

На правах рукописи

ЖУКОВА ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОМАТОВ С
РАЗНЫМ ТИПОМ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ
ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Ханов Нартмир Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
РАН, заведующий кафедрой гидротехнических
сооружений ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени
К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Баев Олег Андреевич**,
доктор технических наук, доцент, начальник
Гидротехнического отдела ФГБНУ «Российский
научно-исследовательский институт проблем
мелиорации»
Грицук Илья Игоревич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры технологий строительства и
конструкционных материалов ФГАОУ ВО
«Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы», инженерная академия
ФГБНУ «Федеральный научный центр
гидротехники и мелиорации имени А.Н.
Костякова»

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «09» декабря 2025 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.07 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19, учебный корпус № 28, аудитория 201, тел: 8(499)976–17–14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Берегоукрепление включает комплекс мероприятий по защите прибрежной линии водных объектов от разрушающего воздействия потока воды и волн, способствуя защите берегов от обрушения, эрозии и других негативных явлений.

Одним из направлений предотвращения негативного воздействия воды на берега водоемов и водотоков является использование возможности инженерных решений в виде укрепления откосов с помощью защитных материалов и покрытий на основе применения геосинтетических материалов, которые отличаются надежностью и долговечностью, положительным опытом использования в дорожном строительстве. В этой связи перспективным берегозащитным техническим решением могут служить геоматы, которые нашли свое применение в виде противоэрозионных покрытий. В тоже время, несмотря на наличие нормативной базы и рекомендаций по применению геосинтетических покрытий в дорожном хозяйстве, использование геоматов для укрепления откосов каналов требует научного обоснования и исследования.

Учитывая значительную протяженность речной сети в России, а также то, что только протяженность крупных судоходных и мелиоративных каналов составляет более 10 тысяч километров, тема диссертационного исследования является актуальной.

Степень разработанности темы исследований. Результаты разработки и исследования технических решений для защиты берегов и откосов каналов от разрушающего воздействия водного потока, включая возможности современных геосинтетических материалов, изложены в работах отечественных и зарубежных ученых: И.И. Леви, В.Н. Гончаров, М.А. Великанов, В.С. Боровков, Д.И. Кумин, М.М. Овчинников, П.К. Божич, Ю.М. Косиченко, И.С. Румянцев, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, О.А. Баев, К.Д. Козлов, Е.В. Баранов, А.В. Еремеев, M.B. Abbott, J.M Bartolome, R.M. Khatsuria и др.

Вместе с тем, результаты анализа научной литературы показали, что конструкции защитных покрытий откосов гидротехнических сооружений на основе использования геоматов с различными вариантами заполнителя требуют комплексного исследования и оценки.

Объект исследований. Объектом исследования являлись защитные покрытия, применяемые в гидротехническом строительстве, геоматы двух вариантов: с заполнителем из щебня и щебня с посевом многолетних трав.

Цель исследований. Целью диссертационной работы является гидравлические исследования и обоснование применения защитных покрытий откосов гидротехнических сооружений и водных объектов на основе геоматов с

различным заполнением.

Задачи исследования:

- анализ опыта использования геосинтетических материалов в строительстве и результатов исследований условий движения потока в руслах с покрытием из геосинтетических материалов;
- разработать лабораторно-инструментальную базу и методику комплексных экспериментальных исследований по изучению движения потока в пределах исследуемых защитных покрытий из геоматов;
- обосновать варианты использования геосинтетического защитного покрытия, состоящего из геомата с заполнителем из щебня и комбинации щебня с посевом многолетних трав рода райграс;
- выполнить гидравлические исследования по оценке коэффициентов шероховатости материалов и пульсационных характеристик потока в пределах исследуемых защитных покрытий при различных значениях уклона русла и расхода потока;
- изучить закономерности фильтрации в пределах защитного покрытия из геомата с заполнителем из щебня, величину коэффициента фильтрации;
- установить закономерности сопротивления сдвигу по контакту подошвы геомата с грунтом откоса в насыщенном и ненасыщенном водой состоянии, коэффициенты трения защитного покрытия геомата с заполнителем из щебня.

Научная новизна работы:

- конструкции и результаты экспериментальных исследований закономерностей движения потока в пределах участка исследуемых защитных покрытий откосов канала из геоматов в условиях проектных параметров потока;
- значения коэффициентов шероховатости исследуемых защитных покрытий при разных уклонах русла и расходах потока;
- результаты оценки пульсационных характеристик, возникающих вследствие изменения давления при обтекании потоком элементов защитного покрытия геомата с заполнителем из щебня;
- значения коэффициентов фильтрации в пределах исследуемого защитного покрытия из геомата с заполнителем из щебня и параметров уклона русла и расхода потока;
- закономерности сопротивления сдвигу по контакту подошвы геомата с грунтом откоса в насыщенном и ненасыщенном состоянии, коэффициенты трения защитного покрытия геомата с заполнителем из щебня.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты позволяют выполнять расчет и обоснование параметров защитных

покрытий откосов водных объектов на основе геоматов с вариантами заполнителя из щебня и щебня с посевом многолетних трав рода райграс для использования в гидротехническом строительстве. Использование исследованных защитных покрытий является современной альтернативой традиционным материалам, придавая откосу естественный природный вид, обеспечивая защитные функции, а благодаря посеву многолетних трав дополнительную экологическую функцию крепления. Рекомендации по использованию защитных покрытий откосов водных объектов на основе геоматов приняты к внедрению в практику проектирования Научно-производственной фирмой «Берег», которая занимается разработкой проектов по строительству и реконструкции берегоукрепительных сооружений на малых реках, в том числе проекта «Реконструкция берегоукрепительных сооружений р. Нальчик по защите г. Нальчика». Предварительные расчеты показывают, что при использовании предлагаемых геоматов для крепления откосов защитных дамб выше подпорных стен, возможный экономический эффект составляет более 300 тыс. рублей на 1 км длины дамбы.

Методология и методы исследования. В качестве основного подхода при изучении объекта исследований принят лабораторный эксперимент, работы выполнялись на трех экспериментальных установках: гидравлическом лотке, фильтрационном приборе Дарси и сдвиговом лотке. Расчеты при обработке экспериментальных данных выполнялись на основе существующих теорий и методик гидравлики и гидротехники.

