных источников о современном состоянии исследований в области технологии оборотного водоснабжения и возведения сооружений из горных пород предприятий гидромеханизированной золотодобычи, фильтрации, применении волокнистых полимерных материалов. Представлен анализ аварийности сооружений из горных пород золотодобывающих предприятий Забайкалья, установлены основные причины. Для описания процесса фильтрации в сооружении из горных пород и во взаимодействии с волокнистыми полимерными материалами выполнено моделирование в PLAXIS.

Во второй главе представлены основные результаты экспериментов по изменению фильтрационного расхода, параметров сцепления от внешнего давления, анализ и

обобщение полученных данных в графической и аналитической форме, лабораторные установки, а также порядок проведения испытаний.

В третьей главе изложены результаты теоретических исследований фильтрационного процесса плотин из горных пород и волокнистых полимерных материалов, получившие дальнейшее развитие на основании полученных экспериментальных данных.

Четвертая глава посвящена разработке методики определения основных параметров устройств для управления фильтрацией плотин на водопроницаемом и водонепроницаемом основаниях с помощью ЭВМ; выполнена оценка технико-экономической эффективности применения волокнистых полимерных материалов, технология их укладки в составе сооружений из горных пород предприятий открытой золотодобычи.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору В.М. Герасимову за научно-методическое руководство при подготовке диссертации, д-ру техн. наук, профессору Г.В. Секисову признателен за полезные советы и замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Водоснабжение разработки золотоносных россыпей гидромеханизированным способом целесообразно осуществлять таким образом, чтобы сбрасываемая мутная вода не загрязняла природные водотоки выше допустимых пределов и очищенной возвращалась в оборотную схему. Всё возрастающие в последние годы требования к охране окружающей среды предопределяют необходимость разработки комплекса мероприятий по обеспечению безаварийной работы отстойников технологической воды и водохранилищ.

Для создания необходимых водных резервов и хранилищ технологической воды при разработке золотоносных месторождений добывающим предприятием устраиваются различные дамбы и плотины из местных горных пород высотой до 10м. Не всегда обеспечивается сохранность запасов воды, в процессе эксплуатации сооружения из горных пород могут разрушаться. При эксплуатации гидротехнических объектов предприятий открытой добычи золота зафиксированы случаи возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, основной причиной которых стало локальное или полное разрушение ограждающих плотин и дамб, представляющих собой насыпные сооружения из горных пород, вследствие формирования в теле плотин и дамб водопроводящих каналов и размыва.

По данным Управления Росприроднадзора по Забайкальскому краю за последние 5 лет (2011-2016 гг.) зафиксировано порядка десятка аварий и аварийных ситуаций на гидротехнических объектах горных предприятий Забайкальского края, занимающихся открытой добычей золота. Нанесен экологический ущерб окружающей среде Забайкальского края за счет сброса сточных вод в реки и ручьи Убыр-Шиния, Желтуга, Михайловский, Большая Трошиха, Малые Кули, Эрен, Солонечная, Итака (рис. 1).

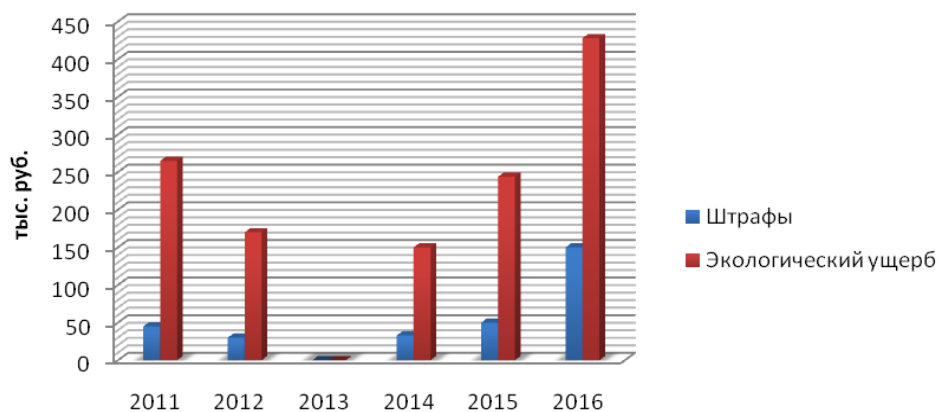


Рис. 1 – Уровень экологического ущерба, причиненный окружающей среде в результате аварий (аварийных ситуаций) на водных объектах предприятий открытой золотодобычи - по данным Управления Росприроднадзора по Забайкальскому краю

Основными причинами известных аварий и повреждений сооружений из горных пород различных типов являются: перелив воды через гребень плотин; сосредоточенная фильтрация через тело сооружения (рис. 2) или основание; суффозия; деформации и оползание откосов; фильтрационный выпор грунта при выходе в нижний бьеф, контактный размыв.



Рис. 2 – Выход фильтрационных вод ограждающей дамбы

Сооружение необходимо проектировать так, чтобы не возникало фильтрационных деформаций. Фильтрационные силы и положение депрессионной кривой следует учитывать и при расчетах устойчивости откосов из горных пород. В свою очередь, различные виды устройств являются надежным средством управления фильтрационными потоками воды.

