

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА  
ИМЕНИ К.А.ТИМИРЯЗЕВА»**

**Н.В. Ханов, Т.Ю. Жукова, В.А. Фартуков, А.В. Еремеев, Д.А. Алексеев**



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГЕОМАТОВ С РАЗНЫМ  
ТИПОМ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ВОДНЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

**Монография**

**Под общей редакцией Н.В. Ханова**

**Москва 2026**

УДК 626.17:627.47

ББК 38.36

Ч 45

*Рецензенты: д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры  
сельскохозяйственного строительства Российского государственного  
аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева П.А. Михеев; канд.  
техн. наук, зав. отделом гидротехники и гидравлики ФГБНУ «ВНИИГиМ им.  
А.Н. Костякова» А.О. Щербаков*

Ч 45     **Ханов, Н.В.** Использование композиционных геоматов с разным типом заполнителя для укрепления откосов водных объектов: монография /Н.В. Ханов, Т.Ю. Жукова, ..... [и др.]; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2026. – 129 с.

ISBN 978-5-9675-2139-3

Разобрано понятие водной эрозии и описаны виды водной эрозии. Представлены примеры размывов и разрушений, вызванных воздействием водной эрозии на гидротехнические сооружения. Описаны основные виды креплений откосов, указаны характеристики этих креплений и места применения. Выполнен обзор геосинтетических материалов, применяемых в гидротехническом строительстве, описаны их достоинства, преимущества и недостатки перед традиционными материалами. В работе исследовались противозерозионные материалы, геоматы двух вариантов: с заполнителем из щебня и щебня с посевом многолетних трав. Выполнено экспериментальное обоснование применения данных покрытий в качестве противозерозионной защиты грунтового откоса. Исследован коэффициент шероховатости защитных противозерозионных покрытий при разных расходах и уклонах дна русла. Исследованы пульсационные характеристики материала, возникающие от воздействия водного потока. Изучены фильтрационные характеристики материала. Исследованы сдвиговые характеристики с песчаным грунтом, насыщенным и не насыщенным водой.

Предназначено для широкого круга читателей: сотрудников и специалистов, занимающихся вопросами проектирования, строительства и эксплуатации природоохранных и гидромелиоративных комплексов; студентов высших учебных заведений, научных сотрудников и аспирантов.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова (протокол № 10 от 28 апреля 2026 г.)

УДК 626.17:627.47

ББК 38.36

© Н.В. Ханов, Т.Ю. Жукова, В.А. Фартуков, А.В. Еремеев., Д.А. Алексеев, 2026

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева, 2026

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТКОСОВ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	7
1.1. Виды геосинтетических материалов, применяемых в гидротехническом строительстве.....	7
1.2. Обзор современных геосинтетических материалов с применением растительности для защиты от водной эрозии .....	13
1.3. Биоинженерная система защитного крепления откоса из геомата .....	21
1.4. Обзор литературных источников по оценке влияния растительности на сопротивление движению водного потока .....	24
Выводы по главе .....	27
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОМАТА С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ.....	29
2.1. Цели проведения эксперимента, описание экспериментальной установки и оборудования.....	29
2.2. Приборы и оборудование, оценка точности измерений при проведении гидравлических исследований.....	34
2.3.Методика экспериментальных исследований геомата с заполнителями.....	39
Выводы по главе .....	60
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГЕОМАТА С ВАРИАНТАМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ.....	62
3.1. Результаты исследований по определению коэффициента шероховатости покрытия из геомата с заполнителем из щебня.....	62
3.2. Результаты исследований по определению коэффициента шероховатости покрытия из геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав	

рода райграс.....	73
3.3. Результаты экспериментального исследования пульсационных характеристик потока.....	80
3.4. Оценка состояния растительного грунта покрытия геомата по итогам экспериментальных исследований.....	84
Выводы по главе .....	86
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ И УСТОЙЧИВОСТИ НА СДВИГ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОМАТА.....	87
4.1.Методика оценки коэффициента фильтрации покрытий по данным экспериментальных исследований.....	87
4.2.Результаты эксперимента по определению коэффициента фильтрации.....	89
4.3.Результаты расчёта по определению коэффициента фильтрации.....	93
4.4. Оценка сопротивления сдвигу на контакте геомата с грунтом основания в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии.....	94
4.5.Результаты расчёта коэффициента трения.....	100
Выводы по главе .....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	106
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	121

## ВВЕДЕНИЕ

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 укреплений 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.