Личный вклад автора. Результаты исследований получены автором лично: разработан план исследований; запроектированы и изготовлены экспериментальные установки двух вариантов защитных покрытий: геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс; выполнены экспериментальные исследования; проведена обработка данных, оценка результатов и сформулированы выводы по работе.

Положения, выносимые на защиту:

- варианты геосинтетического защитного покрытия, состоящего из геомата с заполнителем из щебня и комбинации щебня с посевом многолетних трав рода райграс;
- результаты гидравлических исследований параметров шероховатости и пульсации потока на элементы защитного покрытия из геомата в пределах исследуемого участка;
- результаты фильтрационных исследований материалов покрытий геомата с заполнителем из щебня;

– результаты исследований по оценке сопротивления сдвигу по контакту подошвы геомата с грунтом откоса в насыщенном и ненасыщенном состоянии.

Степень достоверности результатов. Достоверность основных положений, результатов и выводов обеспечивается использованием общепринятых методик проведения лабораторных исследований, большим количеством опытных данных, полученных с использованием тестированных приборов и оборудования. При анализе опытных данных использовались современные методы обработки результатов экспериментов, полученные результаты сопоставлялись с данными других авторов и проектными решениями. При проведении исследований использовались нормативные документы в области строительства.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований, докладывались на заседаниях кафедры гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, а также на научных конференциях и семинарах: Всероссийской конференции молодых исследователей. Аграрная наука – 2022 г.; Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова 2022 г.; X-ой международной научно-практической конференции. Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях. Саратов, 2023 г.; Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. Москва, 2023 г.; Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича. Москва, 2024 г.; VII-ой всероссийской научно-практической конференции. Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук. Брянск, 2024 г.; IV-ой международной научно-методической конференции. Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики. Самара–Оренбург, 2024 г.; Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова. Мелиорация и водное хозяйство – основа продовольственной и экологической безопасности. Москва 2024 г.; 10-ой всероссийской национальной научно-практической конференции. Проблемы развития современного общества. Курск, 2025 г.

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня, рекомендованного ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 127 страниц машинописного текста и имеет введение, четыре главы, заключение, список

литературы и приложения. В диссертацию также входят 48 рисунков, 23 таблицы, список литературных источников из 121 наименований, из которых 4 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, описана теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, обоснована степень достоверности результатов, приведены результаты апробации, структура и объем работы.

В первой главе диссертационной работы обобщены сведения о современных геосинтетических материалах и их применении в гидротехническом строительстве, анализируются их свойства и характеристики, условия и особенности применения в строительстве. Особое внимание уделено анализу использования современных геосинтетических материалов с применением растительности для защиты от водной эрозии, приведены характеристики покрытий с применением посева трав, геомата и геомата с посевом трав. Отмечено, что основными особенностями применения геомата с растительностью является не только эффективная защита грунта, но и идеальное сочетание с естественным ландшафтом, кроме того использование растительности стимулирует развитие флоры и фауны и является менее затратным.

Представлены основные результаты анализа работ ученых, посвященных изучению влияния растительности на сопротивление движению водного потока, приведены данные о допускаемых (неразмывающих) скоростях потока для грунтов с различным травопокрытием. Анализ условий движения потока в руслах с покрытием из геосинтетических материалов свидетельствует о влиянии материала на гидравлические сопротивления русел, а растительность может рассматриваться как одна из разновидностей поверхностной шероховатости. Вместе с тем использование геомата в комбинации с закреплением растительного покрова изучено недостаточно, и учитывая защитные свойства геомата, требует всесторонней оценки.

В главе обоснована необходимость изучения возможностей геомата, как защитного покрытия откосов водных объектов, с заполнителем из щебня в комбинации с многолетним растительным покровом, в качестве которого рассматривается райграс, как одно из быстроразвивающихся растений, формирующее разветвленную корневую систему и прочную дернину.

Во второй главе рассмотрены условия и методика проведения комплекса

лабораторных исследований, сформулированы цели, задачи и особенности проведения экспериментов, дано описание экспериментальных установок, измерительных приборов и оборудования, дана оценка точности измерений.

К исследованию были приняты две конструктивные схемы покрытия: геомат с заполнителем в виде щебня; геомат с заполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав родом райграс.

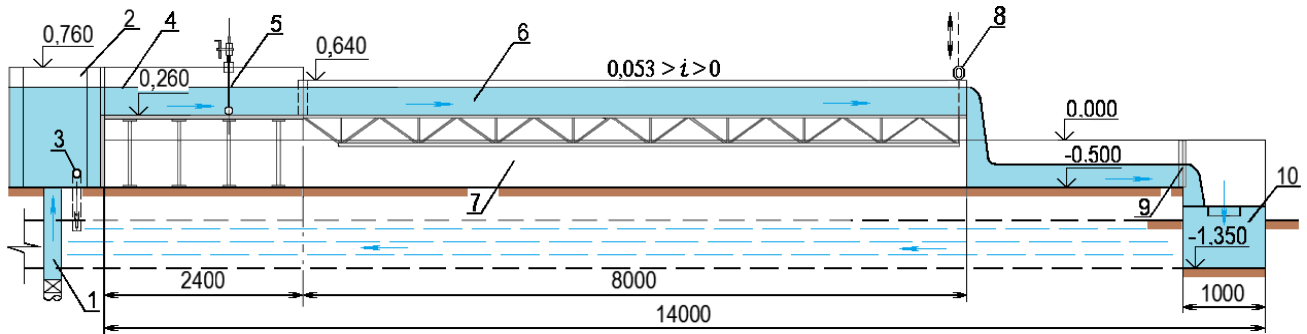
Исследования выполнялись в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева с использованием гидравлического лотка и фрагмента канала с заданными параметрами потока, модифицированный прибор Дарси и сдвиговой лоток, в котором моделируется основание сооружения.