Различные типы устройств управления фильтрацией сооружений из горных пород включают фильтрационные материалы, в качестве которых применяются зернистые и волокнистые среды.

Применение устройств на основе волокнистых полимерных материалов дает возможность решить проблемы, связанные с сосредоточенной фильтрацией через тело плотины, суффозией, деформацией и оползанием откосов грунтовых плотин; эффективность, низкую себестоимость и меньшие трудозатраты по сравнению с аналогичными конструкциями из природных материалов. Тем не менее, в настоящее время волокнистые материалы недостаточно широко применяются при управлении фильтрационными процессами ввиду недостаточной изученности.

В связи с этим, для оценки эффективности применения волокнистых полимерных материалов при управлении фильтрацией проведено моделирование фильтрационных процессов (метод конечных элементов), происходящих в теле сооружения с помощью программы Plaxis 2D AE 2013. Результат моделирования полей фильтрации сооружения со структурой из волокнистых полимерных материалов и без, наглядно представлен на рис. 3. При этом установлено, что точка максимального значения поля фильтрации воды в случае отсутствия волокнистого материала находится на поверхности нижнего бьефа, что создает опасность размыва и суффозии откоса. В свою очередь максимальное значение поля фильтрации для случая с устройством из волокнистых материалов находится в теле плотины (точка входа воды в материал); воды фильтруются через материал и опасность размыва не создается.

По результатам моделирования установлено, что устройства управления фильтрацией на основе волокнистых полимерных материалов позволяют снизить возможность возникновения аварийных ситуаций из-за размыва и суффозии нижнего откоса; также установлено, что основными параметрами данных устройств управления фильтрацией являются – уклон в сторону нижнего бьефа, высота слоя волокнистых материалов.

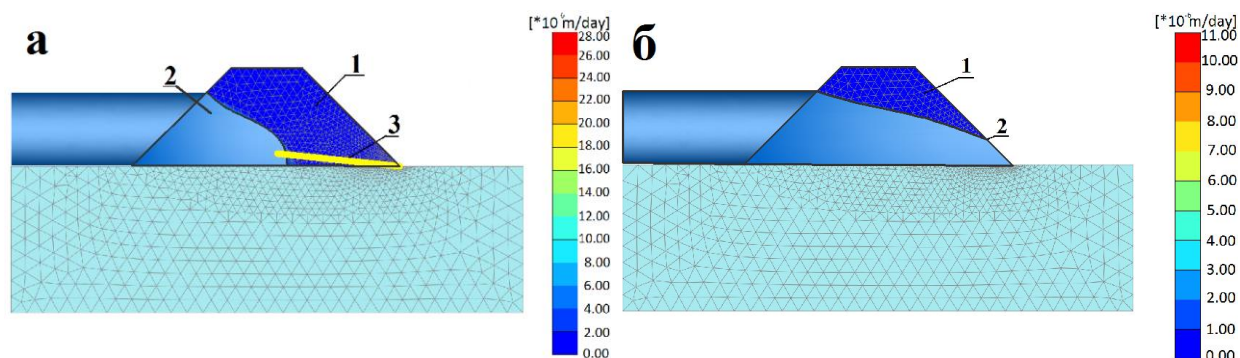


Рис. 3 - Поле фильтрации воды в геомассиве сооружения

а - с применением устройств из волокнистых материалов, б - без применения устройств из волокнистых материалов

1-сухой грунт, 2-обводненный грунт, 3- устройство из волокнистого материала

Анализ и обобщение данных аварийности дамб и плотин на предприятиях открытой золотодобычи, построенная фильтрационная модель сооружения, а также конструкция устройств управления фильтрацией на основе волокнистых материалов являются доказательством **первого научного положения выносимого на защиту: На основании математической фильтрационной модели разработана прогнозная оценка основных технологических параметров, влияющих на управление процессом фильтрации воды в сооружениях из горных пород с помощью волокнистых материалов, позволяющая исключить суффозию и разрушительные фильтрационные деформации.**

Проведенные ранее исследования применения волокнистых полимерных материалов при сооружении плотин и дамб основаны на теории фильтрации воды в пористых средах (Герасимов В. М., Замарин Е.А., Киселев П.Г), однако методика расчета не учитывает снижение фильтрационного расхода от действия внешней нагрузки от веса сооружений.

Современный волокнистый полимерный материал представляет собой пористую среду объемной плотности 70...150 кг/м³, средний диаметр пор составляет 136... 82,4 мкм. Ранее проведенными исследованиями установлено, волокнистый полимерный материал при сжатии до 80% имеет уменьшение диаметров пор в 3,67-4,57 раза. Уменьшение диаметра пор приводит к снижению фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый полимерный материал.

Структура устройства управления фильтрацией представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из нескольких слоев волокнистого материала и

водонепроницаемой геомембраны. В сооружении устройство располагается с уклоном в сторону нижнего бьефа (рис. 3а).

