

На правах рукописи



БАЕВ ОЛЕГ АНДРЕЕВИЧ

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ ИЗ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика
и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новочеркасск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Научный консультант: **Косиченко Юрий Михайлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ханов Нартмир Владимирович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, заведующий кафедрой «Гидротехнических сооружений»

Сольский Станислав Викторович
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», лаборатория «Фильтрационные исследования» имени акад. Н.Н. Павловского отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения», главный научный сотрудник

Ткачев Александр Александрович
доктор технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Гидротехническое строительство»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

Защита состоится «20» февраля 2024 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Бестужева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена значительными потерями воды на фильтрацию из оросительных каналов (особенно выполненных в земляном русле и в сложных инженерных условиях), составляющими до 30 % от водозабора (свыше 4,8 км³/год в орошаемом земледелии), подтоплением приканальных угодий, вторичным засолением и заболачиванием земель. При этом в случае устройства противофильтрационных облицовок на каналах сэкономленная за счет исключения фильтрационных потерь вода может быть использована для орошения дополнительных площадей, расположенных в аридной зоне, и получения большего урожая сельскохозяйственной продукции.

Так, согласно Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (утвержденной постановлением Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 721) в долгосрочной перспективе на 2022–2031 гг. предусмотрено развитие мелиоративного комплекса страны, в том числе реконструкция ряда магистральных и межхозяйственных оросительных каналов. Кроме этого, в рамках Госпрограммы предусмотрены научно-исследовательские работы, направленные на разработку конструктивно-технических решений противофильтрационных и дренажных устройств из новых геосинтетических и композитных материалов для каналов и водоемов гидромелиоративных систем.

Фильтрационные процессы через дамбы каналов сопровождаются выносом с водным потоком мелких частиц грунта, что приводит к снижению фильтрационной устойчивости гидротехнических сооружений, повышается вероятность возникновения аварийных ситуаций. Особенно это касается каналов, выполненных на косогорных участках, в полувыемке-полунасыпи, насыпи, на участках, где наблюдаются карстово-суффозионные и просадочные явления.

Наиболее распространенными противофильтрационными покрытиями оросительных каналов являются: бетонные, железобетонные, пленочные и грунтовые экраны. Бетонные и железобетонные покрытия (или облицовки) на участках каналов характеризуются относительно малым сроком службы (до 30–40 лет), на многих участках в процессе эксплуатации сооружений наблюдается вымыв подстилающего грунта с последующим провисанием и разрушением плит и деформационных швов. На бетонных поверхностях происходит шелушение и разрушение поверхности бетона из-за температурных колебаний и наличия на некоторых участках каналов воды в зимний период.

Наиболее перспективным направлением в нашей стране является применение многослойных материалов в конструкциях облицовок каналов, которое сдерживается недостаточностью изученности их работы при повреждаемости, регене-

рации (самозалечивании бентонитом), фильтрации через отверстия и проколы. Кроме этого, отсутствует ряд конструктивных и компоновочных решений для каналов, выполняемых из геосинтетических материалов в сложных инженерных условиях и при наличии защитных устройств.

Применение более совершенных геосинтетических противофильтрационных материалов на оросительных каналах требует развития методов расчета их водопроницаемости и эффективности (в том числе при наличии повреждений), разработки и совершенствования конструкций противофильтрационных покрытий для различных условий применения с последующей оценкой эксплуатационной надежности, долговечности и водонепроницаемости.

Степень разработанности темы исследования. Применяемые в настоящее время противофильтрационные покрытия на каналах в виде бетонных, железобетонных и полимерных облицовок характеризуются недостаточной надежностью и долговечностью, значительной повреждаемостью и водопроницаемостью. До настоящего времени остается неизученным вопрос применения материалов с заранее заданными свойствами в конструкциях облицовок каналов. Кроме того, требуется проведение исследований, направленных на разработку и совершенствование конструктивно-технических решений, обеспечивающих практически полное исключение фильтрационных потерь воды в каналах с использованием геосинтетических материалов.

Существующие традиционные методики расчета водопроницаемости, надежности и долговечности противофильтрационных экранов оросительных каналов становятся неприменимы для геосинтетических бентонитовых покрытий, обладающих свойством регенерации (самозалечивания) повреждений при эксплуатации сооружений. Требуется разработка новых методов расчета основных показателей конструкций противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов, в том числе в условиях их самозалечивания при повреждаемости.

С целью выбора оптимального варианта конструкции противофильтрационного покрытия оросительного канала с использованием геосинтетических материалов необходимо проведение расчетного сопоставления различных вариантов с последующей разработкой методик их расчета.

Фильтрационные модели водопроницаемости (в том числе осесимметричной фильтрации) через системы дефектов геосинтетических многослойных экранов до настоящего времени практически не разрабатывались, а рекомендации по применению геосинтетических бентонитовых материалов в конструкциях противофильтрационных покрытий оросительных каналов представлены ограниченно, разработаны в основном для накопителей различного назначения.

Разработанные в рамках выполнения диссертационной работы рекомендации по применению противофильтрационных конструкций из геосинтетических и геокомпозитных материалов отечественного производства на оросительных

каналах рассмотрены и одобрены секцией мелиорации Научно-технического совета Минсельхоза России.

Цель исследования. Заключается в разработке новых конструктивно-технических решений противofильтрационных покрытий оросительных каналов из геосинтетических материалов, совершенствовании методов расчета водопроницаемости облицовок при повреждаемости и самозалечивании, разработке методик расчета эффективности и выбора оптимального варианта конструкции противofильтрационного покрытия канала.

Рабочая гипотеза. Практически полное исключение потерь воды на фильтрацию, повышение коэффициента полезного действия каналов и исключение негативного воздействия вод может быть достигнуто совершенствованием конструктивных решений новых противofильтрационных покрытий, развитием методов их расчета, исследованием физико-механических характеристик облицовок с течением времени, что позволит дополнить и развить систему знаний в области применения современных строительных материалов для противofильтрационных целей в гидротехническом строительстве.

Задачи исследования:

- выполнить обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований в области применения геосинтетических материалов для противofильтрационных целей на оросительных каналах;
- обосновать новый подход к созданию противofильтрационных покрытий каналов на основе бентонитовых материалов;
- разработать новые технические решения в виде противofильтрационных покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками для оросительных каналов;
- разработать высокоэффективные многослойные конструкции противofильтрационных покрытий каналов из геосинтетиков и технологии их создания;
- оценить фильтрационные потери через облицовки каналов из геомембран и геосинтетических бентонитовых материалов;
- предложить фильтрационные и численные модели водопроницаемости противofильтрационных покрытий каналов при наличии в них дефектов;
- разработать методики расчета эффективности и водопроницаемости противofильтрационных покрытий, в том числе при повреждаемости и самозалечивании бентонитом;
- установить показатели и получить значения самозалечивания единичных повреждений в покрытиях из бентонитовых материалов;
- исследовать в лабораторных условиях коэффициент фильтрации и физико-механические характеристики геосинтетических материалов на основе бентонита;

- выполнить натурные исследования и оценить техническое состояние противofильтрационных покрытий на оросительных каналах;

- определить надежность, срок службы и вероятность безотказной работы разработанных конструкций покрытий из геосинтетиков в сравнении с альтернативными вариантами;

- оценить экономическую эффективность разработанных конструктивных решений и сформулировать рекомендации по использованию результатов исследования при проектировании, строительстве и эксплуатации каналов.

Научная новизна исследования:

- *обоснована* целесообразность создания противofильтрационных покрытий на оросительных каналах с применением геосинтетических материалов;

- *раскрыты* закономерности фильтрации и самозалечивания (регенерации) повреждений в противofильтрационных покрытиях оросительных каналов с использованием геосинтетических бентонитовых материалов;

- *разработаны* фильтрационные модели водопроницаемости противofильтрационных покрытий оросительных каналов из геомембран при наличии дефектов;

- *разработана* математическая модель осесимметричной фильтрации через дефект геосинтетического экрана в пористую среду грунтового основания;

- *установлены* показатели эффективности, надежности и выбора оптимального варианта конструкции противofильтрационного покрытия канала;

- *разработана* численная модель фильтрации в пространственной постановке через систему повреждений с учетом их взаимовлияния;

- *установлены* методики расчета водопроницаемости и долговечности противofильтрационных покрытий, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов;

- *выявлены* показатели вероятности безотказной работы конструкций противofильтрационных покрытий каналов, выполняемых из геосинтетических материалов.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

- *получили дальнейшее развитие* методы расчета водопроницаемости, эксплуатационной надежности и срока службы конструкций противofильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов на основе бентонита;

- *разработана* модель осесимметричной фильтрации через дефект экрана в пористую среду грунтового основания;

- *предложены* методики оценки эксплуатационной надежности противofильтрационных конструкций для оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов;

- *получены* зависимости для расчета водопроницаемости противофильтрационных покрытий каналов из геосинтетических бентонитовых материалов и полимерных геомембран при наличии повреждений;

- *выполнено* расчетное сопоставление процесса водопроницаемости геосинтетических покрытий с альтернативными вариантами противофильтрационных облицовок оросительных каналов;

- *теоретически обоснована* методика выбора оптимального варианта конструкции противофильтрационного покрытия оросительного канала с использованием целевой функции.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- *выявлены* причины изменения и *получены* среднестатистические значения коэффициентов полезного действия облицованных и необлицованных каналов Юга России;

- *разработаны и усовершенствованы* конструкции противофильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов, в том числе для сложных условий производства работ (при инфильтрации воды в канал, просадках основания);

- *определены* условия и области применения разработанных конструкций покрытий для оросительных каналов из геосинтетических материалов, обоснованы их преимущества;

- *апробированы и внедрены* на наиболее опасных реконструируемых участках оросительных каналов конструктивные решения с использованием геосинтетических бентонитовых материалов;

- *разработаны* новые конструктивно-технические решения для определения фильтрационных потерь на каналах, технологии создания и восстановления облицовок с использованием геосинтетиков;

- *выявлены* в лабораторных условиях коэффициенты фильтрации и уточнены физико-механические характеристики эксплуатируемых в натуральных условиях противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов на основе бентонита;

- *получены* натурные данные по техническому состоянию обследуемых оросительных каналов и среднестатистические значения коэффициента полезного действия;

- *представлены* рекомендации по применению конструкций противофильтрационных покрытий с использованием геосинтетических материалов на оросительных каналах;

- *определены* показатели экономической эффективности и приведенной стоимости противофильтрационных покрытий геосинтетических, бентонитовых и других типов покрытий оросительных каналов.

Методология и методы исследования. При проведении исследований использовались методы теории фильтрации, в частности, метод конформных отображений, метод годографа скорости, p -аналитических функций комплексного переменного, позволяющие преобразовать плоские задачи фильтрации к осесимметричным. В качестве методов теории надежности использовались теоремы Т. Байеса, Ц. Е. Мирцхулавы, С. Райса, а для расчета долговечности противофильтрационных покрытий метод С. Аррениуса.

Автором были разработаны, апробированы и зарегистрированы в качестве программ для ЭВМ 4 методики расчета эффективности, надежности, водонепроницаемости и долговечности различных вариантов конструкций противофильтрационных покрытий каналов с использованием геосинтетических материалов (в том числе на основе бентонита). Разработана методика расчета эффективности бентонитовых покрытий при их повреждаемости с учетом самозалечивания, основанная на методе последовательной смены стационарных состояний.

Разработана обобщенная программа выбора оптимального варианта конструкции противофильтрационной облицовки при проведении реконструкции каналов. На все методики разработаны алгоритмы и выполнены тестовые расчеты.

Лабораторные исследования проводились в аккредитованной лаборатории (г. Курган) с использованием современных приборов и оборудования, прошедших поверку. Образцы геосинтетических материалов при проведении испытаний отбирались из рулонов при их производстве для различных партий.

Натурные исследования выполнялись на действующих оросительных каналах (в том числе при их реконструкции): Донском магистральном и Пролетарском каналах (в Ростовской области); Невинномысском и Перебросном магистральном (в Ставропольском крае); на магистральном канале Аксыра (в Кабардино-Балкарской Республике); распределительных каналах Багаевской оросительной системы (БГ-Р-5, БГ-Р-6) и многих др.

Объект исследования – оросительные каналы гидромелиоративных систем.

Предмет исследования – конструкции и методики расчета противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов на оросительных каналах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новые конструкции противофильтрационных покрытий оросительных каналов повышенной надежности и долговечности из геосинтетических материалов.

2. Конструктивно-технические решения противофильтрационных покрытий каналов для сложных инженерных условий производства работ.

3. Численная модель фильтрации из оросительного канала при наличии системы повреждений в противофильтрационном покрытии из геосинтетического материала.

4. Фильтрационная модель водопроницаемости облицовок через систему дефектов в противофильтрационном покрытии из бентонитовых материалов с использованием метода последовательной смены стационарных состояний и неустановившейся фильтрации.