Для оценки конструкции геомата изучался гранулометрический состав заполнителя, щебня с фракцией от 6 до 10 мм, с использованием ситового метода, в результате которой получены зависимости полных остатков щебня на стандартных ситах. На следующем этапе исследовался растительный покров геомата, а именно подбор смеси многолетних трав, по показателям формирования травостоя с оценкой дальнейшего применения в опытах. Выбор семян базировался на рекомендациях ОДМ 218.2.064 – 2015 «Методы укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог засевом трав в различных климатических зонах». В эксперименте использовались четыре образца разнообразных трав: № 1 – рода райграс; № 2 – смеси, включающей: райграс пастбищный (50%), овсяница красная (15%), овсяница луговая (20%), тимopheевка луговая (15%); № 3 – вида овсяница красная; № 4 – мятлик луговой. По результатам сопоставления высоты травы и оценки корневой системы образцов, сформировавшихся за 18 дней вегетационного периода, к дальнейшим исследованиям была принята трава рода райграс (образец №1).

Для определения гидравлических характеристик потока использовалась экспериментальная установка в виде гидравлического лотка, в котором размещался фрагмент канала трапецеидального сечения с рабочим участком длиной 4,9 м. Установка позволяла изменять уклон водотока до значений $i = 0,053$, а также заложения откоса и расхода поступающей воды. Конструктивный разрез экспериментальной установки показан на рисунке 1.

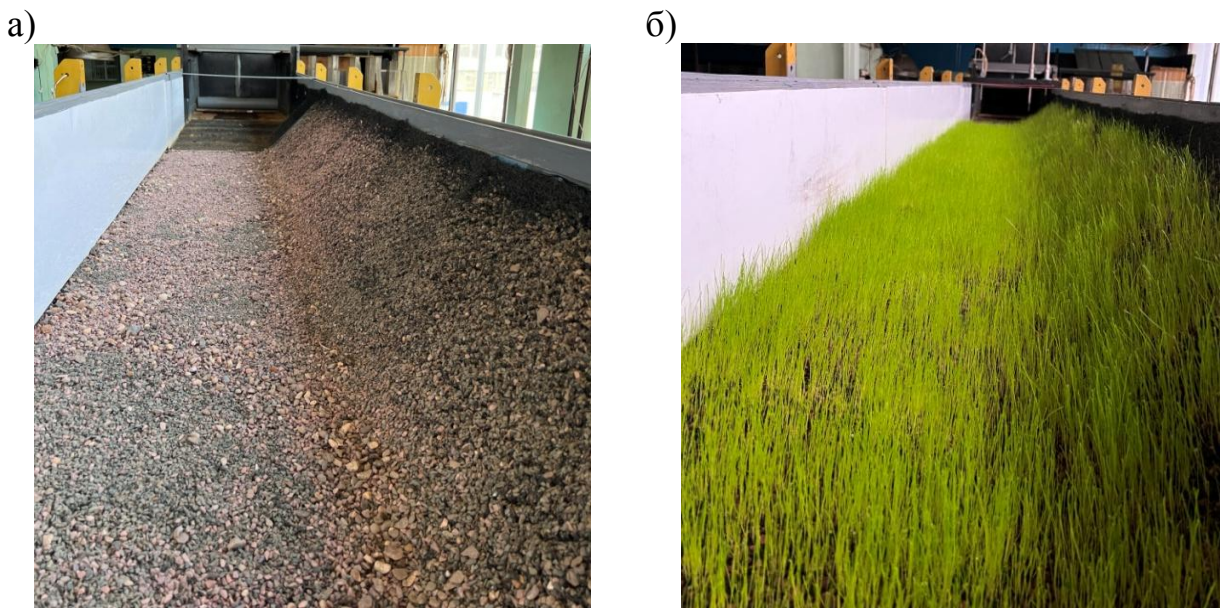
Правый борт фрагмента канала был вертикальным, левый в виде откоса с заложением $m = 1$, соответствовал половине реального трапецеидального сечения. Как показано на рисунке 2, на дно и левый борт рабочего участка укладывался противозерозионный материал геомат с заполнителем из щебня и геомат с заполнителем из щебня с посевом травы рода райграс. Вертикальный

борт покрывался листами гладкой пластмассы для уменьшения сил трения и влияния неровности борта на структуру потока.



1 – питающий трубопровод, 2 – приёмный бак, 3 – сливной трубопровод, 4 – подводящий лоток, 5 – затвор (регулятор расхода), 6 – модель канала, 7 – общий водосбросной лоток, 8 – подъёмная система рабочего лотка, 9 – жалюзийный затвор, 10 – отводящий лоток

Рисунок 1 – Конструктивный разрез экспериментальной установки



а – с заполнителем из щебня, б – щебнем с посевом многолетних трав рода райграс

Рисунок 2 – Противозерозийный материал геоматов

Замеры скоростей потока выполнялись в пяти поперечных створах, от начала рабочего участка, расположенных на расстояниях 210, 307, 407, 507 и 636 см, с помощью трубки Пито диаметром 3 мм, в сечениях на 11 вертикалях в шести точках (рисунок 3). Глубина потока на вертикалях измерялась с использованием шпитценмасштаба.

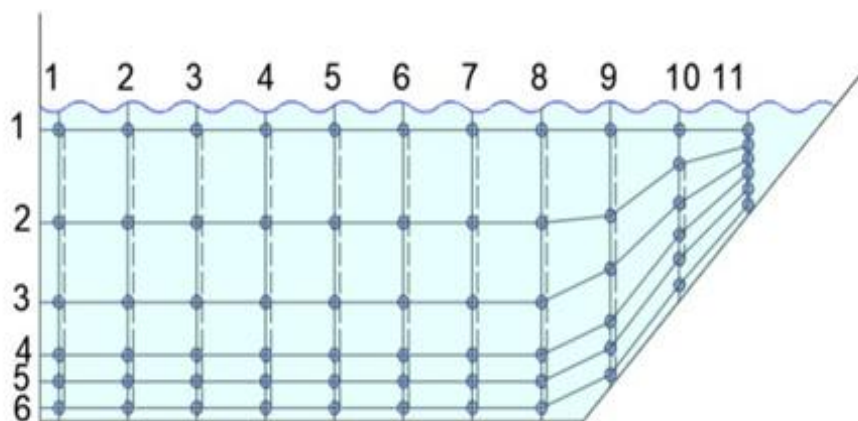


Рисунок 3 – Схема створов и точек измерения скоростей потока

Исследования геомата с заполнителем из щебня, исходя из условий движения частиц щебня по дну, проводились при четырех значениях уклона, равных $i = 0,001$, $i = 0,0087$, $i = 0,010$, и $i = 0,017$ и трёх значениях расхода $Q = 43,7$ л/с, $Q = 84,33$ л/с, $Q = 128,03$ л/с.