Для определения изменения основных параметров устройств управления фильтрацией воды (высота слоя и уклон в сторону нижнего бьефа) проведены экспериментальные исследования, устанавливающие зависимость изменения фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый материал от действия внешней нагрузки массива горных пород сооружения, данные исследования также дают возможность определить рекомендуемый диапазон основных параметров устройств.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторных установках, позволяющих определять изменение фильтрационного расхода от действия внешней нагрузки, схемы которых представлены на рис. 4.

При проведении экспериментов использованы волокнистые полимерные материалы типа Дорнит марки по поверхностной плотности: М250, М300, М400; полиэтиленовая геомембрана LDPE по ГОСТ 10354-82.

На каждой установке проведена серия экспериментов (для каждой ступени нагрузки измерено 10 значений фильтрационного расхода) по исследованию влияния внешнего давления на фильтрационные свойства волокнистых материалов, полученные результаты обработаны с учетом погрешности в соответствии с ГОСТ Р 50779.21-2004.

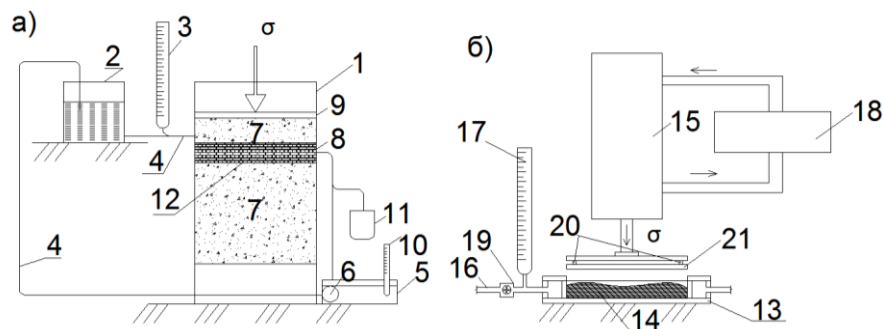


Рис. 4 – Экспериментальные установки для определения зависимости «фильтрационный расход воды – внешнее давление»

а) Диапазон нагрузок $\sigma \leq 8$ кПа; б) Диапазон нагрузок $8 < \sigma \leq 220$ кПа

1-корпус призматической формы; 2-емкость с водой; 3-пьезометр; 4-гибкая подводка; 5-сливная емкость; 6-насос; 7-горная порода; 8-конструкция устройства; 9-штамп для передачи нагрузки; 10-термометр; 11-мерный цилиндр; 12- геомембрана; 13-корпус призматической формы; 14-испытываемый материал; 15-пневматический цилиндр; 16-подвод воды; 17-пьезометр; 18-компрессор; 19-датчик расхода воды; 20-тензодатчик; 21-пластина для равномерного распределения давления

В ходе экспериментов получены зависимости, иллюстрирующие изменение фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый материал устройства управления фильтрацией (рис. 5-7). Представленный график зависимости фильтрационного расхода воды от внешней нагрузки (рис. 5) указывает, что в диапазоне нагрузок 0...8 кПа зависимость имеет нелинейный характер, в свою очередь, участок 8...220 кПа – линейный характер. Вследствие того, что зависимости имеют переменный характер в диапазоне нагрузок 0...220 кПа, произведена аппроксимация результатов отдельно для двух диапазонов нагрузки: 0...8 кПа и 8...220кПа. Переменный характер зависимости обусловлен особенностями пористой структуры волокнистого полимерного материала.

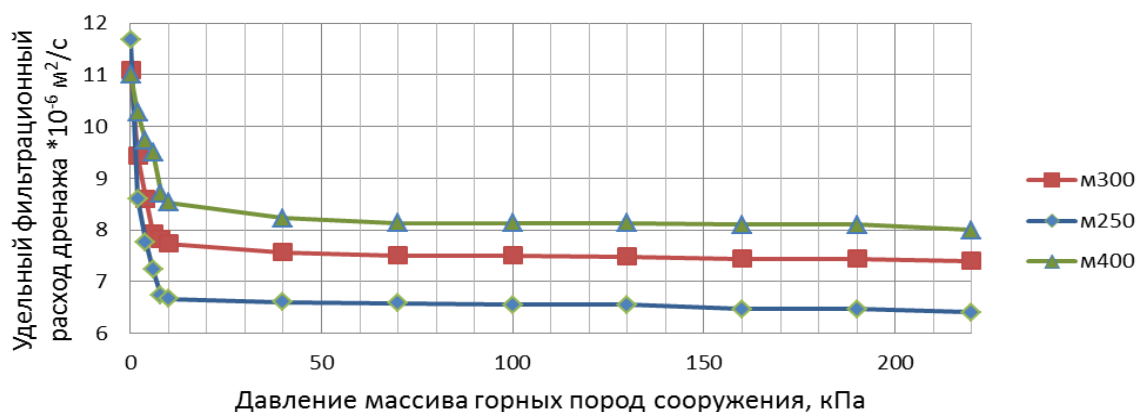


Рис. 5 – Графики зависимости «фильтрационный расход воды - внешнее давление» в диапазоне нагрузок 0...220 кПа

Изменение фильтрационного расхода воды для волокнистого материала в диапазоне нагрузок 0...8 кПа составляет: M400 – 42,3%; M300 – 29,5%; M250 – 20,8%. Графически зависимость фильтрационного расхода воды от давления представлена на рис.6.