5. Модель осесимметричной фильтрации через дефект экрана в пористую среду основания с использованием интеграла Шварца-Кристоффеля и метода годографа скорости.

6. Методики и результаты расчета надежности, эффективности и срока службы конструкций противофильтрационных покрытий оросительных каналов с использованием геосинтетических материалов.

7. Результаты экспериментальных исследований фильтрационных и физико-механических характеристик геосинтетических бентонитовых покрытий и составляющих их элементов на лабораторных установках.

8. Результаты натурных исследований противофильтрационных конструкций из геосинтетических материалов на каналах: Донском магистральном, Пролетарском, Невинномысском, Аксыра.

9. Результаты расчетов экономической эффективности различных типов противофильтрационных покрытий каналов, и методика выбора оптимального варианта конструкции облицовки.

Личный вклад автора. Заключается в постановке цели и задач исследования, разработке новых и усовершенствованных конструктивно-технических и технологических решений (по патентам на изобретения) противофильтрационных покрытий каналов с использованием геосинтетических материалов, создании фильтрационных моделей водопроницаемости и надежности противофильтрационных устройств каналов из геомембран, установлении процесса самозалечивания покрытий на основе бентонита при наличии круглых поврежденных, разработке численных моделей фильтрации в программном комплексе «FreeFem++», создании методик и алгоритмов расчета с последующей их апробацией и регистрацией в виде программ для ЭВМ, проведении лабораторных и натурных исследований, формулировке выводов и заключения.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается тем, что:

- некоторые из разработанных конструкций противофильтрационных покрытий *апробированы* на опытном участке оросительного канала в натурных условиях;

- теория численного моделирования с помощью программного комплекса «FreeFem++» *построена* на распространенном методе конечных элементов;

- *установлено* близкое совпадение результатов расчета водопроницаемости противофильтрационных покрытий каналов при наличии дефектов с результатами расчетов других авторов и данными лабораторных исследований;

- полученные методики расчета водопроницаемости и надежности противофильтрационных покрытий оросительных каналов из геосинтетических материалов *проверены* на тестовых расчетах, *автоматизированы* и *зарегистрированы* в качестве программ для ЭВМ;

- *получены* близкие значения прогнозного срока службы конструкций облицовок с результатами натурных и экспериментальных исследований;

- *использованы* сертифицированные приборы, оборудование и программное обеспечение при проведении экспериментальных и натурных исследований противофильтрационных покрытий оросительных каналов.

Апробация результатов. Разработанные конструктивно-технические решения противофильтрационных устройств с применением геосинтетических материалов использованы при реконструкции наиболее опасных участков облицовки на Донском магистральном канале; в проектах реконструкции оросительных каналов, водоемов и накопителей. С участием автора разработано 12 нормативно-методических документов по применению геосинтетических материалов (технические условия, альбомы конструкций, рекомендации по строительству и эксплуатации оросительных каналов и водоемов и др.), получено 7 актов внедрения.

Результаты, полученные в диссертации, использованы в ходе проведения прикладных научно-исследовательских работ ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» по государственному заданию Минсельхоза России в 2020–2021 гг., где автор являлся руководителем НИР по теме: «Провести исследования и разработать рекомендации по устройству противофильтрационных конструкций на облицовках оросительных каналов», и ответственным исполнителем НИР по теме: «Провести исследования и обосновать применение композитных материалов для ремонта и продления срока службы бетонных облицовок оросительных каналов».

Основные результаты исследования докладывались и получили положительную оценку на научных конференциях: Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию образования Волжского НИИ гидротехники и мелиорации (2016 г.); Научно-практической конференции «Актуальные проблемы мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ», 2019 г.); I Международной научно-практической конференции «Trends in the world of science» (г. Смоленск, 2019 г.); VII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Экология и мелиорация агроландшафтов: перспективы и достижения молодых ученых», (ФНЦ агроэкологии РАН, г. Волгоград, 2019 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Экология и водное хозяйство: Актуальные проблемы и перспективы инновационного развития» (ФГБНУ «РосНИИПМ», 2020 г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (International Conference on Industrial Engineering) в 2018–2021 гг. (г. Сочи); Всероссийской (национальной) научно-практической

конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 2021 г.) и др.

По теме исследования в 2018–2019 гг. автором был получен грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук по теме: «Разработка и исследование высокоэффективных противотрационных конструкций каналов и прудов-накопителей из геокомпозитов с заданными свойствами» (№ МК-3304.2018.8).

Публикации. Основные научные результаты диссертации достаточно полно изложены в рецензируемых научных изданиях, всего 43 публикации и приравненные к ним результаты интеллектуальной деятельности, в том числе: 21 статья в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 9 статей в наукометрических изданиях, индексируемых международными реферативными базами «Scopus» и «Web of Science»; 7 патентов на изобретения и 4 свидетельства о регистрации программ для электронно-вычислительных машин; 2 статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Общий объем работы составляет 352 страницы машинописного текста, в том числе 123 рисунка и 39 таблиц. Список литературы включает 313 источников, в том числе 73 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, отражена степень ее разработанности, определены цель и рабочая гипотеза, представлены задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, приводятся сведения о используемой методологии и методах диссертационного исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, раскрыта степень достоверности и апробация результатов, описан личный вклад автора.

В **первой главе** приводится всестороннее обобщение и анализ опыта применения противотрационных покрытий на оросительных каналах. Отмечается, что ранее масштабно применяемые на оросительных каналах экраны из пленочных материалов «морально» устарели, характеризуются значительной повреждаемостью и водопроницаемостью, а бетонные и железобетонные облицовки – небольшим сроком службы и сложностью производства работ.

Опыт применения противотрационных покрытий из полимерных, синтетических и композитных материалов в гидротехнических сооружениях в нашей стране составляет более 60 лет. Решением задач водопроницаемости пленочных экранов, фильтрации воды из каналов и водоемов занимались:

Н. Н. Павловский, С. Ф. Аверьянов, А. Г. Алимов, В. И. Аравин, В. В. Ведерников, Н. Н. Веригин, И. М. Елшин, В. Н. Жиленков, Ю. М. Косиченко Ц. Е. Мирцхулава, В. П. Недрига, П. Я. Полубаринова-Кочина, П. Ф. Фильчаков, Р. Р. Чугаев и др.

Детальные исследования фильтрационных режимов плотин и их противофильтрационных элементов из различных грунтовых и негрунтовых материалов проведены: К. Н. Анахасевым, Н. А. Анискиным, А. Г. Баламирзоевым, В. Б. Глазовским, А. Л. Гольдиным, Л. Н. Рассказовым, М. П. Саиновым и другими.

Эффективность применения синтетических материалов в гидротехническом строительстве отмечается в работах: М. А. Бандурина, В. Л. Бондаренко, В. А. Волосухина, А. П. Гурьева, А. В. Еремеева, Т. П. Кашариной, К. Д. Козлова, А. А. Рукавишников, Б. И. Сергеева, А. А. Ткачева, Н. В. Ханова, В. И. Штыкова, В. Н. Щедрина и других ученых.

Вопросам разработки и создания конструкций облицовок оросительных каналов, водоемов и прудов-накопителей из полимерных материалов посвящены работы: Д. В. Баклановой, В. А. Белова, В. Д. Глебова, А. В. Ищенко, И. А. Печенежской, Е. О. Скляренко, М. А. Чернова, В. П. Ягина и др.

Большой вклад в развитие исследований геосинтетических материалов и их применение в гидротехническом и природоохранном комплексе внесли Д. Г. Золотозубов, М. А. Лопатина и Р. Н. Орищук, А. Б. Пономарев, С. В. Сольский, а в разработку новых технологий восстановления облицовок – Ф. К. Абдразаков, В. М. Давиденко, Г. В. Охупкин, А. А. Созаев и многие др.

За рубежом большой вклад внесли: А. Y. AbdelRazek, R. M Koerner, J. P. Giroud, N. Touze-Foltz, R. K. Rowe, A. M. Scuro, G. Vasketti и др. ученые.

Анализ обобщенных данных, а также выполненные автором натурные исследования позволили в процентном соотношении установить распределение потерь воды на фильтрацию на оросительных каналах при наличии различных типов противофильтрационных покрытий (рисунок 1).

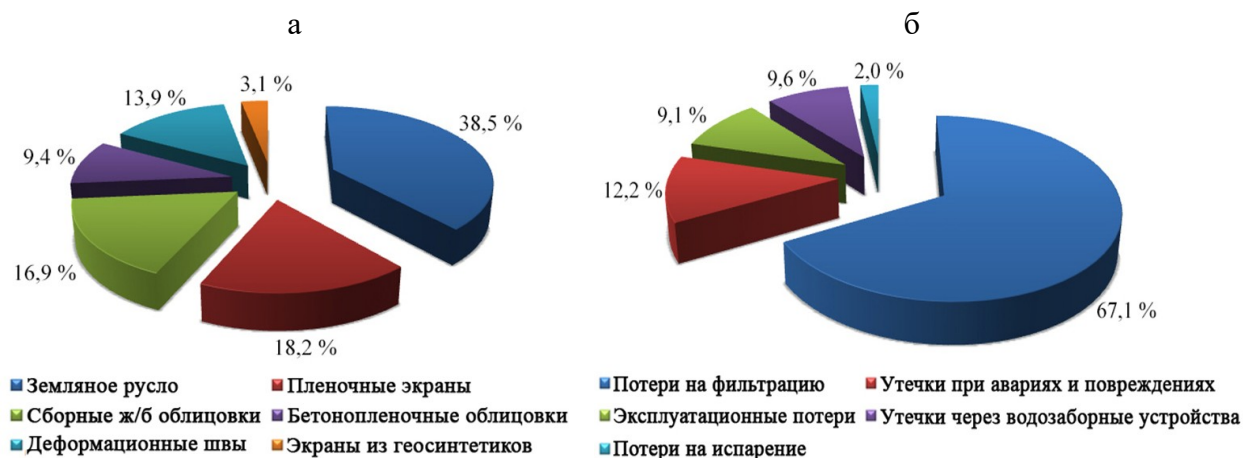


Рисунок 1 – Распределение потерь воды на оросительных каналах:
а – распределение потерь воды на оросительных каналах; б – динамика потерь воды при наличии различных типов противофильтрационных покрытий

По результатам анализа проведенных за последние годы отечественных и зарубежных исследований установлено нижеследующее:

- потери воды, транспортируемой по оросительным каналам для целей орошения, по-прежнему высоки, достигают до 40 % от водозабора, особенно на каналах, выполненных в земляном русле и в сложных инженерных условиях;
- общее количество мелиоративных каналов (по данным Департамента мелиорации Минсельхоза РФ на 2020 г.) составляет 7988, протяженность оросительных каналов порядка 23 253 км;
- среднее значение коэффициента полезного действия большинства оросительных каналов без облицовок не превышает 0,75–0,80, с облицовками – 0,93;
- взамен грунтовых экранов во многих зарубежных странах находят применение покрытия на основе геосинтетических материалов;
- отечественные противофильтрационные геосинтетические материалы по прочностным и другим показателям не уступают зарубежным аналогам и могут при соответствующем расчетном и конструктивном обосновании применяться на оросительных каналах.

Полученные сведения о техническом состоянии магистральных каналов и межхозяйственных распределителей свидетельствуют о наиболее низком КПД для каналов, выполненных в земляном русле (Верхне-Сальский, Большой, Нижне-Донской и др.). Динамика потерь воды при транспортировке по каналам (за период их эксплуатации) свидетельствует о сильной изменчивости потерь.

Вторая глава посвящена разработке конструктивно-технических решений противофильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с использованием геосинтетических материалов.

Выполненный зарубежный и отечественный обзор опыта применения геосинтетических материалов в конструкциях противофильтрационных покрытий каналов позволил сделать выводы, что они применяются пока ограниченно, а конструкции противофильтрационных экранов на их основе характеризуются несовершенством и отсутствием ряда конструктивных решений для сооружений, выполняемых в сложных инженерных условиях (на просадочных или пучинистых основаниях, в условиях повреждаемости или подпора грунтовых вод и др.). При этом за рубежом наблюдается некоторое опережение в области создания противофильтрационных устройств, но в основном для накопителей отходов различного назначения и водоемов чистой воды. В конструктивном исполнении такие решения малоприменимы для условий работы и эксплуатации оросительных каналов.

С этой целью автором разработаны конструктивно-технические решения противофильтрационных покрытий для оросительных каналов с применением геосинтетических материалов, включающих: комбинированные конструкции экранов на основе бентонита; конструкции дренажно-фильтрующих покрытий каналов; технологические решения для определения фильтрационных потерь

воды, а также конструкции противофильтрационных покрытий, выполняемых на просадочных основаниях.