Для исследований геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс, уклоны и расходы воды были приняты в соответствии с высотой растительности $h_{раст} = 50, 100$ и 150 мм, изменяющейся в процессе развития. Опыты проводились при трех значениях уклонах лотка $i = 0,010$, $i = 0,017$ и $i = 0,03$ и расходах $Q = 43,7$ л/с, $Q = 84,33$ л/с, $Q = 128,03$ л/с.

Оценка влияния пульсаций водного потока на покрытие канала из геомата с заполнителем из щебня, проводилась с использованием датчиков давления ДД–10, прошедших тарировку на стенде в условиях эксперимента. Для оцифровки сигналов, поступающих от датчиков, отображения данных на компьютере использовался цифровой запоминающий осциллограф АСК–3107.

Для оценки фильтрационных характеристик материала, использовался модифицированный прибор Дарси, представленный на рисунке 4.

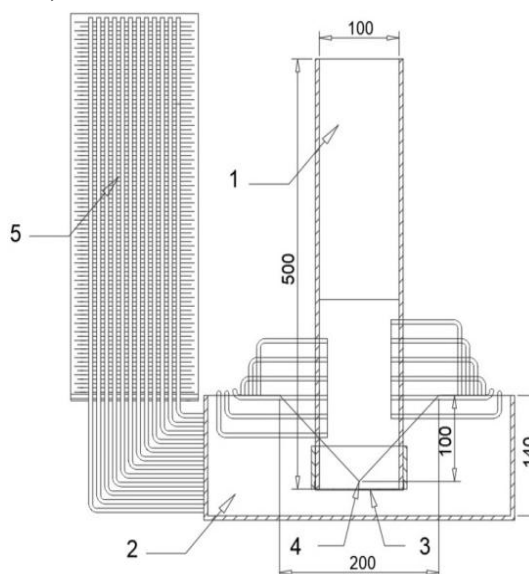
Исследуемый материал геомата с заполнителем из щебня распиливался на образцы размером 100×100 мм, соответствующие внутреннему размеру фильтрационной колонны прибора Дарси. С помощью показаний соответствующих пьезометров, измеряющих давление воды внутри и между слоями материала, определялись потери напора по длине фильтрующегося потока.

Экспериментальная установка для оценки коэффициента трения геомата с заполнителем из щебня, содержит контейнер, который заполняется грунтом, на который фиксируется сдвиговая пластина, показанная на рисунке 5.

а)



б)



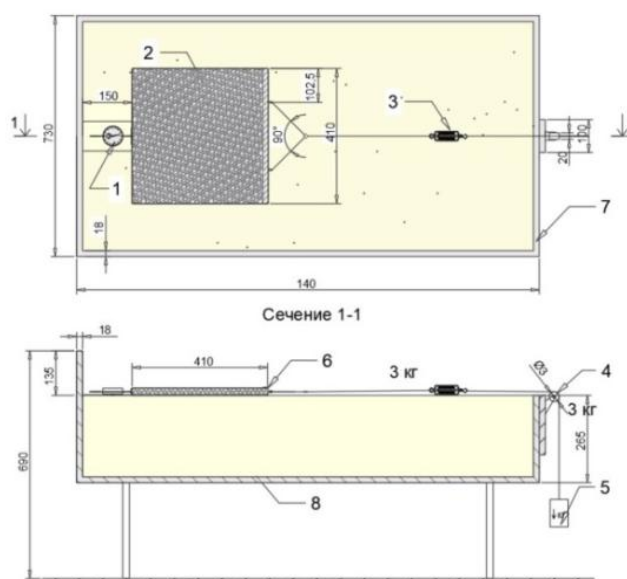
а – вид прибора, б – схема прибора: 1 – колонна для исследования фильтрации, 2 – резервуар, 3 – сетка, 4 – мерный водослив, 5 – пьезометрический щит

Рисунок 4 – Вид и схема прибора для определения параметров фильтрационного потока при исследовании геомата

а)



б)



а – вид установки, б – схема установки: 1 – индикатор часового типа, 2 – исследуемый образец покрытия, 3 – измеритель-динамометр, 4 – блок для крепления груза, 5 – пригрузка, 6 – пластина для фиксации, 7 – контейнер, 8 – грунт песок

Рисунок 5 – Вид и схема установки для оценки сопротивления сдвигу подошвы покрытия по контакту с грунтовым основанием

Фиксация начальных перемещений определялась с помощью индикатора часового типа, для создания вертикального усилия использовалось нагрузочное устройство. Для определения влияния напряжений в подошве образца на коэффициент трения использовался пригруз в виде грунта, равномерно распределённого на поверхности пластины. При проведении исследований в водонасыщенном состоянии в контейнер производилась подача воды, внутренние стенки контейнера были герметизированы.

В третьей главе представлены результаты гидравлических исследований геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс.

Расчёт коэффициента шероховатости n выполнялся по известным в гидравлике формулам, преобразованным к условиям экспериментов:

$$\text{Гангиле–Куттера} \quad n_{г-к} = \frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - V \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot V} + \sqrt{\left(\frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - V \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot V} \right)^2 + \frac{R \cdot \sqrt{J}}{23 \cdot V}}. \quad (1)$$

$$\text{Маннинга} \quad n_m = \frac{R^{2/3} \cdot \sqrt{J}}{V}. \quad (2)$$

$$\text{Павловского} \quad n_{п} = \frac{R^{0,37+2,5 \cdot \sqrt{n}-0,75 \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n}-0,1)}}{V} \cdot \sqrt{J}. \quad (3)$$

где: R – гидравлический радиус; V – скорость потока; J – гидравлический уклон.