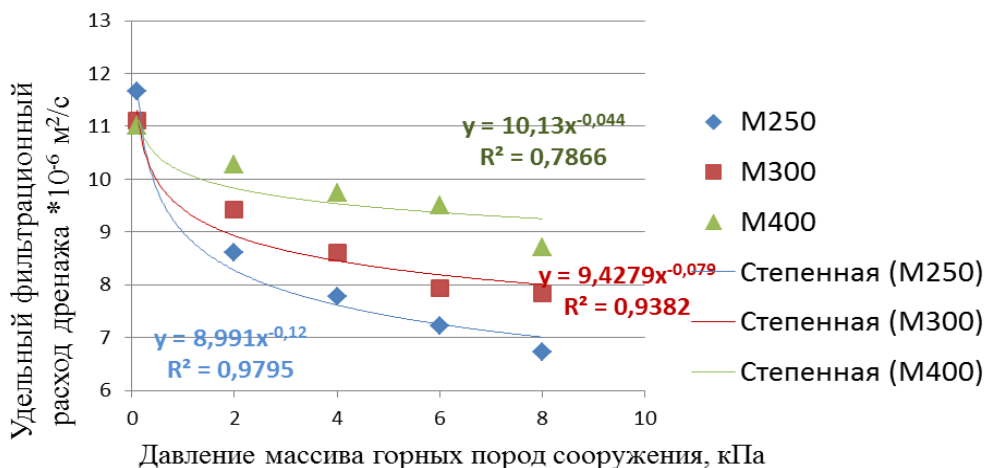


Рис. 6 – Графики зависимости удельного фильтрационного расхода от давления массива горных пород в диапазоне нагрузок 0...8 кПа

Характер зависимости имеет вид степенной функции:

$$y = a_1 \cdot x^{-b_1}, \quad (1)$$

где a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты изменения фильтрационного расхода в диапазоне нагрузок 0...8 кПа.

Изменение фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый материал, в диапазоне нагрузок 8...220 кПа составляет: М400 – 3,4%; М300 – 5,5%; М250 – 8,2%. Зависимость, выражается линейной функцией. Графически зависимость фильтрационного расхода воды от давления представлена на рис. 7.

Анализ данных в диапазоне нагрузок 8...220 кПа позволяет установить зависимость, выраженную в общем виде формулой (линейная зависимость):

$$y = a_2 \cdot x + b_2, \quad (2)$$

где a_2, b_2 – эмпирические коэффициенты изменения фильтрационного расхода,

полученные в ходе аппроксимации в диапазоне нагрузок 8...220 кПа

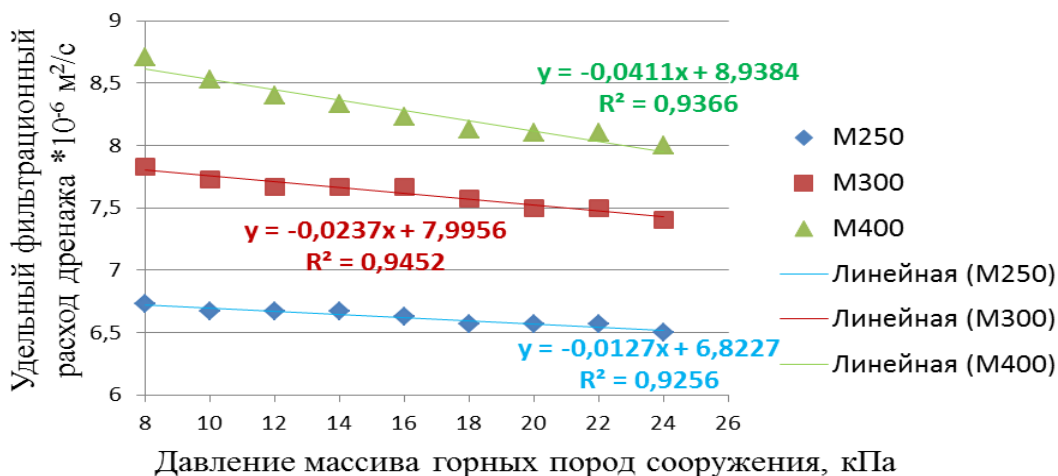


Рис. 7 – Графики зависимости удельного фильтрационного расхода от давления массива горных пород в диапазоне нагрузок 8...220 кПа

Экспериментальное выявление характера зависимости и ее численное определение позволяет установить оптимальные параметры устройств управления фильтрацией (высота слоя, уклон, положение кривой депрессии).

Изменение величины фильтрационного расхода воды, проходящей через волокнистый материал, под действием внешней нагрузки, зависит от давления массива горных пород. Математическое описание процесса изменения величины фильтрационного расхода воды имеет вид, определяемый известной формулой (3):

$$\Delta q_D = (q_{D,0} - q_{D,P}) = \frac{\partial q_D}{\partial \sigma_n} \cdot \sigma_n, \quad (3)$$

где $q_{D,0}$ – величина фильтрационного расхода без нагрузки, м²/с;

$q_{D,P}$ – величина фильтрационного расхода при заданной нагрузке, м²/с;

σ_n – давление массива горных пород сооружения на полимерный материал, кПа.