Некоторые из разработанных вариантов противофильтрационных конструкций из геосинтетических бентонитовых материалов прошли опытную апробацию в натуральных условиях на участке оросительного канала (рисунок 2).

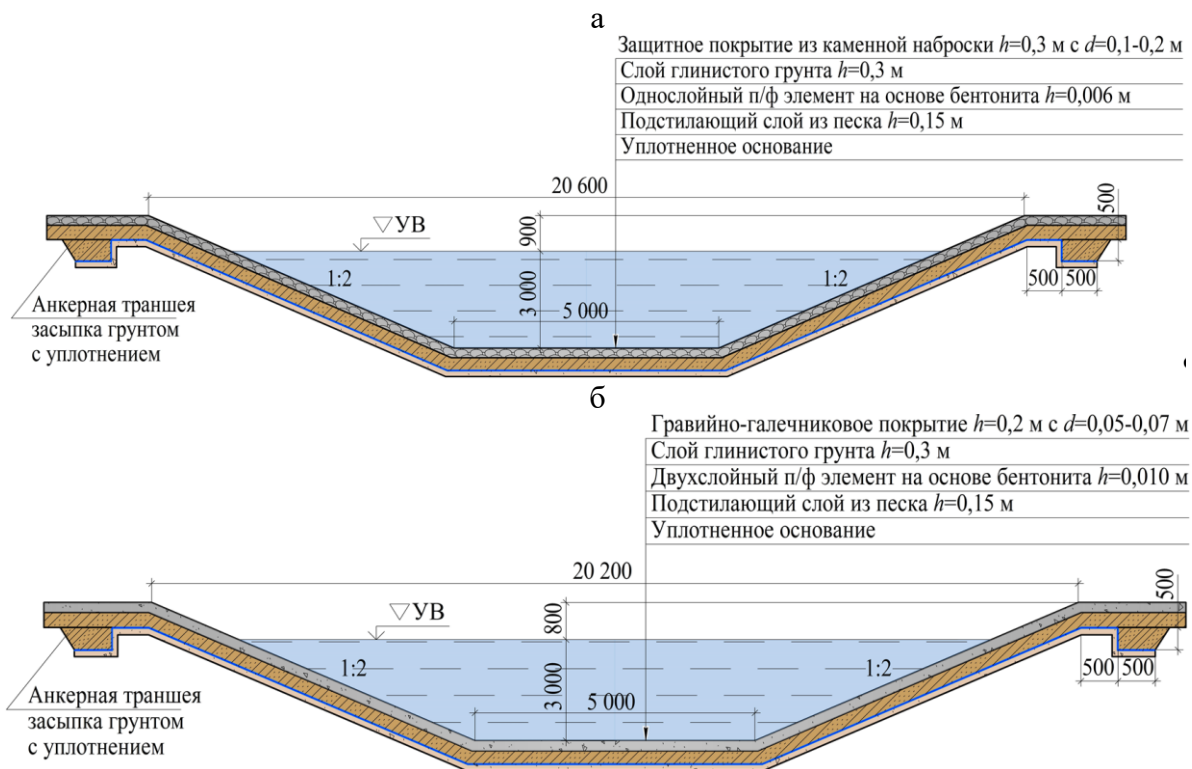


Рисунок 2 – Апробированные конструкции противофильтрационного покрытия:
 а – с защитным покрытием из каменной наброски;
 б – с защитным покрытием из гравийно-галечникового материала

Вариант исполнения внедренной конструкции противофильтрационного покрытия (по пат. № 2579482) на участке канала представлен на рисунке 3.

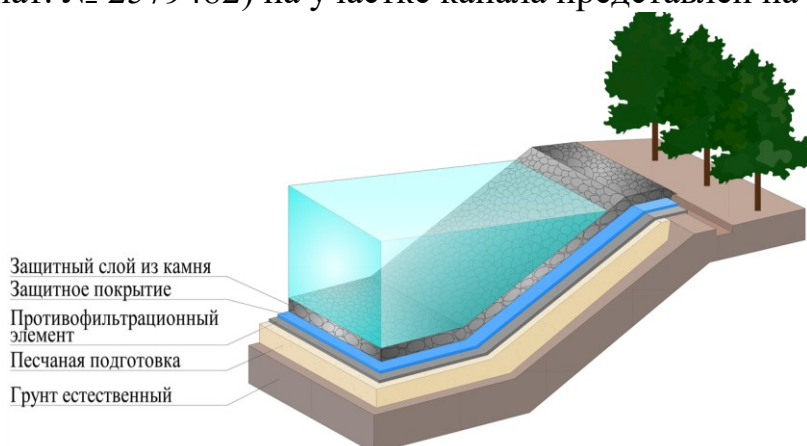


Рисунок 3 – Вариант исполнения разработанного комбинированного решения

В таблице 1 представлены варианты разработанных автором конструкций противофильтрационных облицовок оросительных каналов из геосинтетических материалов, условия и области их применения.

Таблица 1 – Разработанные и рекомендуемые к применению конструкции противофильтрационных покрытий каналов, области и условия их применения

Конструктивная схема облицовки	Тип облицовки	Область и условия применения
	<p>Закрытый противофильтрационный экран на основе геосинтетического бентонитового материала (апробированные в натуральных условиях варианты конструкций).</p>	<p>Конструкции рекомендуются к применению для создания противофильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов. В качестве защитных устройств рекомендуется использовать: каменную наброску (размер фракции определяется в зависимости от скорости течения и коэффициента заложения откосов); габионы (в том числе матрацного типа) с последующим их креплением на берме канала.</p>
	<p>Цифрами обозначено: 1 – каменная наброска; 2 – ПФЭ на основе бентонита; 3 – уплотненное основание; 4 – габионы; 5 – ПФЭ на основе бентонита и геомембраны</p>	<p>На оросительных каналах (со средней скоростью течения до 0,5 м/с, пологим заложением откосов – от 1:2,5 и более) в качестве защитного покрытия может быть использован щебень с размером фракции 70–120 мм</p>
	<p>Конструктивное решение противофильтрационного экрана, выполняемого на просадочных грунтах.</p> <p>Цифрами обозначено: 1 – каменная наброска; 2 – слой геотекстиля; 3 – противофильтрационный элемент; 4 – грунт; 5 – естественное основание</p>	<p>При создании оросительных каналов на просадочных основаниях (с максимальной величиной просадки более 0,5 м) рекомендуется к применению конструктивно-техническое решение, заключающееся в устройстве компенсаторов деформаций, выполняемых в виде складок противофильтрационного геосинтетического материала, раскрывающихся в случае просадки основания</p>
	<p>Компоновочное решение дренирования облицовки канала (по пат. № 2762413)</p> <p>Цифрами обозначено: 1 – бетонная облицовка; 2 – противофильтрационный элемент; 3 – дренирующий элемент; 4 – обратный клапан; 5 – гравийно-галечниковый наполнитель; 6 – приямок</p>	<p>При устройстве противофильтрационных покрытий на оросительных каналах в условиях инфильтрации (при подпоре облицовки грунтовыми водами) возможно создание дренирующе-разгрузочных устройств, предназначенных для снижения гидростатического давления, действующего на противофильтрационный элемент, и свободного выпуска грунтовых вод непосредственно в оросительный канал</p>

Выполненная апробация, натурные, лабораторные и теоретические исследования позволили установить, что разработанные конструкции (по сравнению с аналогами – бетонными, железобетонными и пленочными облицовками) характеризуются повышенным сроком службы (прогнозный срок по результатам расчета составляет от 65 до 75,6 лет), пониженной водопроницаемостью (коэффициент фильтрации $1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-14}$ м/с) и самовосстановлением (регенерацией) при дефектах (повреждениях), возникающих при строительстве или эксплуатации оросительных каналов.

В работе технически обоснована возможность применения и других конструктивно-технических решений, выполняемых из геосинтетических и геокомпозитных материалов (профилированных геомембран, геотекстилей и материалов геокомпозитных дренажных) на оросительных каналах, и в частности, в конструкциях противofильтрационных облицовок.

В рамках исследования были также разработаны способы контроля целостности противofильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых из геосинтетических полимерных материалов, основанные на устройстве вблизи канала изолированного отсека (по пат. № 2616801) и других методах.

В третьей главе приводятся фильтрационные расчеты противofильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов. Рассмотрены общие вопросы и дано краткое описание методов теории фильтрации, представлено развитие исследований различных авторов в области фильтрации на оросительных каналах.

Показано, что рассматриваемые ранее задачи касались противofильтрационных грунтовых и пленочных экранов, расчетов водопроницаемости каналов малой глубины или при наличии дренажа, бетонных и бетонопленочных облицовок при наличии щелей (в том числе волосяных и закольматированных) различной ширины раскрытия, решения задач методом ЭГДА, с использованием *p*-аналитических функций комплексного переменного и др.

Автором сделан акцент на недостаточную изученность вопросов водопроницаемости противofильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых из геосинтетических материалов (геомембран) методом конформных отображений, водопроницаемости и самозалечивания облицовок из бентонитовых материалов, фильтрации через систему близкорасположенных дефектов в экране из геомембраны методами численного моделирования и др.

Методика исследования водопроницаемости системы щелей полимерного геосинтетического экрана основывается на гидромеханическом подходе решения задачи, широко используемом в теории фильтрации. При этом используется метод конформных отображений и метод годографа скорости.

Структурная схема методологии расчета водопроницаемости экрана из геомембраны нарушенной сплошности представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Структурная схема методологии фильтрационного расчета водопроницаемости геосинтетического экрана через систему щелей

Для решения поставленной задачи в гидромеханической постановке отдельно рассматривался 1-й фрагмент в защитном слое грунта, а затем 2-й фрагмент в подстилающем грунтовом слое, при этом устанавливалась связь между фрагментами, определялся пьезометрический напор в отверстии (h_1 , м).

На основании теоретических выводов для практического применения была рекомендована следующая формула для определения суммарного расхода через противofильтрационный экран из полимерной геомембраны с системой щелей:

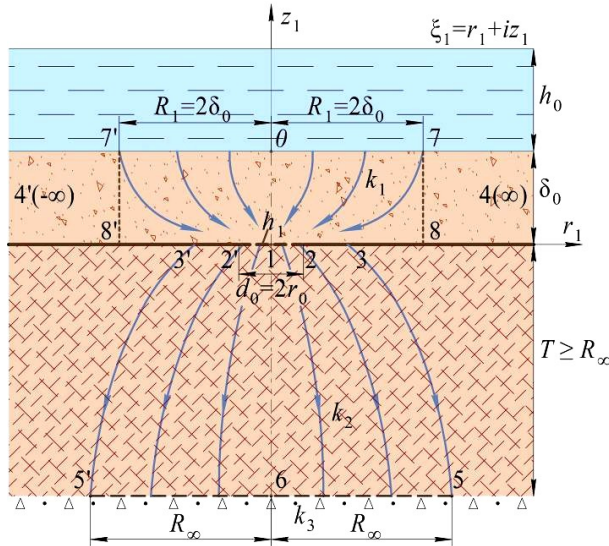
$$Q_f = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_0 - h_1) \cdot \bar{l}_{щ} \cdot n}{\ln(4cth(\pi m / 4\delta_0))}, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент фильтрации защитного слоя, м/сут; $\bar{l}_{щ}$ – среднестатистическая длина щели, м; δ_0 – толщина защитного покрытия, м; m – ширина щели, м.

Для сопоставления полученных результатов были выполнены расчеты водопроницаемости экрана нарушенной сплошности с системой щелей по формулам В. П. Недриги и В. В. Ведерникова для системы повреждений в пленочном экране, а во втором случае – для системы дренажей на водоупоре, а также по формулам J. P. Giroud для геомембран с дефектами в виде протяженных щелей.

Для практического использования был получен график зависимости приведенного фильтрационного расхода через щель экрана из геомембраны в зависимости от ширины (m , м) и толщины (δ_0 , м) защитного слоя $q_r = f(m, \delta_0)$ и составлена таблица изменения значений осредненного коэффициента фильтрации ($k'_{экp}$) противofильтрационного геосинтетического экрана.