Поскольку в экспериментах по определению коэффициента шероховатости для данных противоэрозионных покрытий экспериментальная установка имела правую вертикальную стенку, то коэффициент шероховатости для нее был принят равным $n_{пл} = 0,009$ как для поверхностей, покрытых эмалью или глазурью. Для расчёта коэффициента шероховатости исследуемых противоэрозионных покрытий использовалась следующая зависимость, учитывающая разные участки смоченного периметра с различной шероховатостью, по которой среднее значение коэффициента шероховатости $n_{ср}$ определялся по зависимости:

$$n_{ср} = \frac{n_n \cdot \chi_n + n_{пл} \cdot \chi_{пл}}{b + (1 + \sqrt{m^2 + 1}) \cdot h_{ср}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) получена зависимость для определения истинного значения коэффициента шероховатости n_n исследуемого материала:

$$n_n = \frac{n_{ср} \cdot b + n_{ср} (1 + \sqrt{m^2 + 1}) \cdot h_{ср} - n_{пл} \cdot h_{ср}}{b + \sqrt{m^2 + 1} \cdot h_{ср}}. \quad (5)$$

Результаты расчёта коэффициента шероховатости покрытия русла канала из геомата с заполнителем из щебня, с учётом полученных в опытах кинематических характеристик потока, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Итоговые результаты расчёта коэффициента шероховатости n

Параметр	$\sum n$	$n_{\text{ср}}$	n_{min}	n_{max}	$n_{\text{min}}/n_{\text{max}}$	$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{\text{ср}}}\right)^2}{10}} \%$	$\left(1 - \frac{n_{\text{Г.К}}}{n}\right) \cdot 100\%$
$n_{\text{Г-К}}$	2,086	0,0226	0,0221	0,0255	0,866	2,519	—
$n_{\text{М}}$	2,109	0,0237	0,0222	0,0259	0,857	2,645	7
$n_{\text{П}}$	2,102	0,0229	0,0224	0,0257	0,871	2,487	3,5

После сопоставления с известными литературными источниками для разных видов покрытий каналов и результатами проведенных ранее исследований покрытий с геоматами различной типологии, в результате пересчета всех значений коэффициентов шероховатости были получены значения n защитного покрытия, состоящего из геомата с заполнителем из щебня.

Сравнив среднеквадратические отклонения значений коэффициента шероховатости, рассчитанного по трём формулам, получим, что формула Маннинга дает наибольшее значение среднеквадратического отклонения, которое составляет 2,6%, что при гидравлическом расчёте каналов приведет к завышению его пропускной способности.

Для каналов, работающих в исследованном диапазоне основных параметров (расхода, глубины, уклона дна и энергетических показатели), для данной конструктивной схемы противоэрозионного покрытия при проектировании рекомендуется принимать значение $n = 0,0237$, рассчитанное по формуле Маннинга. Полученный коэффициент шероховатости для покрытия геомата с заполнителем из щебня сопоставим с коэффициентом шероховатости таких поверхностей, как гравелистое русло. Большее значение коэффициента шероховатости из представленной таблицы 1, позволяет оценивать пропускную способность каналов с определенным запасом.

Исследования геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс выполнялись с учётом изменяющейся высоты растительности в течение вегетационного периода и принятых значениях уклонов и расходов воды в канале, по методике предыдущих опытов (рисунок 6).

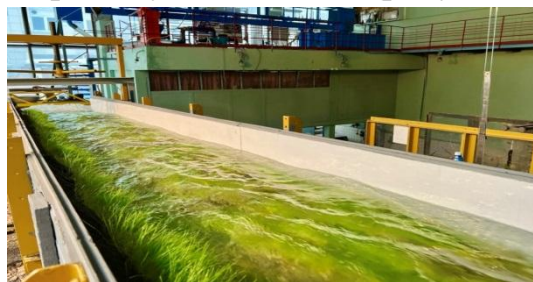


Рисунок 6 – Русло опытного участка канала с покрытием геоматом с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс

Результаты расчёта коэффициента шероховатости с учётом всех расчётных значений крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Итоговые результаты расчёта коэффициента шероховатости n

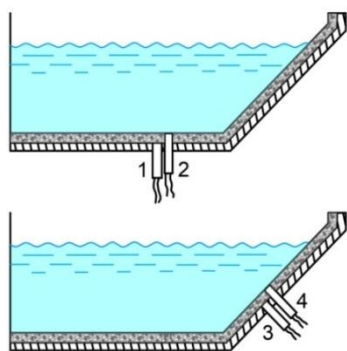
Параметр	$\sum n$	$n_{\text{ср}}$	n_{min}	n_{max}	$n_{\text{min}}/n_{\text{max}}$	$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{\text{ср}}}\right)^2}{10}} \%$	$\left(1 - \frac{n_{\text{г.к}}}{n}\right) \cdot 100\%$
$n_{\text{г-к}}$	3,983	0,0282	0,0279	0,0288	0,9687	2,931	-
$n_{\text{м}}$	4,519	0,0301	0,0289	0,0306	0,9444	3,145	7,9
$n_{\text{п}}$	4,375	0,0287	0,0290	0,0298	0,9731	2,875	5,4

Сравнение среднеквадратических отклонений значений коэффициента шероховатости рассчитанного по трём формулам получено, что по формуле Маннинга наибольшее среднеквадратичное отклонение составило 3,1 %. Значения коэффициента шероховатости, рассчитанные по формуле Гангилье–Куттера, ниже значений, рассчитанных по другим формулам.

Исходя из полученных результатов расчётов коэффициента шероховатости n для покрытия геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс при разных расходах и уклонах дна лотка, можно рекомендовать значение $n = 0,0301$ рассчитанное по формуле Маннинга. Полученный коэффициент шероховатости для покрытия геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс сопоставим с коэффициентом шероховатости для каналов со значительным зарастанием русла.

Экспериментальные исследования пульсационных характеристик проводились в одном створе рабочего участка, чтобы избежать влияния разных характеристик потока и получении одинаковых параметров потока. Исследования влияния пульсационных характеристик потока на покрытие выполнялись при расходах $Q = 43,7$ л/с, $Q = 84,33$ л/с и $Q = 128,03$ л/с, уклон дна оставался неизменным и равным $i = 0,0087$.

В исследованиях всего было выполнено 4 серии опытов. Датчик находился под исследуемым противоэрозионным покрытием в первых двух сериях опытов и на одном уровне с исследуемым противоэрозионным покрытием в третьей и четвёртой серии опытов, в покрытии место расположения датчика оставалось неизменным. Расположение датчиков показано на рисунке 7. По результатам опытов была построена зависимость гидродинамического давления от расхода, представленная на рисунке 8.