Производная $\frac{\partial q_D}{\partial \sigma_n}$ является градиентом фильтрационного расхода воды, т.е.

изменением фильтрации на единицу давления массива горных пород сооружения, установление численного значения градиента позволяет определить высоту слоя и уклон устройств управления фильтрацией плотин и дамб. На основе экспериментальных исследований получены значения градиента фильтрационного расхода воды (таблица 1).

Таблица 1

Величина градиента фильтрационного расхода

Марка волокнистого полимерного материала	Величина градиента фильтрационного расхода $\frac{\partial q_D}{\partial \sigma_n}$ для диапазона давления:	
	0...8 кПа	8...200 кПа
M250	0,618	$0,146 \cdot 10^{-2}$
M300	0,409	$0,208 \cdot 10^{-2}$
M400	0,286	$0,333 \cdot 10^{-2}$

Определение основных параметров устройств управления фильтрацией на основе волокнистых полимерных материалов: высоты слоя (h_D), уклона (i_D), производится по формулам, предложенным В.М. Герасимовым, с учетом фактического градиента фильтрационного расхода. Формула (4) – получена на основе закона А. Дарси, служит для определения высоты слоя, формула (5) – определения уклона, предложенной В.С. Козловым.

$$h_D = \frac{(q_D + \frac{\partial q_D}{\partial \sigma_n} \cdot \sigma_n) \cdot L_D}{K_D (h_B + H_1)}, \quad (4)$$

$$i_D = \frac{2 \cdot (q_D + \frac{\partial q_D}{\partial \sigma_n} \cdot \sigma_n) - \frac{K_D \cdot H_1^2}{L_D}}{K_D \cdot H_1}, \quad (5)$$

где q_d – фильтрационный расход воды без нагрузки, м²/с;

L_d – ширина волокнистого материала, м;

K_d – коэффициент фильтрации волокнистого материала, м/с;

h_B – напор в начале волокнистого материала, м;

H_1 – высота расположения материала к уровню воды в нижнем бьефе, м;

$\frac{\partial q_d}{\partial \sigma_n}$ – градиент фильтрационного расхода;

σ_n – давление массива горных пород сооружения на материал, кПа.

Предлагаемый тип устройств управления фильтрацией горных пород на основе волокнистых материалов предлагается располагать в теле сооружения с наклоном в сторону нижнего бьефа, что обеспечивает необходимое водоотведение (рис. 3а, 8). Поскольку многослойная конструкция устройства управления фильтрацией из волокнистых полимерных материалов имеет неоднородную структуру и несколько переходных областей: «волокнистый материал-волокнистый материал», «волокнистый материал-геомембрана», «волокнистый материал-горная порода», то необходимо учитывать различие параметров сцепления. В свою очередь, наличие уклона в такой системе создает влияние на устойчивость сооружения. Исследование сцепления различных контактных зон проводилось в сухом и влажном состояниях, т. к. в период строительства контакт – сухой, в период эксплуатации – влажный. Испытания проведены на специально созданной экспериментальной установке, позволяющей проводить исследования сопротивления сдвигу (аналогично испытаниям грунтов на одноплоскостной срез). В результате получены предельные касательные напряжения, при которых обеспечивается общая устойчивость конструкции сооружения с устройством управления фильтрацией, позволяющие установить максимальные значения уклона устройств в сторону нижнего бьефа.

На основе анализа полученных экспериментальных данных установлено следующее:

- зависимость касательных напряжений контакта от внешнего давления имеет линейный характер;
- устройство с переходной областью «волокнистый полимерный материал-гладкая геомембрана» обеспечивает устойчивость при максимальном наклоне 25°;
- устройство с переходной областью «волокнистый полимерный материал – шероховатая геомембрана» обеспечивает устойчивость при максимальном наклоне 40°.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что наиболее слабым сцеплением обладает контакт волокнистого полимерного материала с гладкой геомембраной во влажном состоянии. Рекомендуемый уклон устройства из условия обеспечения водоотведения составляет $5...10^\circ$, что позволяет утверждать - наличие гладкой геомембраны не снижает общую устойчивость сооружения.

Вышеизложенное является доказательством **второго научного положения:**

Оптимальные параметры фильтрации воды в массиве сооружения из горных пород основаны на закономерностях снижения фильтрационного расхода воды в устройствах с применением волокнистых полимерных материалов от давления горных пород: нелинейный характер при увеличении давления до 8 кПа и линейный выше 8 кПа, за счет особенностей деформирования волокнистой среды.

Методика расчета устройств управления фильтрацией воды сооружений основана на теории фильтрования в пористых средах. Данные устройства предлагается располагать в теле сооружения, как представлено на схеме рис. 8, уклон устройств в сторону нижнего бьефа позволяет обеспечить отведение воды и снижение фильтрационных воздействий на горные породы сооружения.