В составе работы получено решение задачи осесимметричной фильтрации через единичный дефект противофильтрационного экрана из полимерной геомембраны в виде отверстия круглой формы, в том числе для ряда частных случаев. Общая схема осесимметричной фильтрации через отверстие противофильтрационного экрана из полимерной геомембраны представлена на рисунке 5.



h_0 – глубина воды в канале, м; d_0 – диаметр отверстия, м; k_1 – коэффициент фильтрации защитного слоя, м/сут; k_2 – коэффициент фильтрации подстилающего слоя, м/сут; k_3 – коэффициент фильтрации более проницаемого грунта, м/сут; R_∞ – максимальный радиус растекания потока, м; T – мощность грунтового основания, м

Рисунок 5 – Расчетная схема фильтрации через единичное отверстие в геомембране

На основании вышеизложенной постановки задачи при ее решении для области напорной фильтрации в защитном слое использовался интеграл Кристоффеля-Шварца, а для области безнапорной фильтрации в основании годограф скорости. При последующем решении задачи и проведении промежуточных вычислений использовались следующие зависимости определения фильтрационного расхода через отверстие экрана. При условии, когда $k_2/k_1 \geq 10$ рекомендована формула для определения фильтрационного расхода через отверстие в противофильтрационном экране вида:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 \delta_0 r_0 n}{\ln(8\delta_0/\pi r_0)}. \quad (2)$$

При условии, когда $k_2/k_1 < 10$, расчетная формула для определения фильтрационного расхода будет учитывать напор в отверстии (h_1):

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(8\delta_0/\pi r_0)}, \quad (3)$$

где расчетный параметр (h_1) определяется по зависимости:

$$h_1 = \frac{\pi^2 \sigma (h_0 + \delta_0)}{\pi^2 \sigma + 2 \ln(8\delta_0/\pi r_0)}, \quad \sigma = k_1/k_2, \quad (4)$$

где r_0 – радиус отверстия в экране из геомембраны, м.

С целью сравнения результатов с известными зависимостями других авторов выполнены расчеты осесимметричной фильтрации через дефект экрана из геомембраны в виде круглого отверстия малого размера по формуле (2).

Выполненные исследования показали, что наиболее близкие результаты дают три зависимости: Ю. М. Косиченко (теоретическая), О. А. Баева (эмпирическая), А. В. Ищенко (теоретическая) с отклонением расхода по отношению к уточненной теоретической от 7,0 до 15,0 %. По формуле В. П. Недриги (эмпирической) получено отклонение 24,1 %. По другим формулам (В. Н. Жиленкова, Ф. Форхгеймера и Л. М. Лейбензона (гидрогеологическая), J. P. Giroud (полуэмпирическая), N. Touze-Foltz и R. Rowe (теоретическая)) получены большие расхождения, в связи с тем, что в формулах некоторых отечественных ученых не учитывается пьезометрический напор в отверстии экрана, а часть зависимостей, полученных зарубежными авторами, является полуэмпирическими.

При численном решении задачи фильтрации через единичное отверстие в противофильтрационном экране из геомембраны использовался метод конечных элементов. Автором была получена пространственная модель фильтрации из оросительного канала при наличии дефекта (отверстия) в геомембране, общая картина которой представлена на рисунке 6.

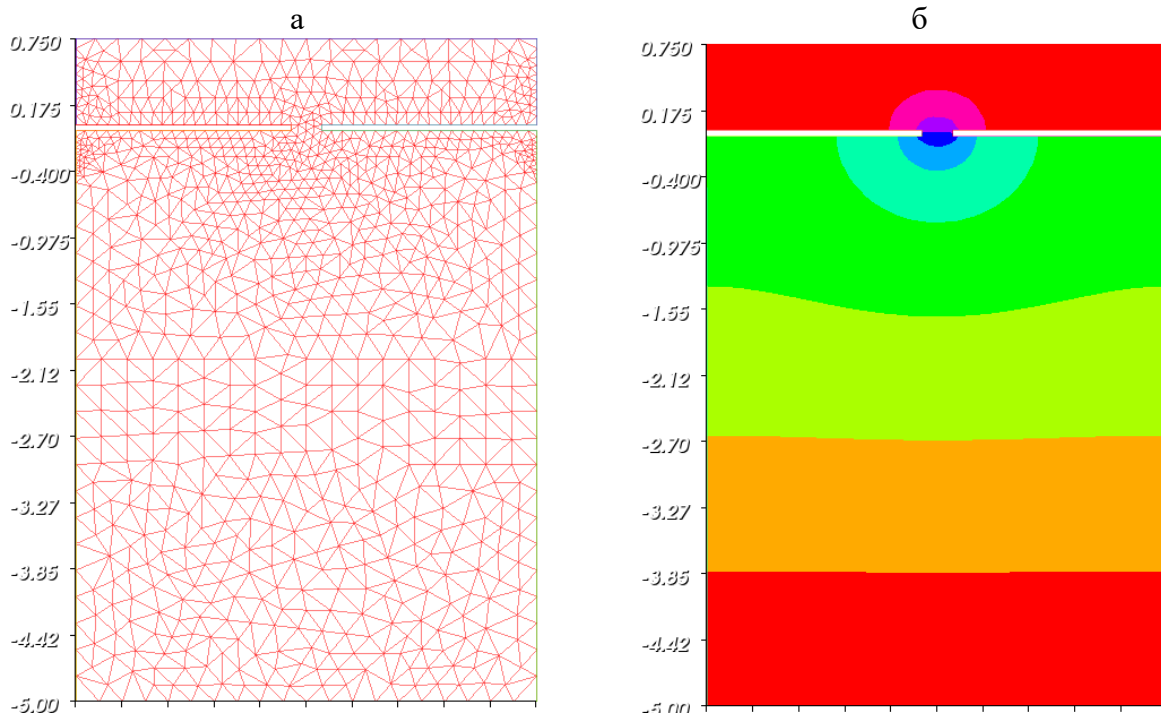


Рисунок 6 – Модель фильтрации через единичное круглое отверстие в противофильтрационном экране:
а – сетка конечных элементов; б – пространственная картина фильтрации

Для решения задачи фильтрации через систему повреждений различной ширины в противофильтрационном экране из геосинтетического материала (геомембраны) использовался метод численного моделирования с использованием программного обеспечения «FreeFem++». Производилось решение дифференциальных уравнений в частных производных с использованием метода конечных элементов, и решалась задача фильтрации жидкости (воды) через ряд

близкорасположенных повреждений. Был получен контурный график функции для той области, в которой определены конечные элементы (рисунок 7).

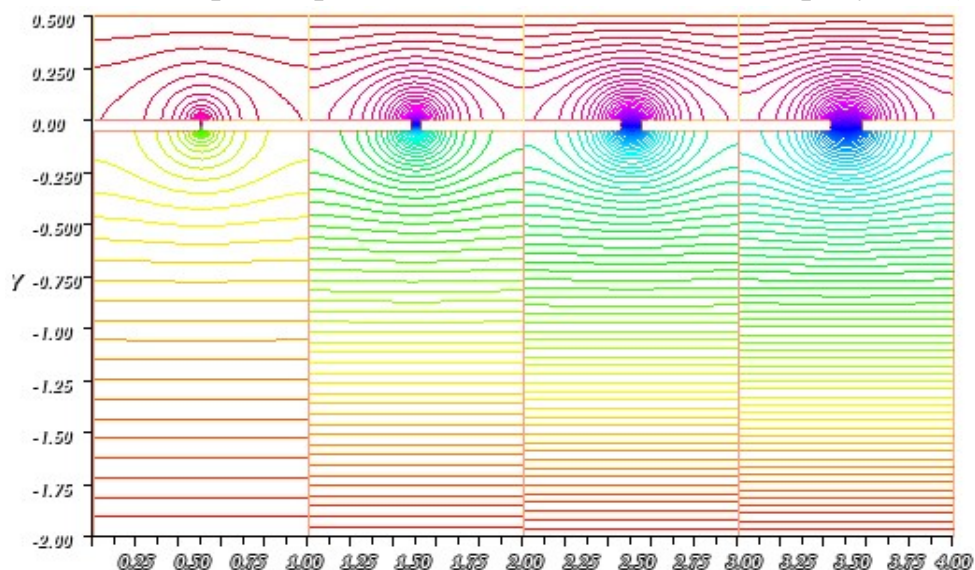


Рисунок 7 – Контурный график численной модели

По результатам были установлены значения расходов через ряд повреждений в экране из геомембраны с учетом их взаимовлияния при $m = 0,005 - 0,1$ м.

Для данной задачи определено взаимовлияние повреждений в противофильтрационном экране из геомембраны при их расположении на расстоянии 1 м, напоре 0,5 м и ширине повреждения от $m = 0,05$ м и более.

Получена пространственная модель фильтрации через экран из геосинтетического материала, включающая 4 близкорасположенных повреждения со следующей шириной: $m = 0,005$ м; $m = 0,01$ м; $m = 0,05$ м; $m = 0,1$ м (рисунок 8).

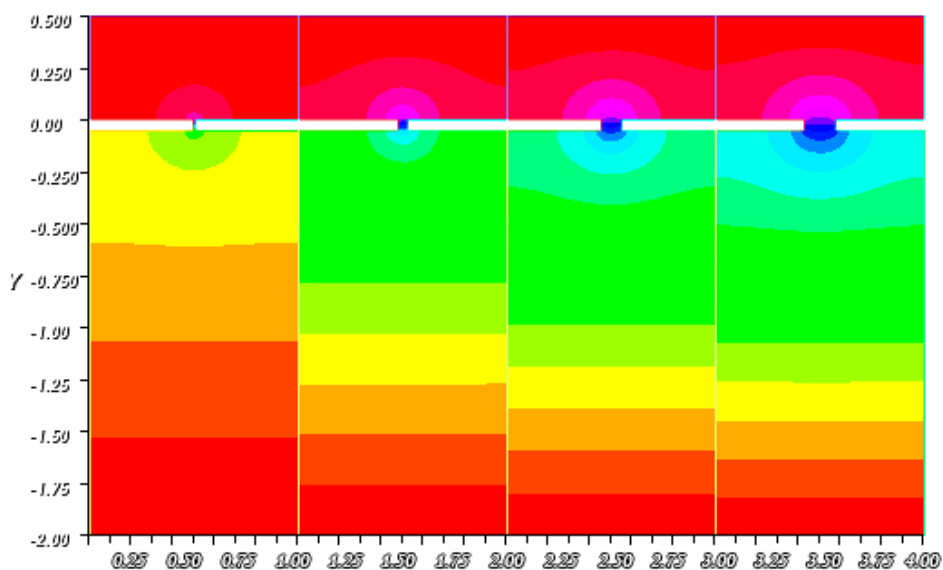


Рисунок 8 – Пространственная модель фильтрации через систему повреждений в экране из геомембраны

Анализ результатов расчета показывает, что значения расходов близко соответствуют ранее полученным автором теоретическим методом (результатам

расчета других исследователей, в частности, Ю. М. Косиченко и В. П. Недриги для пленочных экранов), а их высокие значения объясняются наличием напора над противofильтрационным экраном (ПФЭ), взаимовлиянием повреждений, учетом пьезометрического напора, а также размером повреждения.

Для расчета водопроницаемости противofильтрационного экрана из геосинтетических бентонитовых материалов с защитным слоем грунта использован метод смены стационарных состояний. Весь процесс нестационарной фильтрации разбивался на ряд стационарных состояний, когда происходит частичное самозалечивание повреждений, при котором расходы фильтрации через повреждения будем считать постоянными, а объемы утечки изменяются по вогнутой кривой.

Разработанная, зарегистрированная в качестве программы ЭВМ (свид. гос. рег. № 2019660671) и апробированная на тестовых расчетах методика оценки эффективности противofильтрационных покрытий, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов включает определение: времени самозалечивания ($t_{\text{залеч}}$) при полной регенерации повреждений; скорости самозалечивания ($v_{\text{залеч}}$) круглого повреждения в экране из бентонитового покрытия; радиуса изменения отверстия (r_i) в экране за i -й интервал времени; фильтрационного расхода за весь период самозалечивания (q_0); напора в отверстии экрана (h_1); объема потерь через единичное повреждение ($V_{\text{фил}}$). При этом учитывалась особенность самозалечивания (регенерации) повреждений в ПФУ (с течением времени и с учетом радиуса повреждения) за счет гидратации (взаимодействия с водой) бентонита.

При определении расхода через круглые отверстия применительно к рассматриваемой модели учитывалось соотношение коэффициентов фильтрации грунта основания и защитного слоя (для двух случаев, при $k_2/k_1 > 10$ и при $k_2/k_1 < 10$) для первоначального и последующих контуров повреждения экрана.

Напор в отверстии экрана вычислялся по следующей формуле:

$$h_1 = \frac{\pi^2 \sigma (h_0 + \delta_0) - 4H_k \ln(8\delta_0 / \pi r_0)}{\pi^2 \sigma + 4 \ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \quad \sigma = k_1 / k_2. \quad (5)$$

Для практического использования получен график изменения фильтрационного расхода в зависимости от времени самозалечивания единичного повреждения $q_i = f(t_i)$ в противofильтрационном экране из геосинтетических бентонитовых материалов, и график объема потерь воды $V_i = f(t_i)$ через повреждение круглой формы, которое с течением времени уменьшается вследствие гидратации бентонита самозалечивания повреждения (рисунок 9).