1 – на дне под покрытием,
2 – на дне на одном уровне
с покрытием; 3 – на откосе
под покрытием; 4– на
откосе на одном уровне с
покрытием
Рисунок 7 – Схема
расположения датчиков

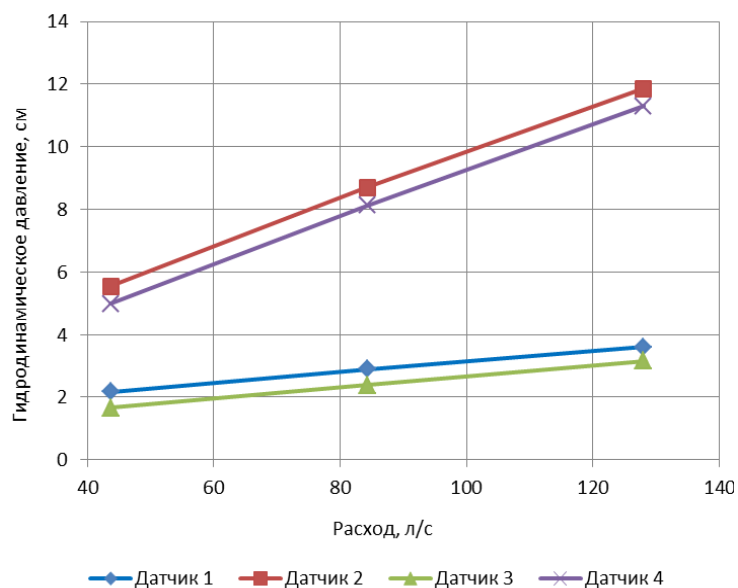


Рисунок 8 – Зависимость гидродинамического давления от расхода на откосе

Из приведенных данных видно, что значения гидродинамического давления, полученные с датчика, расположенные на одном уровне с поверхностью защитного покрытия было больше, чем с датчиков расположенных под покрытием. Таким образом, исследования показали, что водный поток оказывает дополнительное пригрузочное гидродинамическое давление на исследуемое покрытие, при этом в диапазоне исследованных расходов отсутствует опасность возникновения недопустимого пульсационного давления потока на нижнюю часть поверхности покрытия и угроза разрушения русла канала.

Анализ разрезов покрытия геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс по итогам экспериментальных исследований показал, что каких-либо деформаций уложенного растительного грунта после серии проведенных экспериментов покрытия миксированного крепления и основания под ним обнаружено не было по сравнению с началом проведения серии опытов.

В четвертой главе представлена оценка фильтрационных характеристик покрытия и сопротивления трению на контакте геомата с заполнителем из щебня.

При проведении фильтрационных исследований лабораторным экспериментом определялся коэффициент фильтрации, который основан на исследовании скорости потока воды, проходящего через исследуемый образец. Для получения фильтрационных характеристик применялся прибор Дарси. В прибор было уложено 8 слоёв исследуемого материала, выходное сечение

фильтрационной колонны находилось ниже поверхности воды в водоотводящем резервуаре для нахождения характеристик напорной фильтрации. Экспериментальный материал для нахождения свободной фильтрации находился выше поверхности воды, на некотором расстоянии для того чтобы, профильтровавшаяся вода свободно проникала в водоотводящий резервуар. Было выполнено по восемь серий замеров, при максимально возможном и минимальном напоре над исследуемым противоэрозийным материалом для нахождения фильтрационных характеристик для напорного и свободного режима фильтрации.

Расход профильтровавшейся воды определялся по зависимости:

$$Q = 14 \cdot h^{2,5}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (6)$$

Скорость фильтрации определялась по формуле:

$$V_{\phi} = \frac{Q}{\omega}, \text{ см/с} \quad (7)$$

Коэффициент фильтрации определялся по формуле:

$$k = \frac{V_{\phi}}{J}. \quad (8)$$

Пьезометрический уклон рассчитывался по зависимости:

$$J_{i,i+1} = \frac{H}{l_{i,i+1}} = \frac{H_i - H_{i+1}}{l_{i,i+1}}. \quad (9)$$

Определялись потери напора по длине фильтрационного потока, с помощью показаний соответствующих пьезометров, которые показывали давление внутри и между слоями исследуемого материала. Для напорной и свободной фильтрации строились зависимости пьезометрического напора, по отношению к длине пути фильтрации, по показаниям, которые были получены с пьезометров. Находились расход и скорость профильтровавшейся воды через слои материала, в зависимости от напора, которые были получены на треугольном водосливе с вертикальной тонкой стенкой. Рассчитывалось по 10 значений коэффициентов фильтрации для каждого напора. Для каждого режима фильтрации было получено всего по 80 значений коэффициентов фильтрации. Строилась зависимость коэффициента фильтрации от длины пути фильтрации для расчётного напора, определялся средний коэффициент фильтрации для каждого напора. Затем были построены графики зависимости средних значений коэффициента фильтрации от напора над исследуемым материалом, представленные на рисунке 9.