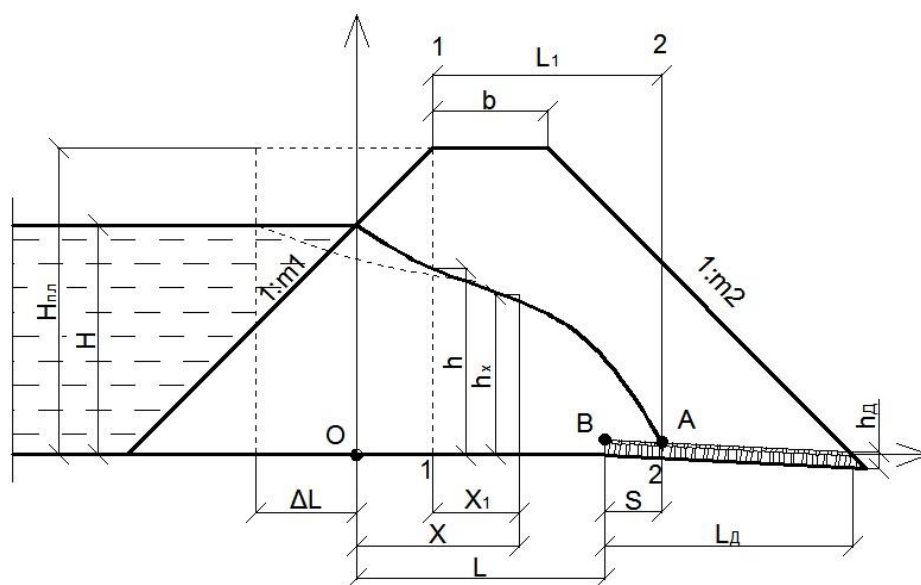


Рис. 8 – Схема размещения устройства управления фильтрацией из волокнистого полимерного материала в ограждающей дамбе

Методика расчета устройств включает в себя: фильтрационный расчет сооружения (определение величины эквивалентного профиля, фильтрационного расхода сооружения построение кривой депрессии), определение основных параметров устройств управления

фильтрацией (определение ширины длины рабочего участка устройства, уклона и высоты слоя).

Для определения фильтрационного расхода воды через тело плотины предлагается использовать формулу Г.К. Михайлова (6).

$$\frac{q}{K_{\phi}} = \frac{H^2}{2(\Delta L + L - S_d)}, \quad (6)$$

где S_d – ширина рабочей зоны волокнистого материала, м;

\dot{I} – уровень воды в верхнем бьефе, м;

$K_{\phi,пл}$ – коэффициент фильтрации горных пород сооружения, м/сут;

L – расстояние от оси ординат до точки выхода водяного потока, м.

q – удельный фильтрационный расход, на 1 м длины сооружения, м²/с.

С целью определения оптимального расположения устройства управления фильтрацией выполняется построение кривой депрессии по формуле (7), предложенной Павловским Н. Н.

$$y = \sqrt{\frac{H^2}{x} - \frac{2 \cdot q}{K_{\phi, \text{н.б.}}}}, \quad (7)$$

Для обеспечения надежности фильтрования предусмотрено превышение фильтрационного расхода воды в устройстве над фильтрационным расходом сооружения на 15%, более высокое превышение может привести к контактному размыву или повышенной суффозии грунтов.

Высота слоя материала и уклон в сторону нижнего бьефа дамб определяются по формулам (4) и (5).

При наличии водопроницаемого основания под сооружением, методика расчета включает изменения, указанные ниже, что обусловлено фильтрационным процессом в основании самого сооружения.

Определение фильтрационного расхода воды сооружения производится с учетом наличия водопроницаемого основания по формуле Павловского Н. Н. (9):

$$q = q_{пл} + q_{ос} = \frac{K_{\phi,пл} \cdot H^2}{2L_p} + \frac{K_{\phi,ос} \cdot H_{ос} \cdot H}{L_p + 0,4H_{ос}}, \quad (10)$$

Положение кривой депрессии определяется уравнениями (10) и (11).

На участке от точки О до В:

$$h_x = \sqrt{2 \frac{q}{K_{\phi,пл}} (L + S_d + \frac{H_{oc}}{2} - x) + (h_{1-1} + \frac{K_{\phi,oc}}{K_{\phi,пл}} H_{oc})^2} - \frac{K_{\phi,oc}}{K_{\phi,пл}} H_{oc}, \quad (10)$$

На участке от точки В до А:

$$h_x = \frac{h_{1-1}^2}{H_{oc}} \sqrt{\left[\left(\frac{H_{oc}}{h_{1-1}} \right) - 1 \right] \cdot \left(1 + 2 \frac{L_1 + S_d - x}{H_{oc}} \right) + 1}, \quad (11)$$

где H_{oc} – глубина водопроницаемого основания под сооружением, м;

Применение формул (10, 11) позволяет определить расположение устройств управления фильтрацией с учетом наличия водопроницаемого основания под сооружением.

$K_{\phi,oc}$ – коэффициент фильтрация горный пород основания, м/сут;

Расчет основных параметров устройств также производится по уточненным формулам (4) и (5).

Основываясь на обоснованной мной методике и полученных экспериментальных данных, разработаны программы для ЭВМ. Данные программы позволяют производить определение основных параметров устройств из волокнистых материалов при заданных показателях сооружений из горных предприятия открытой золотодобычи.