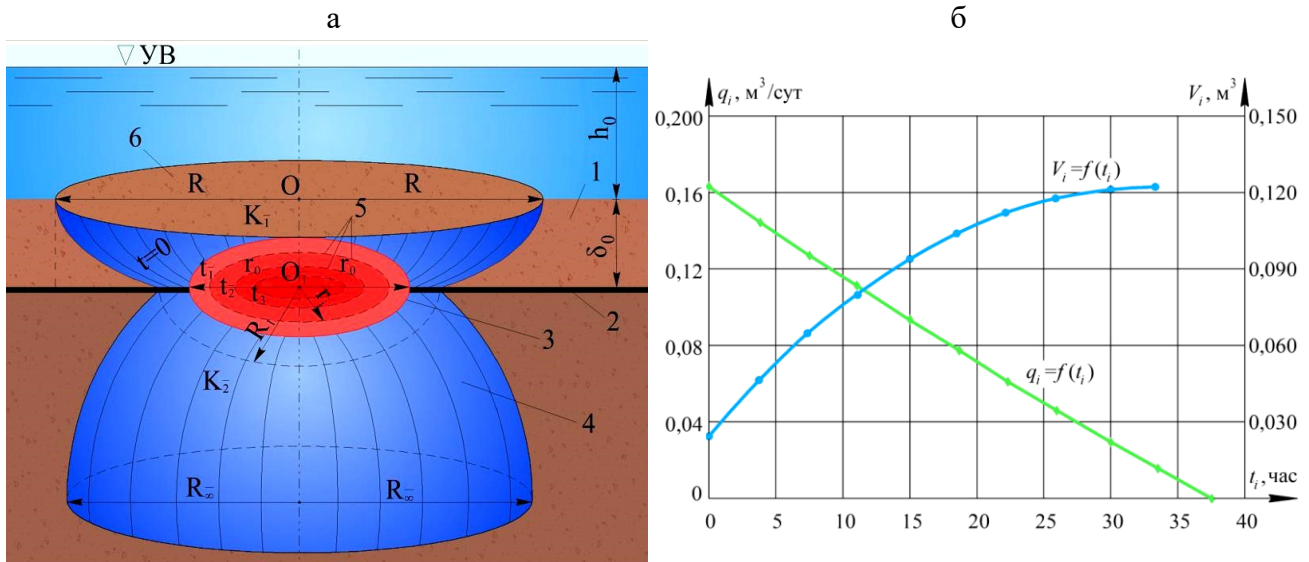


Рисунок 9 – Результаты расчета водопроницаемости и самозалечивания экрана из геосинтетического бентонитового материала:

а – модель водопроницаемости бентонитового экрана; б – графики зависимостей $q_i = f(t_i)$ и $V_i = f(t_i)$; 1 – защитный слой; 2 – экран; 3 – контур первоначального повреждения; 4 – область фильтрации в основании экрана; 5 – контуры изменения положения повреждения на моменты времени t_1, t_2, \dots, t_3 ; б – область фильтрации в защитном слое грунта

Установлено, что кривая фильтрационного расхода $q_i = f(t_i)$ изменяется от периода времени самозалечивания по некоторой кривой, близкой к прямолинейной зависимости, а кривая объема утечки (потерь) воды $V_i = f(t_i)$ через единичное повреждение бентонитового покрытия относится к параболической кривой.

В четвертой главе представлено развитие методов расчета надежности и долговечности противофильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов.

Предложено использовать следующие критерии надежности для противофильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов:

- критерий вероятности безотказной работы экрана:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}; \quad (6)$$

- критерий вероятности отказа экрана:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (7)$$

где N_0 – количество участков экрана, где проводились наблюдения; $n(t)$ – количество повреждений за период времени эксплуатации t , лет.

К предложенным показателям эффективности отнесены критерии: 1) эффективности конструкции из геосинтетических материалов по сравнению с альтернативными вариантами; 2) по фильтрационным сопротивлениям конструкции ПФЭ; 3) по коэффициентам фильтрации ПФЭ.

В работе выполнена оценка надежности конструкции экрана по критерию эффективности и найдена вероятность безотказной работы экрана для случая, когда количество участков N_0 изменяется в диапазоне от 2 до 50, а общее количе-

ство повреждений экрана $n(t) = 2 \div 10$. Полученные результаты расчета вероятности безотказной работы позволили установить и рекомендовать область надежности (с $P \geq 0,90$) противофильтрационного покрытия из геосинтетического бентонитового материала для оросительных каналов (рисунок 10).

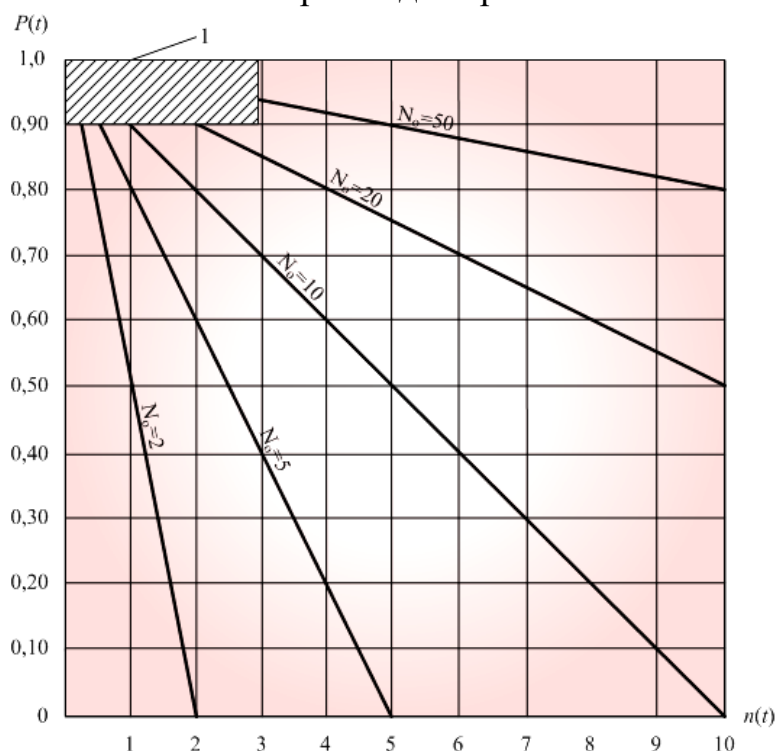
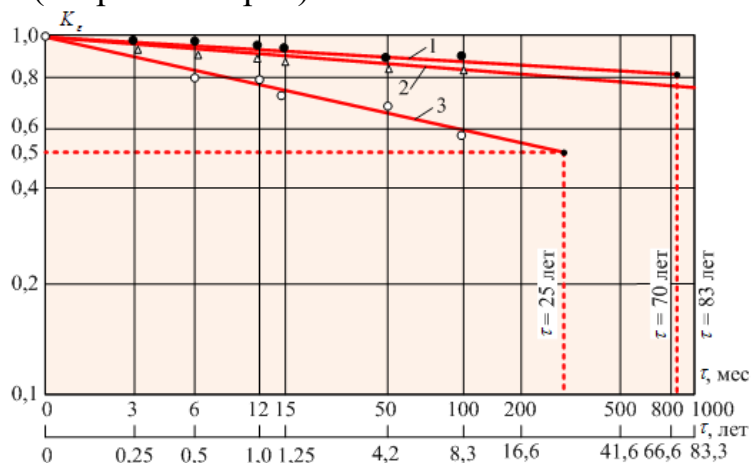


Рисунок 10 – График изменения вероятности безотказной работы противофильтрационного покрытия

1 – рекомендуемая область надежности работы противофильтрационного покрытия оросительного канала из геосинтетических бентонитовых материалов с вероятностью безотказной работы $P(t) \geq 0,90-0,98$ (заштрихована на графике); количество участков обследования $N_0 = 2 \div 50$; количество повреждений на противофильтрационном экране $n(t) = 2 \div 10$

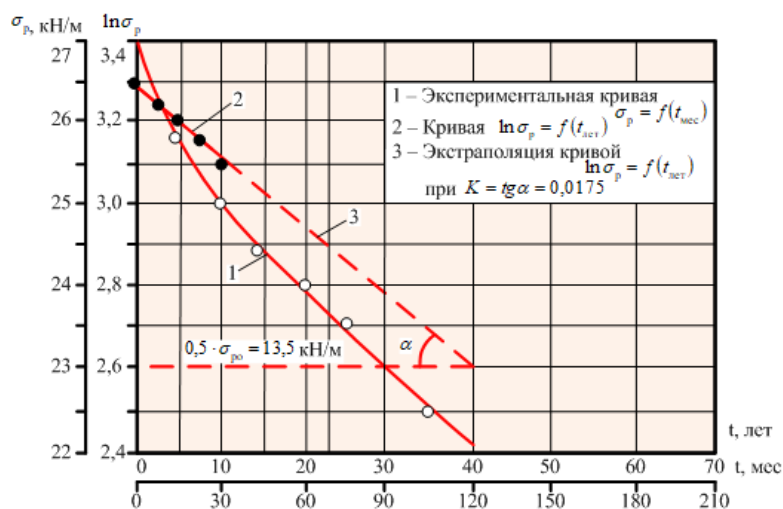
Исследования коэффициента старения полимерных геомембран (толщиной 1,0 мм), используемых в составе разработанных конструкций противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов, позволили определить прогнозный срок их службы для трех основных случаев, применяемых при создании покрытий на оросительных каналах (рисунки 11–12):

- под водой (без защитного покрытия);
- с защитным покрытием из грунта толщиной 0,5 м;
- без защитного покрытия, при непосредственном атмосферном воздействии (открытый экран).



1 – под водой;
2 – с защитным покрытием из грунта; 3 – без защитного покрытия

Рисунок 11 – График изменения коэффициента старения геомембран по относительному удлинению при разрыве

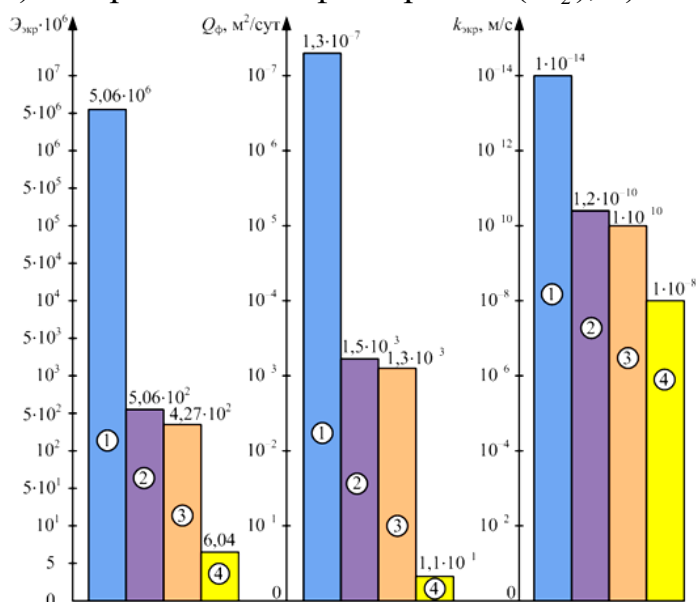


K_ϵ – коэффициент старения;
 τ – срок покрытия службы, лет

Рисунок 12 – График изменения прочности полимерных геомембран при разрыве в зависимости от времени наблюдения

Как показали результаты выполненных автором натуральных исследований образцов полимерных геомембран, заложенных в испытательном бассейне 10 лет назад, дальнейшее экстраполирование результатов позволило определить срок их службы. Так, для геомембран, находящихся под водой, получены значения 70 лет, под защитным покрытием из грунта – 83 года. При непосредственном атмосферном воздействии кривая 3 характеризуется значительным падением значений K_ϵ с пересечением предельной линии с $K_\epsilon = 0,5$ при $\tau = 25$ лет.

Анализ различных вариантов противофильтрационных покрытий для оросительных каналов при реконструкции позволило произвести их сравнение и получить данные по трем показателям для четырех типов противофильтрационных экранов применительно к ДМК (рисунок 13): 1) дефективности экрана (N_1); 2) потерям воды на фильтрацию (N_2); 3) коэффициенту фильтрации (N_3).



1 – экран из геосинтетических бентонитовых материалов (проектный вариант);
 2 – экран из геосинтетических полимерных материалов (геомембран);
 3 – глинистый уплотненный экран;
 4 – пленочный полимерный экран;
 $\mathcal{E}_{экp}$ – дефективность экрана;
 $Q_{ф}$ – удельные потери на фильтрацию, $\text{м}^2/\text{сут}$; $k_{экp}$ – коэффициент фильтрации экрана, м/с

Рисунок 13 – Гистограмма распределения показателей эффективности вариантов противофильтрационных покрытий

Выполненная расчетная оценка эффективности вариантов противофильтрационных покрытий каналов свидетельствует о том, что по критерию эффек-

тивности N_1 покрытие из геосинтетических бентонитовых материалов превышает земляное русло в $5 \cdot 10^6$ раз, а альтернативные варианты – от 6 до 500 раз. По критерию N_2 данный вариант покрытия превышает все альтернативные от $1 \cdot 10^4$ до $8,3 \cdot 10^5$ раз, по критерию N_3 , соответственно, от $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^6$ раз.