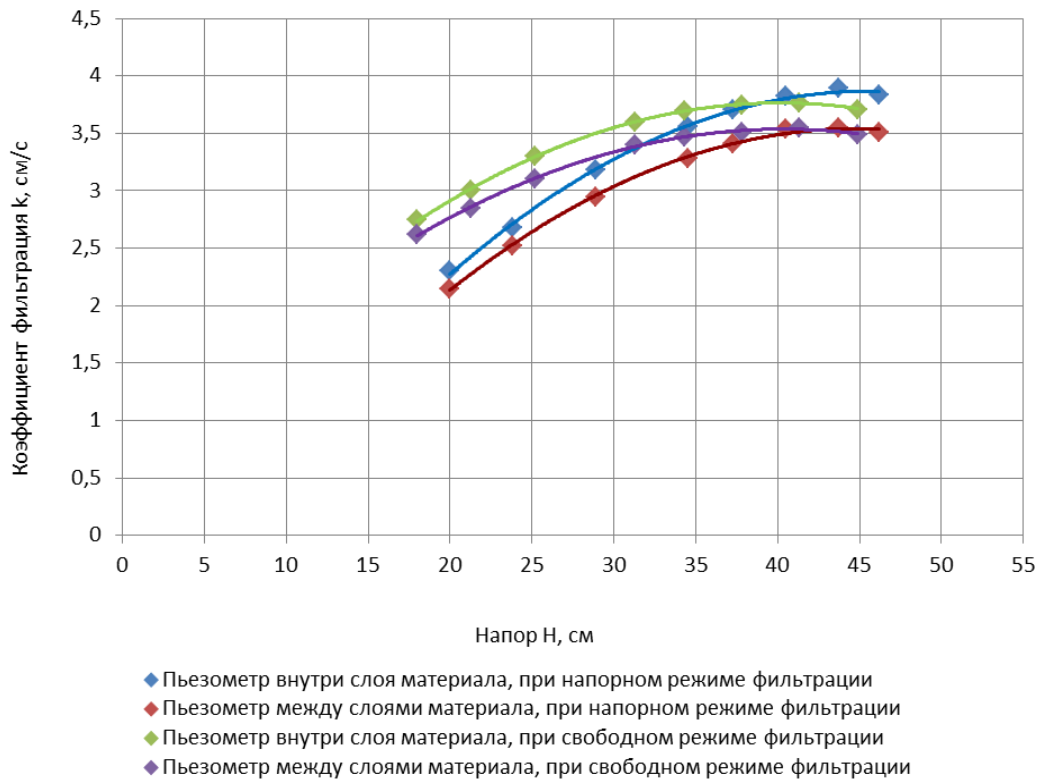


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента фильтрации k от напора H над исследуемым материалом

При малых напорах, показанных на рисунке 9, коэффициент фильтрации меньше, с уменьшением расхода фильтрация через исследуемые образцы материала осуществляется не по всей площади, а по участкам с минимальными гидравлическими сопротивлениями. Этот процесс происходит с появлением на нижнем слое участков, свободных от фильтрационного потока. При итоговом расчёте, при определении коэффициентов фильтрации, результаты этих экспериментов не учитываются, чтобы исключить появление ошибки. На основании анализа проведённых экспериментов по изучению коэффициента фильтрации для противоэрозионного покрытия, состоящего из геомата с заполнителем из щебня, можно рекомендовать к использованию коэффициент фильтрации для напорного режима $k_{\phi} = 3,24$ см/с, а для свободного режима $k_{\phi} = 3,35$ см/с.

Определение параметров трения выполнялось на экспериментальной установке для определения характеристик трения. Установка для нахождения коэффициента трения содержит контейнер, который заполняется грунтом, на который фиксируется сдвиговая пластина. В качестве основания был принят однородный песчаный грунт средней крупности с диаметром $d_{50} = 0,2$ мм. Исследования проводились в две серии для изучения трения при разных условиях расположения покрытия. Первая серия опытов проводилась с песчаным грунтом в ненасыщенном водой состоянии. Вторая серия опытов

проводилась с песчаным грунтом в насыщенном водой состоянии.

Был вырезан образец геомата с заполнителем из щебня, для исследования характеристик сдвиговых усилий. Размещался образец на грунте в контейнере установки. Экспериментальный образец пригружался для нахождения влияния напряжений в подошве образца на коэффициент трения. В опытах применялись пригрузки из песчаного грунта, пригрузки равномерно распределялись по всей поверхности покрытия. Масса пригрузов была: 3, 6 и 10 кг. По контуру стенки из органического стекла применялась непроницаемая прослойка из полиэтиленовой плёнки, чтобы исключить выпадения грунта или попадания под образец.

Эксперимент выполнялся с песчаным грунтом в ненасыщенном водой состоянии, для нахождения сопротивления сдвигу при расположении защитного покрытия на откосе выше уровня воды. Был засыпан сухой песчаный грунт в контейнер установки для проведения исследования. В первом эксперименте полотно геомата укладывалось на грунт без пригруза. Затем определялись начальные показания всех измерительных приборов установки полотна. Далее происходило плавное увеличение сдвигающей горизонтальной нагрузки. Определялись показания всех измерительных приборов при каждом увеличении нагрузки, а также после их стабилизации.

Проводилось подобным же образом исследование для определения сопротивления сдвиговых усилий с песчаным грунтом в насыщенном водой состоянии. Сухой песчаный грунт, перед началом проведения исследования наполнялся водой, который находился в контейнере установке для исследования. Значение весовой влажности грунта составило 19,37 % при проведении данных исследований.

После проведения экспериментов, по полученным данным строились кривые зависимости горизонтальной силы от перемещения исследуемого покрытия. Исходя из данных, полученных в двух исследованиях, был произведён расчёт коэффициента трения по следующей формуле:

$$f_{mp} = \frac{|F|}{N}. \quad (10)$$

Сила нормальной реакции находится по зависимости:

$$N = (m_n + m_{np}) \cdot g. \quad (11)$$

Были рассчитаны средние значения коэффициента трения по экспериментальным результатам. В случае наличия песчаного грунта в основании в ненасыщенном водой состоянии коэффициент трения скольжения составляет $f_{тр} = 0,85$, с песчаным грунтом в насыщенном водой состоянии $f_{тр} = 0,97$. В случае наличия песчаного грунта в основании в ненасыщенном водой состоянии коэффициент трения покоя составляет $f_{тр} = 0,55$, с песчаным грунтом

в насыщенном состоянии $f_{\text{тр}} = 0,72$.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что коэффициенты трения скольжения и покоя между образцом покрытия канала и основанием для случая с песчаным грунтом в основании в насыщенном водой состоянии получаются больше, чем с грунтом в ненасыщенном водой состоянии. Это объясняется тем, что плотность песчаного грунта в насыщенном водой состоянии больше. Таким образом, защитное покрытие в виде геомата с заполнителем из щебня рекомендуется применять на откосах, выполненных в песчаных грунтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор литературных источников и материалов исследований показал, что комплексное использование водных ресурсов и эксплуатация существующих гидротехнических сооружений, связано с задачами защиты естественных и техногенных ландшафтов от водной эрозии, которые могут решаться с использованием геосинтетических материалов, в том числе геоматов. Анализ условий движения потока в руслах с покрытием из геосинтетических материалов свидетельствует о влиянии материала на гидравлические сопротивления русел, а растительность следует рассматривать как одну из разновидностей поверхностной шероховатости защитного покрытия откосов водных объектов.

2. Разработана конструкция и выполнен комплекс лабораторных исследований геомата, как защитного покрытия откосов водных объектов, в вариантах заполнителя из щебня и комбинации щебня с многолетней травой рода райграс, как одного из быстроразвивающихся растений, формирующего разветвленную корневую систему и прочную дернину.