Исходные данные для расчета по программе Layer drainage_a:

$$H_1 = 4\text{м}; m_1 = 2,5; m_2 = 2; b = 5\text{м}; K_{\phi} = 10\text{м/сут}; H = 6\text{м}; h_0 = 0,5\text{м}; \gamma = 1,8\text{г/см}^3$$

$$\rho_0 = 400\text{г/м}^2; L_d = 5\text{м}; K_{\phi,d} = 100\text{м/сут}, \text{основание – водонепроницаемое.}$$

Использование программы позволяет получить следующие показатели: расстояние до эквивалентного вертикального профиля плотины (deltaL, м); расстояние от оси ординат до полимерной структуры (L, м); фильтрационный расход на 1м длины сооружения (q, м²/сут); фильтрационный расход волокнистого полимерного ядра (qd, м²/сут); ширина рабочего участка материала (S, м); нагрузка, воспринимаемая структурой (sigma,n, кН/м²); уклон в сторону нижнего бьефа (id); высота слоя материала (hd, м); объемная плотность волокнистого полимерного материала (rho0, кг/м³), по которым производится построение кривой депрессии.

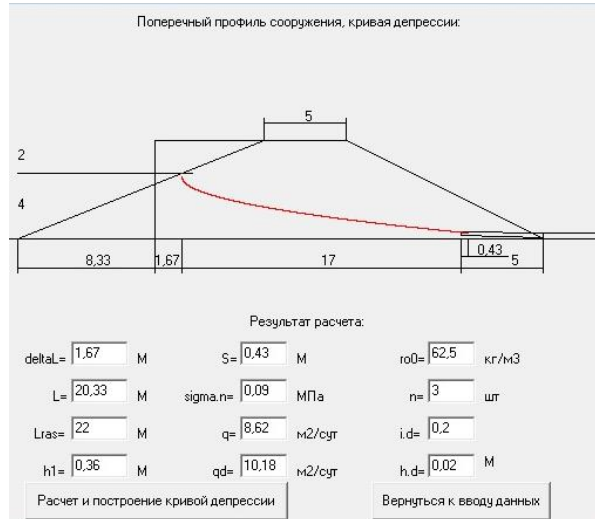


Рис. 9 – Результаты расчета по программе Layer drainage_a

Вышеизложенное является доказательством **третьего научного положения:**

Эксплуатационная надежность сооружений из горных пород достигается оптимальным управлением фильтрацией воды волокнистыми полимерными материалами на основании методики определения основных параметров фильтрационных устройств с учетом веса массива горных пород.

Опираясь на методы интегральной вероятностной оценки риска, определена экономическая эффективность применения волокнистых материалов, на основе анализа показателей аварийности грунтовых плотин предприятий открытой добычи золота за период 2011...2016гг. В качестве критерия эффективности принят уровень риска возникновения аварийной ситуации.

Расчет экономической эффективности сводится к вычислению разности рисков для плотин с волокнистым материалом ($R_{дрен}$) и без него ($R_{факт}$).

$$\Delta R = R_{факт} - R_{дрен}, \quad (12)$$

Риск возникновения аварийной ситуации на предприятии определяется по формуле (13).

$$R = P(\text{Pr}) \cdot Y, \quad (13)$$

где $P(\text{Pr})$ – интеграл вероятности Гаусса-Пуассона (функция ошибок), формула (14),

Y – Средний ущерб для одного предприятия, на котором произошла аварийная ситуация.

$$P(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,5 \left[1 + \text{erf} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \text{Pr} \right) \right] = 0,5 \cdot \text{erfc} \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \text{Pr} \right], \quad (14)$$

где Pr - «пробит-функция», статистическая (нелинейная) модель анализа зависимости плотности распределения от дозы негативного воздействия, основанная на нормальном распределении.

$$Pr = a + b \cdot \ln(D), \quad (15)$$

где a, b – коэффициенты специфики процесса,

D – доза негативного воздействия, соотношение среднего количества зафиксированных аварийных ситуаций водных объектов, на которых ведется добыча к общему количеству задействованных объектов.

Основываясь на показателях аварийности плотин предприятий открытой добычи золота за период 2011...2016гг. экономическая эффективность для одного горного участка предприятия в течение первых 5 лет составит 431,1 тыс. руб. Снижение риска для предприятия в свою очередь составит 62%. Срок службы волокнистого материала превышает 50 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая задача – повышение безопасности эксплуатации водных объектов предприятий гидромеханизированной золотодобычи за счет применения устройств управления фильтрацией горных пород.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Выявлены основные причины возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий при эксплуатации грунтовых ограждающих дамб на основе анализа и обобщения ранее выполненных исследований в области систем оборотного водоснабжения на золотоносных россыпных месторождениях Забайкалья и Дальнего Востока и фильтрации воды в сооружениях из горных пород.

2. Разработана математическая модель, описывающая процесс фильтрации в сооружении из горных пород во взаимодействии с волокнистыми полимерными материалами, произведено сравнение данных, полученных по предложенной методике расчета устройств на основе волокнистых материалов с данными, полученными при моделировании, что позволяет применять предложенную методику для расчета сооружений.