Расчет срока службы конструкций противofильтрационных покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов был выполнен по полученной с участием автора формуле, основанной на уравнении Райса:

$$\tau\{P\} = \frac{(-\ln P_{\text{бм}})}{\bar{\nu}_{\text{п}}} \cdot \exp\left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau}/K_{\sigma})]^2}{2m_{\Pi\tau}^2}\right], \quad (8)$$

где $P_{\text{бм}}$ – вероятность безотказной работы; $\bar{\nu}_{\text{п}}$ – средняя частота выбросов за средний уровень допускаемой поврежденности экранов, определяемая как:

$$\bar{\nu}_{\text{п}} = n_0/\tau_0, \quad (9)$$

где n_0 – число повреждений, превышающее допустимое значение; $\Pi_{\text{доп}}$, Π_{τ} , – повреждаемость бентонитового покрытия допускаемая и по данным наблюдений, τ , лет; $m_{\Pi\tau}$ – среднеквадратическое отклонение поврежденности покрытия; K_{σ} – коэффициент старения ПФЭ, определяется по зависимости:

$$K_{\sigma} = \sigma_{\tau}/\sigma_0, \quad (10)$$

где σ_{τ} , σ_0 – прочность материала (кН/м) за время эксплуатации τ ; σ – нормативная (паспортная) прочность материала, кН/м.

Результаты расчета, а также сопоставление расчета с аналогами противofильтрационных покрытий по различным показателям приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета надежности и долговечности вариантов покрытий

Наименование показателя	Тип противofильтрационной облицовки канала			
	бетонная	бетонопленочная с геомембраной	грунтопленочная с геомембраной	из бентонитовых материалов
1. Осредненный коэффициент фильтрации облицовки, м/с	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$0,215 \cdot 10^{-10}$	$0,1 \cdot 10^{-10}$	$0,5 \cdot 10^{-11}$
2. Допускаемый коэффициент фильтрации, м/с	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,372 \cdot 10^{-6}$	$0,372 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-11}$
3. Вероятность безотказной работы	0,92	0,95	0,94	0,98
4. Вероятность отказа облицовки	0,05	0,01	0,01	0,005
5. Срок службы облицовки, лет	35,5	61,3	75,7	68,2

Анализ результатов расчета показывает, что наибольшая эффективность по сроку службы получена для облицовок каналов из геосинтетических материалов – грунтопленочной с геомембраной (по сравнению с бетонной облицовкой эффективность составляет $4,26 \cdot 10^6$ раз) и из бентонитовых материалов.

В пятой главе приведены результаты лабораторных исследований геосинтетических материалов и конструкций противofильтрационных покрытий

каналов на их основе. Исследования проводились в аккредитованной лаборатории качества противofильтрационных материалов (г. Курган) как для первичного сырья (изготовленного в производственных условиях), так и для эксплуатируемого (на протяжении восьми лет) материала, образцы которого были изъяты на облицованном ранее оросительном канале.

Отбор образцов и процесс испытания проводился в соответствии с действующими национальными и международными стандартами на проведение испытаний геосинтетических материалов (рисунок 14).

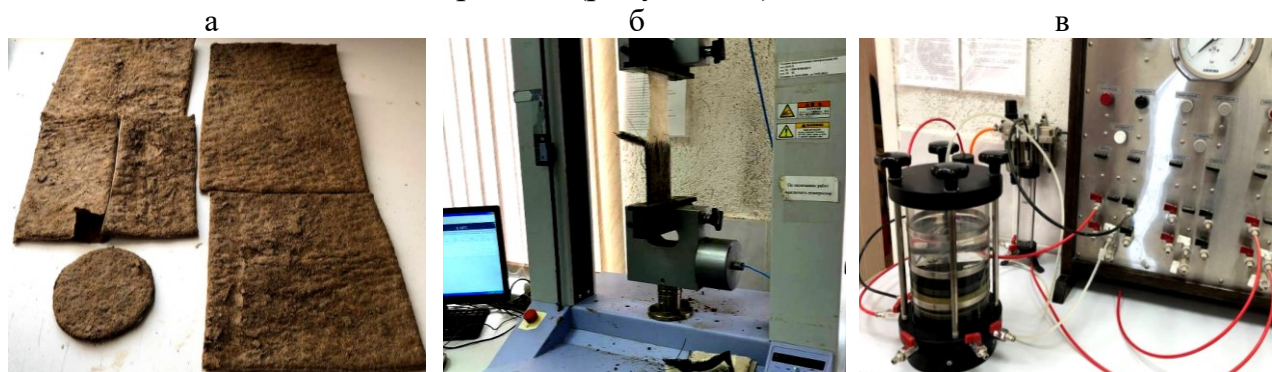


Рисунок 14 – Экспериментальные исследования ПФЭ

из геосинтетических бентонитовых материалов:

- а – отобранные образцы ПФЭ; б – установка и испытание на раздир;
в – фильтрационная установка и исследование водопроницаемости

В процессе лабораторных испытаний были впервые исследованы ПФЭ из эксплуатируемых в течение 8 лет (на оросительном канале) геосинтетических материалов на основе бентонита и геомембран. Получены физико-механические свойства ПФЭ на растяжение и удлинение под нагрузкой, определяющие способность покрытия противостоять касательному давлению грунта, который был уложен на откосах и в основании. Для изъятых образцов ПФЭ установлены характеристики прочности в продольном и поперечном направлении (рисунок 15) и другие показатели, которые в дальнейшем были использованы при расчете прогнозного срока службы конструкции и вероятности безотказной работы.

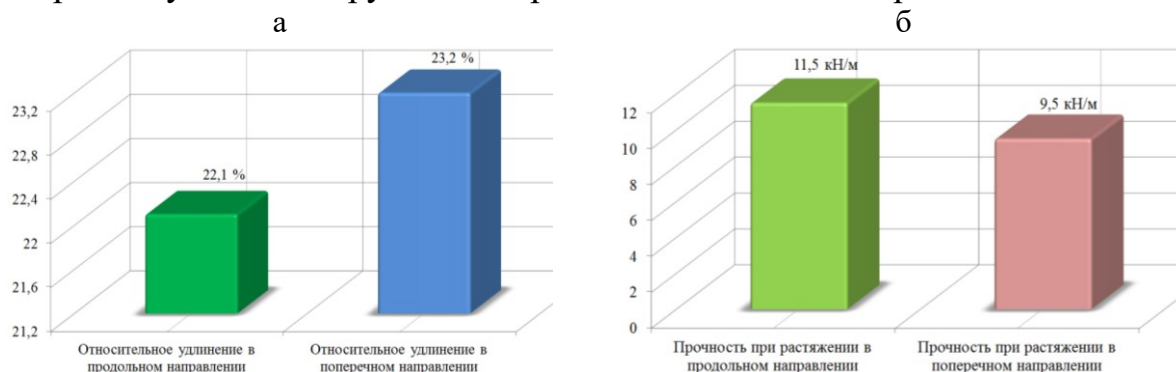


Рисунок 15 – Результаты механических испытаний ПФЭ из бентонита:

- а – при удлинении; б – при растяжении

Комплексные исследования физико-механических характеристик геосинтетических покрытий показали изменение некоторых параметров в процессе эксплуатации, в частности прочностных и других характеристик.

Лабораторные исследования фильтрационных характеристик ПФЭ из бентонитового материала проводились на пермеамetre жидкостном, результаты определения коэффициента фильтрации для 5 образцов даны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследования коэффициента фильтрации ПФЭ

Номер образца	Значение коэффициента фильтрации, м/с
1	$2,9 \times 10^{-11}$
2	$2,1 \times 10^{-11}$
3	$2,6 \times 10^{-11}$
4	$2,0 \times 10^{-11}$
5	$2,4 \times 10^{-11}$
Среднее значение	$2,4 \times 10^{-11}$

Выполненный анализ и сопоставление полученных результатов позволили установить причины изменения реологических показателей ПФЭ из бентонита. Применяемый в составе экрана суглинок в процессе эксплуатации перемешивался с бентонитом, что негативно сказывалось на его реологических характеристиках. По результатам исследований получен низкий индекс набухания – в пределах 8,0 мл/2 г и высокий показатель водоотдачи – 68,8 мл.

Проведенные лабораторные испытания физико-механических свойств новых геосинтетических покрытий с использованием профилированных геомембран, совмещенных с геотекстилями, показали свои преимущества перед аналогами по показателям прочности, водонепроницаемости и фильтрующей способности.

В **шестой главе** представлены результаты натурных исследований облицованных (в том числе с применением геосинтетических материалов) каналов.

Визуальные обследования и инструментальные исследования выполнялись на основе действующей нормативно-правовой и методической базы.

Для установления фактического технического состояния противофильтрационных покрытий были обследованы наиболее крупные частично облицованные каналы ЮФО: Донской магистральный и Пролетарский (рисунок 16); СКФО: Невинномысский, Перебросной и Аксыра и др.



Рисунок 16 – Облицованный участок обследуемого канала и конструкция противофильтрационного экрана

Получены новые данные о техническом состоянии каналов и противофильтрационных облицовок, установлен прогнозный уровень безопасности,

определены основные деформации покрытий, возникающие в процессе эксплуатации, а также среднестатистические показатели КПД.

Установлено несовершенство применяемых ранее конструктивно-технических решений противофильтрационных покрытий из бетонопленочных и полимерных материалов (полиэтиленовых пленок), что в последующем привело к возникновению размывов, деформаций русел, откосов и противофильтрационных элементов, зарастанию водной растительностью, выходу воды через грунтовые дамбы каналов и значительному подтоплению приканальных территорий.

Даны рекомендации по созданию и эксплуатации наиболее опасных участков каналов, выполненных с применением геосинтетических материалов. На некоторых участках каналов определена необходимость совершенствования противофильтрационных облицовок в виду оползания защитных покрытий, зарастания камышом и древесно-кустарниковой растительностью.

Устройство шурфов на опытном участке оросительного канала позволило отобрать и провести экспериментальные исследования образцов противофильтрационного элемента из геосинтетических бентонитовых материалов, и получить сведения о техническом состоянии конструкции в процессе эксплуатации.

Для необлицованных, наиболее опасных и деформированных участков каналов были разработаны и предложены эксплуатирующей организации варианты рекомендуемых конструкций противофильтрационных покрытий, которые в дальнейшем были использованы в проектной практике реконструкции каналов.

В **седьмой** главе рассмотрена оценка экономической эффективности и предложения по выбору оптимального варианта конструкции противофильтрационного покрытия оросительного канала. Предложено производить выбор оптимального варианта из условия суммы затрат и риска от возможных повреждений облицовки с использованием целевой функции:

$$C_f = \min(C_{0f} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\tau_0} P_{0ijf} \cdot Y_{0ijf}), \quad (11)$$

где C_{0f} – первоначальная стоимость варианта противофильтрационной облицовки f , руб.; P_{0ijf} – вероятность отдельных повреждений i в срок эксплуатации j для варианта облицовки f ; Y_{0ijf} – ущерб, обусловленный недополучением сельхозпродукции (за счет уменьшения площади орошения) и возможным подтоплением прилегающих территорий, руб; n – число повреждений на облицовке, шт.; τ_0 – срок службы облицовки, лет.

Разработанные и апробированные на тестовых расчетах методики были автоматизированы в виде 4-х программ для ЭВМ и зарегистрированы Роспатентом.

На рисунке 17 представлена структурная схема разработанной методики, которая позволяет производить расчеты по трем этапам: этап I – расчет эффективности облицовок по коэффициентам фильтрации для различных типов покрытий; этап II – расчет надежности (в том числе безотказной работы покрытия); этап III – производится выбор оптимального варианта конструкции противофильтрационного покрытия оросительного канала.