3. Результаты гидравлических исследований по оценке коэффициента шероховатости поверхности вариантов покрытия геомата, сравнивались с расчетами по классическим зависимостям Гангилье-Куттера, Маннинга и Павловского, что позволяет рекомендовать формулу Маннинга для расчета коэффициента шероховатости геомата с заполнителями из щебня $n = 0,0237$; из щебня с посевом многолетних трав рода райграс $n = 0,0301$, а использование растительности в составе покрытия из геомата увеличивает коэффициент шероховатости более чем на 20%.

Анализ разрезов покрытия, выполненный после проведения гидравлических исследований, показал на отсутствие угрозы пульсационного давления потока на нижнюю часть покрытия и разрушения русла канала,

деформаций растительного грунта покрытия и основания под ним, а корни травяного покрова послужили армирующим материалом грунта и препятствовали его эрозии.

4. Как показывают исследования, преимуществом применения геомата с заполнителем из щебня является возможность беспрепятственного прохождения воды через пустоты защитного покрытия, что обеспечивает снижение противодавления под покрытием.

Результаты проведенных экспериментов защитного покрытия дна и откосов канала в виде геомата с заполнителем из щебня для двух режимов движения фильтрационного потока (напорного и свободного) показали, что значение коэффициентов фильтрации составляют: для напорного режима $k_{\phi} = 3,24$ см/с, для свободного режима $k_{\phi} = 3,35$ см/с.

5. В результате исследований сопротивления на сдвиг по контакту подошвы геомата с заполнением щебнем с песчаным грунтом в основании, находящегося в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии, были получены следующие значения коэффициентов трения: коэффициент трения скольжения в ненасыщенном водой состоянии $f_{\text{тр}} = 0,85$, в насыщенном водой состоянии $f_{\text{тр}} = 0,97$; коэффициент трения покоя в ненасыщенном водой состоянии $f_{\text{тр}} = 0,55$, в насыщенном водой состоянии $f_{\text{тр}} = 0,72$.

Превышение значений коэффициента трения при насыщении водой объясняется повышением плотности песчаного грунта в насыщенном водой состоянии. Исследования показали, что можно рекомендовать применение защитного покрытия в виде геомата с заполнителем из щебня на откосах, выполненных в песчаных грунтах.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследований

Для дальнейшего изучения и исследования рассмотренных в данной работе защитных покрытий, состоящих из: геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс, необходимо проведение комплексных натурных исследований по оценке влияния ледообразования на устойчивость покрытий на откосе, а также допустимых неразмывающих скоростей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Жукова, Т.Ю. Методика гидравлического исследования противоэрозионного покрытия геомата с грунтовым заполнителем и посевом многолетних трав / Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев, Н.В. Ханов // *Природообустройство*. – 2023. – № 5. – С. 54-59.

2. Жукова, Т.Ю. Экспериментальные исследования коэффициента шероховатости покрытия из композиционного геомата, заполненного щебнем / Т.Ю. Жукова, Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Редников // *Мелиорация и гидротехника*. – 2024. – Т.14. – №2. – С.260-274.

3. Ханов, Н.В. Лабораторные исследования покрытия из композиционного геомата, заполненного щебнем и укрепленного райграсом / Н.В. Ханов, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев // *Мелиорация и гидротехника*. – 2024. – Т.14. – №4. – С.403-417.

Публикации в сборниках материалов конференций и других изданиях:

4. Жукова, Т.Ю. Определение количества анкерных скоб для фиксации стыков геоматов на откосе / Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев // В сборнике: *Аграрная наука – 2022. Материалы всероссийской конференции молодых исследователей*. 2022. – С. 167-170.

5. Жукова, Т.Ю. Современное и инженерно-экологическое противоэрозионное покрытие, состоящего из геомата, заполненного с посевом многолетних трав / Т.Ю. Жукова // В сборнике: *Аграрная наука – 2022. Материалы всероссийской конференции молодых исследователей*. 2022. – С. 8-11.

6. Жукова, Т.Ю. Современные тенденции развития и перспективы внедрения геосинтетических материалов / Т.Ю. Жукова // В сборнике: *Материалы Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 135 – летию со дня рождения А.Н. Костякова. Сборник статей 2022*. – С.69-73.

7. Жукова, Т.Ю. Особенности применения противоэрозионного покрытия – геомата с грунтовым заполнителем и посевом многолетних трав / Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев, Н.В. Ханов // В сборнике: *Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях. Материалы X Международной научно-практической конференции*. Саратов, 2023. – С. 38-42.

8. Жукова, Т.Ю. Аспекты применения противоэрозионного покрытия – геомата с грунтовым заполнителем и посевом многолетних трав / Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев // В сборнике: *Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвящённая 180 – летию со дня рождения К.А. Тимирязева. Сборник статей*. Москва, 2023. – С.21-25.

9. Еремеев, А.В. Применение покрытий из геоматов для защиты откосов гидротехнических сооружений при решении разных задач / А.В. Еремеев, Т.Ю. Жукова // В сборнике: *Материалы Международной научной конференции*

молодых учёных и специалистов, посвящённой 150 летию со дня рождения А.Я. Миловича. Сборник статей. Москва, 2024. – С.27-31.

10. Жукова, Т.Ю. Анализ применения инновационного противоэрозионного покрытия, геомат марки Энкамат 7225, заполненного грунтом с посевом многолетних трав / Т.Ю. Жукова // В сборнике: Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Брянск, 2024. – С.272 - 275.

11. Жукова, Т.Ю. Современные тенденции и перспективы применения инновационного противоэрозионного покрытия / Т.Ю. Жукова // В сборнике: Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики. Материалы IV Международной научно-методической конференции. Самара–Оренбург, 2024. – С.332-336.

12. Жукова, Т.Ю. Современные противоэрозионные покрытия для защиты откосов грунтовых сооружений от внешних воздействий / Т.Ю. Жукова, Н.В. Ханов, Д.А. Алексеев // В сборнике: Мелиорация и водное хозяйство - основа продовольственной и экологической безопасности: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2024. – С. 301-305.

13. Жукова, Т.Ю. Особенности современных материалов, применяемых для защиты прибрежных участков водных объектов / Т.Ю. Жукова // В сборнике: Проблемы развития современного общества. Материалы 10-й всероссийской национальной научно-практической конференции. Курск, 2025 г. – С. 138-141.