3. Установлено, что при увеличении давления, оказываемого на структуру из волокнистых полимерных материалов до 8 кПа, зависимость имеет нелинейный характер,

фильтрационный расход воды в диапазоне 0...8 кПа снижается на 21-43%, в диапазоне 8...220 кПа зависимость имеет линейный характер, фильтрационный расход воды в диапазоне 8...220 кПа снижается на 3-8% (в зависимости от используемого волокнистого материала). Полученные результаты позволяют внести уточнение в расчет высоты слоя и уклона устройств управления фильтрацией, что обеспечивает высокую сходимость результатов расчета с данными фильтрационной модели.

4. На основании экспериментальных исследований выявлено, что наличие гладкой геомембраны не снижает общую устойчивость в диапазоне рекомендуемого уклона для устройства из волокнистых полимерных материалов, таким образом, применение гладкой геомембраны допустимо в конструкции устройств управления фильтрацией.

5. Разработана методика определения параметров устройств из волокнистых полимерных материалов для сооружений на водопроницаемом и водонепроницаемом основаниях с использованием программ для ЭВМ, что позволяет автоматизировать процесс проектирования устройств управления фильтрацией плотин и дамб гидромеханизированных предприятий. Внесены корректировки в формулы расчета основных параметров устройств управления фильтрацией (высота слоя и уклон в сторону нижнего бьефа) на основании экспериментальных исследований, что дает возможность учесть собственный вес сооружений.

6. Экономический эффект в первые пять лет эксплуатации плотин одного участка добычи составит 431,1 тыс. руб. Снижение уровня риска возникновения аварийной ситуации на 62% обеспечивается за счет снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций и снижения затрат при эксплуатации сооружений из горных пород.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах: - **в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки Российской Федерации:**

1. Герасимов В.М. Отведение грунтовых вод из тела искусственной грунтовой насыпи с помощью пластовых дренажей [Текст] / В.М. Герасимов, Е.И. Нижегородцев // Вестник Забайкальского Государственного университета – 2012, № 8 (87). – Чита: ЗабГУ. - С. 12-15.

2. Нижегородцев Е.И. Водопонижение оснований подземных тоннелей и штолен, пересекающие водоносные грунтовые слои, с помощью волокнистых полимерных материалов [Текст] / Е.И. Нижегородцев // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2013, №10. – Москва: Горная книга. – С 384-391.

3. Герасимов В.М. Исследование фильтрационных свойств волокнистых полимерных материалов при изменении давления [Текст] / В.М. Герасимов, Е.И. Нижегородцев // Системы. Методы. Технологии – 2013, №4(20). – Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ. - С. 153-157.

4. Нижегородцев Е.И. Расчет пластовых дренажей из волокнистых полимерных материалов для гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий [Текст] / Е.И. Нижегородцев // Известия вузов. Горный журнал - 2015, №7 – Екатеринбург: УГГУ. – С. 19-22.

5. Секисов Г.В. Гидросистемный комплекс при разработке золотоносных россыпей [Текст] / Г.В. Секисов, В.М. Герасимов, Е.И. Нижегородцев // Вестник Забайкальского Государственного университета – 2017, № 7 (23). – Чита: ЗабГУ. - С. 29-38.

- в прочих изданиях:

6. Нижегородцев Е.И. Экспериментальные исследования процесса дренирования в плоских дренажах из волокнистых полимерных материалов [Текст] / Е.И. Нижегородцев // Молодой ученый – 2014, №4 (63). – Казань: ООО «Издательство Молодой ученый». - С.227-229.

7. Нижегородцев Е.И. Исследование сдвиговых усилий при контакте горных пород с волокнистыми полимерными материалами [Текст] / Е.И. Нижегородцев // XLI научно-практическая конференция студентов, магистрантов и аспирантов Забайкальского государственного университета. Молодежная научная весна. Сборник материалов. Часть 1 – 2014, - Чита: ЗабГУ. С.233-237.

8. Нижегородцев Е.И. Учет нормального давления при расчете горизонтальных пластовых дренажей из волокнистых полимерных материалов грунтовых плотин горнодобывающих предприятий на водонепроницаемом основании [Текст] / Е.И. Нижегородцев // IV Международная научная конференция «Технические науки в России и за рубежом» - 2015, - Москва: Буки-Веди. С.131-134.

9. Герасимов В. М. Экспериментальные исследования процесса дренирования в плоских дренажах из волокнистых полимерных материалов [Текст] / В.М. Герасимов, Е.И. Нижегородцев // Вестник Забайкальского регионального отделения Российской Академии Естественных Наук - 2012-2013, № 1(5) – Чита. – С. 67-69.

10. Свалова К.В. Геосинтетические материалы в процессах фильтрования и дренирования: монография [Текст] / К.В. Свалова, Е.И. Нижегородцев – Чита: ЗабГУ, 2016. – 222 с.

- свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612310 Layer drenage_a. Правообладатель и автор Е.И. Нижегородцев Заявл. № 2014663731 от 24.12.2014г; опубл. 17.02.2015г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615908 Layer drenage_b. Правообладатель и автор Е.И. Нижегородцев Заявл. № 20155613233 от 14.04.2015г; опубл. 27.05.2015г.