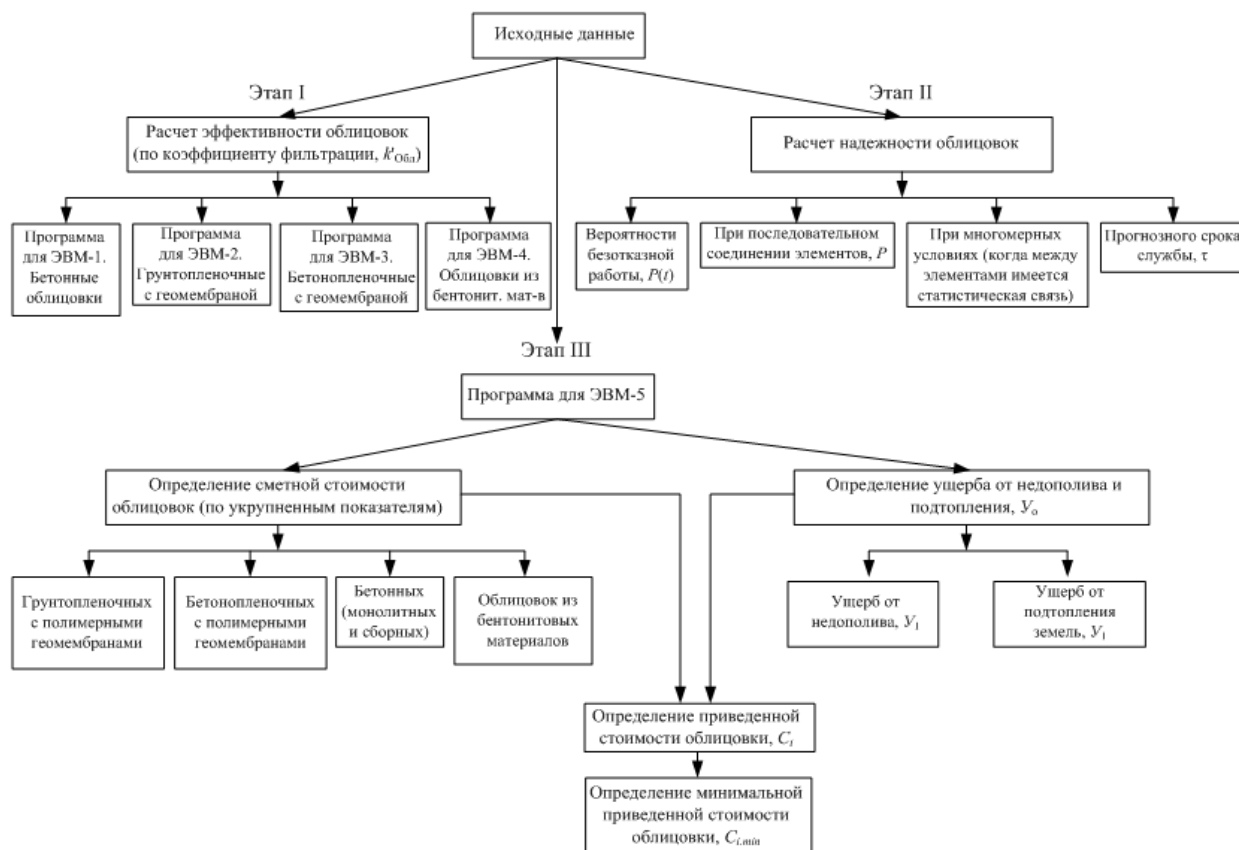
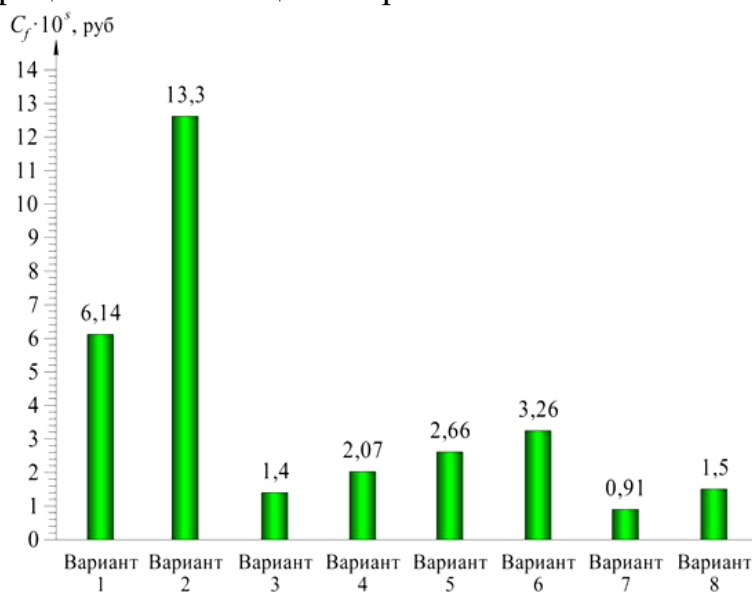


Рисунок 17 – Структурная схема расчетов эффективности и выбора оптимального варианта противофильтрационного покрытия канала

Кроме того, на последнем (III этапе) определяются ущербы от недополучения урожайности вследствие потерь воды на фильтрацию из оросительных каналов, а также при подтоплении сельскохозяйственных угодий.

Гистограмма расчетной стоимости различных вариантов противофильтрационных облицовок оросительных каналов приведена на рисунке 18.



1 – бетонная монолитная; 2 – бетонная и железобетонная сборная или сборно-монолитная; 3 – с геомембраной отечественного производства и защитным покрытием из грунта; 4 – с геомембраной зарубежного производства и защитным покрытием из грунта; 5 – с геомембраной отечественного производства и защитным покрытием из бетона; 6 – с геомембраной зарубежного производства и защитным покрытием из бетона; 7 – из бентонитовых материалов отечественного производства; 8 – из бентонитовых материалов зарубежного производства

Рисунок 18 – Гистограмма расчетной стоимости вариантов противофильтрационных облицовок каналов

Анализ результатов расчета экономической эффективности показал, что сравнительно невысокая приведенная стоимость получена для трех вариантов: грунтопленочной облицовки с геомембраной (варианты 3 и 4) и облицовки с геосинтетическим бентонитовым материалом (вариант 8). Наиболее высокая приведенная стоимость получена для двух вариантов с традиционными облицовками: бетонной монолитной (вариант 1), бетонной и железобетонной сборной или сборно-монолитной (вариант 2).

Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных в рамках диссертационного исследования конструкций противofильтрационных покрытий с применением геосинтетических материалов составил 3,95 млн руб., что подтверждается шестью актами внедрения в проектную практику.

С участием автора было разработано 12 нормативно-методических документов (СТО, технические условия, альбомы конструкций, рекомендации по применению и эксплуатации), в которых технически обосновывалось применение геосинтетических материалов в конструкциях противofильтрационных покрытий оросительных каналов и водоемов.

При непосредственном участии автора в 2021–2022 гг. разработаны «Каталог материалов и конструкций противofильтрационных облицовок каналов» и «Каталог ремонтных составов и технологий производства работ по ремонту бетонных облицовок оросительных каналов», которые были рассмотрены и одобрены на секции мелиорации НТС Минсельхоза России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный обзор отечественных и зарубежных исследований по вопросам применения противofильтрационных устройств на оросительных каналах позволил сделать выводы о том, что применяемые до настоящего времени облицовки из полимерных, бетонных и железобетонных материалов «морально» устарели, характеризуются значительными недостатками, а именно: относительно небольшим сроком службы (как правило, до 30–35 лет), сложностью производства работ по их устройству, повреждаемостью (особенно открытые пленочные экраны и с защитными покрытиями из грунта), растрескиванием и коррозией бетонных элементов. Установлено, что потери воды, используемой для орошения и обводнения, по-прежнему высоки, и составляют порядка 4,8 км³/год, наибольшие потери наблюдаются на участках каналов, выполненных в земляном русле и в сложных инженерных условиях (при наличии карсто-суффозионных явлений, на просадочных основаниях).

Проведенный анализ и обзор исследований позволяет сделать вывод, что в нашей стране недостаточно изученными остаются вопросы применения новых геосинтетических покрытий на оросительных каналах и условия их работы при повреждаемости и самозалечивании, разработки конструкций проти-

вофильтрационных облицовок каналов повышенной надежности для различных условий применения, развития методов оценки эффективности и долговечности покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов.

2. Основная цель предложенного нового подхода заключается в разработке и создании многослойных противофильтрационных покрытий с применением в качестве противофильтрационных устройств геосинтетических (полимерных) и бентонитовых материалов. Установлено, что применение на практике разработанных и усовершенствованных автором конструктивно-технических решений с использованием геосинтетических материалов позволит практически полностью исключить потери воды на фильтрацию на оросительных каналах и снизить негативное влияние вод на прилегающие территории.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что разработанные конструкции, по сравнению с аналогами, характеризуются повышенным сроком службы (прогнозный срок 61,3–75,7 лет), водонепроницаемостью (расчетный коэффициент фильтрации $1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-14}$ м/с) и самозалечиванием (регенерацией) при появлении дефектов (повреждений), образующихся в процессе строительства или эксплуатации облицовок каналов.

3. Для обеспечения повышенной противофильтрационной защиты на оросительных каналах, выполняемых в сложных инженерных условиях (при сезонной подпертой фильтрации и инфильтрации воды в канал), обоснована возможность применения новых разработанных автором конструкций из геосинтетических материалов с применением дренирующих элементов, обеспечивающих с одной стороны противофильтрационную защиту, с другой – отвод избыточных грунтовых вод через облицовку канала в весенне-осенний период. Установлена возможность применения геосинтетических материалов в конструкциях облицовок, выполняемых на просадочных основаниях, где рекомендованы к применению противофильтрационные покрытия, выполняемые с компенсаторами деформаций из геосинтетического бентонитового материала, защитным слоем из геотекстиля и пригрузочным покрытием из каменной наброски.

4. Теоретическими исследованиями водопроницаемости противофильтрационных покрытий при повреждаемости было установлено, что используемые ранее методики расчета нуждаются в совершенствовании применительно к условиям функционирования оросительных каналов, выполняемых с применением в качестве ПФУ геосинтетических бентонитовых материалов и многослойных конструкций с использованием полимерных геомембран. В гидромеханической постановке методами теории фильтрации получено решение задачи для двух фрагментов – в защитном слое грунта (методом конформных отображений) и в подстилающем основании (методом годографа скорости). Найдены расчетные зависимости, позволяющие определять основные характеристики водопроницаемости многослойных противофильтрационных экранов из полимерных геомембран при наличии системы повреждений (в виде щелей). Уста-

новлена применимость зависимости автора и других отечественных исследователей для определения суммарного расхода фильтрации через систему щелей в противофильтрационном экране из геомембраны.

Результаты численного моделирования (в программном комплексе «FreeFem++»), основанного на методе конечных элементов, позволили получить пространственную модель фильтрации через экран из геосинтетического материала, включающего 4 близкорасположенных повреждения, и установить их взаимовлияние при ширине повреждения от $m = 0,05$ м и более, на расстоянии 1 м и при напоре 0,5 м.

5. Разработанная модель осесимметричной фильтрации через дефект экрана из геомембраны позволяет получить более общее решение напорной фильтрации в защитном слое грунта с использованием интеграла Кристоффеля-Шварца и в основании экрана под дефектом с использованием метода годографа скорости в виде усеченного купола, ограниченного на значительной глубине горизонтальной плоскостью. По результатам выполненного расчетного сравнения с известными зависимостями установлено отклонение фильтрационного расхода по формуле 7,1 %, что объясняется рядом допущений при решении задачи фильтрации и не учетом в зависимостях некоторых отечественных исследователей пьезометрического напора в отверстии экрана. Для зависимостей, полученных зарубежными учеными (J. P. Giroud, N. Touze-Foltz и R. Rowe), установлены причины значительного занижения результатов расчета, заключающиеся в использовании авторами приближенных данных натуральных исследований.

6. Впервые решена задача водопроницаемости через дефект противофильтрационного покрытия из геосинтетического бентонитового материала (с учетом самозалечивания повреждения) для условий оросительных каналов. Для расчета водопроницаемости и самозалечивания единичных повреждений в покрытиях каналов, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов, сделан вывод о целесообразности использования метода последовательной смены стационарных состояний, когда нестационарный процесс фильтрации через единичное повреждение разбивается на ряд стационарных состояний за интервал времени Δt . По результатам были установлены: время и скорость самозалечивания круглых повреждений в зависимости от их диаметра, радиус изменения отверстия в экране от времени, фильтрационный расход для первоначального и последующего контуров изменения положения повреждения, фильтрационный расход за весь период самозалечивания для конкретных условий.

7. По результатам сравнительного анализа эффективности и надежности различных типов противофильтрационных покрытий оросительных каналов установлено, что наиболее эффективными являются покрытия из геосинтетических бентонитовых материалов по коэффициенту фильтрации, который, соответственно, в 50–25 раз меньше облицовки с полимерной геомембраной и защитным покрытием из грунта или бетона, и более, чем в $4 \cdot 10^6$ раз больше бетонной об-

лицовки. Кроме того, установлено, что противофильтрационные покрытия из геосинтетических бентонитовых материалов на оросительных каналах имеют наиболее высокую эксплуатационную надежность с вероятностью безотказной работы $P(t) \geq 0,90-0,98$.

8. Выполненные экспериментальные исследования геосинтетических бентонитовых материалов и конструкций облицовок каналов на лабораторном оборудовании (на относительное растяжение и удлинение под нагрузкой, продавливание бентонитового материала защитным покрытием из каменной наброски, коэффициенту фильтрации, индексу набухания и водоотдачи, стойкости к динамическим пробоям и др.) позволили установить причины изменения физико-механических характеристик противофильтрационных покрытий каналов, выполняемых из бентонитовых материалов. Так, применяемый в составе экрана суглинок в процессе эксплуатации перемешивался с бентонитом, что негативно сказывалось на его реологических характеристиках.

Проведенные исследования изменения коэффициента старения образцов геомембран из полиэтилена «HDPE» по относительному удлинению в испытательном бассейне позволили установить прогнозный срок службы противофильтрационной конструкции с защитным покрытием из грунта толщиной 0,5 м, составляющий $t = 83$ года. В то же время расчет по уравнению С. Аррениуса дал близкий результат и составил $t = 76,5$ лет.

9. Проведенные натурные исследования частично облицованных каналов с применением геосинтетических материалов (Донского магистрального, Пролетарского, Невинномысского, Аксыра и др.) позволили получить наиболее обобщенные данные по их техническому состоянию и деформациям покрытий. Для всех типов обследуемых облицовок каналов были установлены среднестатистические значения КПД и доверительные интервалы, составляющие для бетонной облицовки с геомембраной по КПД $\bar{\eta} = 0,938$, доверительному интервалу $\bar{\eta} = 0,956-0,982$. На основании проведенных исследований Донского магистрального канала с покрытием из геосинтетических бентонитовых материалов получена расчетная оценка эффективности облицовки для трех критериев, которая подтверждает высокую эффективность, по сравнению с земляным руслом, и составляет по критерию $N_1 = 5 \cdot 10^6$ раз, по эффективности с альтернативными вариантами $N_2 = 1 \cdot 10^4 - 8,3 \cdot 10^5$. Определено, что облицовка из геосинтетических бентонитовых материалов превышает все альтернативные варианты от $1 \cdot 10^4$ до $8,3 \cdot 10^5$ раз.

10. По результатам проведенной оценки экономической эффективности для восьми типов противофильтрационных покрытий каналов установлено, что минимальная приведенная стоимость для варианта облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов отечественного производства составляет 91 млн руб. на $10\,000 \text{ м}^2$. Сравнительно невысокая приведенная стоимость по-

лучена для трех вариантов – грунтопленочной облицовки с геомембраной отечественного и зарубежного производства и облицовки из бентонитовых материалов зарубежного производства. Остальные варианты облицовок: бетонная монолитная и железобетонная сборная из плит НПК (или сборно-монолитная), с полимерной геомембраной отечественного и зарубежного производства, и защитным покрытием из бетона имеют высокую приведенную стоимость.

11. С целью выбора оптимального варианта противofильтрационного покрытия канала разработана обобщенная методика, включающая расчеты эффективности, надежности и определения приведенной стоимости для восьми различных вариантов покрытий каналов (по четырем разработанным программам для ЭВМ). Методика выбора оптимального варианта основывается на минимуме целевой функции (приведенной стоимости различных типов облицовок), учитывающей первоначальную сметную стоимость покрытия, и ущерба от недополучения сельскохозяйственной продукции при орошении дополнительной площади сэкономленной водой и исключения подтопления. Использование данной методики в проектной практике позволит в автоматизированном режиме (задаваясь исходными данными) производить выбор оптимального противofильтрационного покрытия при строительстве или реконструкции оросительного канала.

Некоторые из разработанных конструктивных решений нашли применение на объектах водохозяйственного и природоохранного назначения, что подтверждается шестью актами внедрения с экономическим эффектом 3,95 млн руб. и одним актом внедрения результатов исследований в учебный процесс.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в разработке новых конструкций противofильтрационных и защитных покрытий каналов с применением композитных бетононаполняемых материалов, совершенствовании методов расчета водопроницаемости противofильтрационных облицовок с использованием многослойных геокомпозитных материалов с последующей разработкой типовых конструкций и их внедрением в проектную практику строительства, реконструкции и модернизации оросительных каналов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в журналах, рецензируемых ВАК

1. Баев, О. А. Гидромеханическое решение задачи водопроницаемости экрана нарушенной сплошности / О. А. Баев, Ю. М. Косиченко // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 4. – С. 3–11. DOI: 10.31857/S056852810000554-0.

2. Бакланова, Д. В. Расчетное исследование потерь воды из необлицованных каналов с учетом геолого-почвенных особенностей севера Калмыкии / Д. В. Бакланова, А. В. Колганов, О. А. Баев // Мелиорация и гидротехника. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 281–298. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-281-298.

3. Косиченко, Ю. М. Обоснование применения защитных прокладок из геотекстиля и оценка водопроницаемости противofильтрационных покрытий из геомембран / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник МГСУ. – 2015. – № 3. – С. 48–58.

4. Косиченко, Ю. М. Надежность применения дренажных геокмпозитных матов в гидромелиоративном строительстве / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2020. – № 1. – С. 14–19. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-14-20.

5. Баев, О. А. Расчеты установившейся свободной фильтрации из необлицованных каналов / О. А. Баев // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12. – № 3. – С. 227–243. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-227-243.

6. Косиченко, Ю. М. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 90–98. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.

7. Косиченко, Ю. М. Методы расчета водопроницаемости полимерных противofильтрационных экранов гидротехнических сооружений / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института имени Б. Е. Веденеева. – 2017. – Т. 286. – С. 10–21.

8. Ищенко, А. В. Оценка эффективности противofильтрационного экрана на Донском магистральном канале / А. В. Ищенко, О. А. Баев // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7. – № 4. – С. 67–72.

9. Косиченко, Ю. М. Выбор эффективной противofильтрационной облицовки каналов из традиционных и геосинтетических материалов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 10. – С. 19–25.

10. Косиченко, Ю. М. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник МГСУ. 2020. – Т. 15. – Вып. 8. – С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162.

11. Косиченко, Ю. М. Оценка комплексной реконструкции и модернизации оросительных систем / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 6–12. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-2-6-11.

12. Колганов, А. В. Результаты натурных исследований магистрального канала в Республике Калмыкия / А. В. Колганов, О. А. Баев, Д. В. Бакланова // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 108–114. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-108-114.

13. Косиченко, Ю. М. Обоснование эффективности Пролетарского магистрального канала при реконструкции / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 77–84. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-77-84.

14. Косиченко, Ю. М. Обоснование расчетных зависимостей фильтрационных сопротивлений конструкций облицовок каналов /

Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова, О. А. Баев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 278. – С. 35–46.

15. Косиченко, Ю. М. Оценка водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закоматированными швами при длительной эксплуатации каналов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ. – 2016. – № 7. – С. 113–133.

16. Баев О. А., Талалаева В. Ф. Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 177–191. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1285>. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191.

17. Косиченко, Ю. М. Многослойные конструкции противofiltrационных покрытий с бентонитовыми матами и оценка их сравнительной эффективности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 3. – С. 37–43.

18. Косиченко, Ю. М. Особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закоматированными швами с учетом проницаемости основания / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 5 (116). – С. 633–642. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.633-642.

19. Бакланова, Д. В. Оценка гидравлической шероховатости русла магистрального канала / Д. В. Бакланова, О. А. Баев // Природообустройство. – 2023. – № 1. – С. 76–81. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-76-81.

20. Косиченко, Ю. М. Расчет коэффициентов шероховатости русел каналов с неоднородными участками / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2020. – № 3. – С. 6–14. DOI: 10.26897/1997-6011-2020-3-6-14.

21. Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности конструкций противofiltrационных экранов из геокомпозигов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 275. – С. 68–77.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science

22. Baev, O. A. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect / O. A. Baev, Y. M. Kosichenko, V. F. Silchenko // Magazine of Civil Engineering. 2022. – 111 (3). – Art. No 11109. DOI: 10.34910/MCE.111.9.

23. Kosichenko, Y. M. Geo-composite drainage material for hydro-technical and civil engineering / Y. M. Kosichenko, O. A. Baev, S. M. Vasilyev // Solid State Phenomena. – 2021. – 316. – Pp. 1025–1030.

24. Masnyj, R. S Polymer and geocomposite impervious screen reliability assessment / R. S. Masnyj, S. M. Vasilev, O. A. Baev // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – 410. – Pp. 835–840. DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF.410.835.

25. Kosichenko, Yu. M. Efficiency and durability of the linings channels of geosynthetics / Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev // Magazine of civil engineering. 2020. – 96 (4). – Pp. 42–59. DOI: 10.18720/MCE.96.4.

26. Baev, O. A Composite polymer coatings for repair of concrete linings of channels / O. A. Baev, A. Y. Garbuz, Y. M. Kosichenko // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – Pp. 799–805. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.799.

27. Kosichenko, Y. M. Design of impervious coatings with enhanced reliability made from innovative materials / Y. M. Kosichenko, O. A. Baev // Procedia Engineering. – 2016. – 150. – Pp. 1503–1509. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.096.

28. Kosichenko, Yu. M. Water permeability of the polymer screen with a system of slits of hydraulic structures / Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev // Magazine of Civil Engineering. 2018. 83 (7). Pp. 148–164. DOI: 10.18720/MCE.83.14.

29. Vasilyev, S. M. New types of geo-composite materials for anti-filtration systems / S. M. Vasilyev, Y. M. Kosichenko, O. A. Baev // Solid state phenomena, 2021, 316 SPP. Pp. 1031–1037. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1031.

30. Kosichenko, Yu. M. Modified geomembrane compositions for hydraulic structure impervious coatings / Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev // Solid state phenomena. 2017. Vol. 265. Pp. 548–552. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.548.

Свидетельства, патенты и другие результаты интеллектуальной деятельности, зарегистрированные в установленном порядке

31. Пат. 2579482 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Комбинированный противofильтрационный экран / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. Заявка № 2014142662/13, заявл. 22.10.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. 8 с.

32. Пат. 2616801 Российская Федерация, МПК E02B 3/16, E02B 13/00. Способ определения фильтрационных потерь / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. Заявка № 2016112250; заявл. 31.03.16; опубл. 18.04.17, Бюл. № 11. 8 с.

33. Пат. 2644952 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Берегоукрепительное и противofильтрационное покрытие / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. Заявка № 2017118308, заявл. 25.05.2017; опубл. 15.02.2018, Бюл. № 5. 7 с.

34. Пат. 2662187 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ и устройство создания комбинированного противofильтрационного покрытия / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. Заявка № 2017117983, заявл. 23.05.2017; опубл. 24.07.2018, Бюл. № 21. 8 с.

35. Пат. 2675497 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ дренирования геокompозитных матов / Ищенко А. В., Баев О. А., Михайлов Е. Д.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Донской госуд. аграрный университет. Заявка № 2017104046, заявл. 07.02.2017; опубл. 19.12.2018, Бюл. № 35. 8 с.

36. Пат. 2718805 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Многослойное противofильтрационное покрытие с дренирующим элементом / Баев О. А.; заяв-

витель и патентообладатель Баев О. А. Заявка № 2019117682; заявл. 05.06.19; опубл. 14.04.20, Бюл. № 11. 10 с.

37. Пат. 2762413 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ дренирования облицовки канала / Косиченко Ю. М., Баев О. А., Чураев А. А.; заявитель и патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. Заявка № 2020137948, заявл. 18.11.2020; опубл. 21.12.2021, Бюл. № 36. 10 с.

38. Программа расчета водопроницаемости и надежности облицовки из геомембраны с защитным покрытием из бетона: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019619394 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБНУ «РосНИИПМ». Заявка № 2019618037; заявл. 02.07.2019; опубл. 16.07.2019. – 1 с.

39. Программа расчета водопроницаемости и надежности облицовки из геомембраны с защитным покрытием из грунта: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019660670 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБНУ «РосНИИПМ». Заявка № 2019619740; заявл. 05.08.2019; опубл. 09.08.2019. – 1 с.

40. Программа расчета эффективности противofильтрационных покрытий из бентонитовых матов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019660671 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБНУ «РосНИИПМ». Заявка № 2019619741; заявл. 05.08.2019; опубл. 09.08.2019. – 1 с.

41. Программа выбора оптимального варианта противofильтрационной облицовки канала: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020610563 / Васильев С. М., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Сильченко В. Ф., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБНУ «РосНИИПМ». Заявка № 2019667389; заявл. 26.12.2019; опубл. 16.01.2020. – 1 с.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях

42. Баев, О. А. Вопросы реконструкции крупных каналов и оценка их эффективности / О. А. Баев, Ю. М. Косиченко // Мелиорация и гидротехника. 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 287–301. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1250>. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-287-301.

43. Косиченко, Ю. М. Технология укладки бентонитовых матов на канале в сложных условиях производства работ / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. В. Ищенко // Мелиорация и гидротехника. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 270–283. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-270-283.

Гранты

Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№ МК-3304.2018.8).