К геосинтетическим материалам относятся: геотекстили, георешетки, геомембраны и геокомпозиаты. Крепления из геотекстильных или геокомпозитных материалов, в частных случаях, позволяют снизить стоимость возводимого объекта. Практически все группы геосинтетических материалов отличаются простотой монтажа. Без потерь в качестве их применение упрощает производство работ и уменьшает сроки строительства. Благодаря появлению геоматов, существенно увеличилось количество решений в области укрепления откосов каналов, кюветов автомобильных дорог, различных водных объектов. Срок службы таких объектов можно увеличить, снизив затраты на ремонт, так как влияние водной эрозии на них минимально, а иногда и полностью отсутствует. Так же нередко эти материалы применяют не только для защиты, но и для благоустройства территорий.

Повышая надежность, долговечность и экологическую безопасность

возводимых объектов, сегодня эти материалы активно применяют при строительстве транспортных, гидротехнических, мелиоративных, природоохранных сооружений.

Опыт использования геоматов в отечественном гидротехническом, природоохранном и транспортном строительстве пока еще незначителен, особенно остро стоит проблема нехватки информации о гидравлических и фильтрационных характеристиках данного материала.

Вместе с тем, результаты анализа научной литературы показали, что конструкции защитных покрытий откосов гидротехнических сооружений на основе использования геоматов двух вариантов: с наполнителем из щебня и щебня с посевом многолетних трав требуют комплексного исследования и оценки.

Авторы выражают свою глубокую благодарность рецензентам д-ру техн. наук П.А. Михееву и канд. техн. наук А.О. Щербакову за рецензирование монографии и ценные советы, данные ими при подготовке рукописи к печати.

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТКОСОВ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

## **1.1. Виды геосинтетических материалов, применяемых в гидротехническом строительстве**

Геосинтетические материалы используются в строительстве по всему миру уже более 45 лет, с постоянно возрастающим интересом в последнее время, так как считаются надежным и долговечным строительным материалом с доказанной эффективностью во многих областях применения, являясь частью более широкой группы конструкционных материалов [100]. Геосинтетические материалы выполняют множество геотехнических инженерных функций и применяются во всех аспектах проектирования гидротехнического строительства [47, 102].

Рассмотрим некоторые из них: Геотекстиль – это инновационный материал синтетического происхождения, который широко применяется для защиты гидроизоляции, дренирования, фильтрации и укрепления почвы в земляных работах, дорожном строительстве, ландшафтном дизайне, сельском хозяйстве. Этот универсальный износостойчивый материал производится из прочных полимерных волокон. Геотекстиль представленный на рисунке 1.1 часто выступает в качестве подстилающего для дренажных систем, предотвращает эрозию грунта, укрепляет насыпи [3].



Рисунок 1.1 – Геотекстиль [3]

**Геомембраны** – это геосинтетические материалы, состоящие из одного или нескольких синтетических листов, свернутых в рулоны, «мембрана» обычно представляет собой тонкие и гибкие листы толщиной от 1,0 мм до 3,0 мм, которая используется главным образом для целей гидроизоляции или удержания жидкости, общий вид материала представлен на рисунке 1.2 [23].



Рисунок 1.2 – Геомембраны [23]

В дополнение к традиционным полимерным геомембранам существуют также битумные геомембраны, которые изготавливаются в заводских условиях путем пропитки или покрытия ткани битумом или смесью полимера и битума. Они называются сборными битумными геомембранами [72].

**Георешетка** – это геосинтетическая сетка, образованная регулярной сетью соединенных элементов с отверстиями более 6,35 мм, позволяющими сцепляться с поверхностью почвы, грунта и другими подстилающими материалами, чтобы функционировать главным образом в качестве армирования (рисунок 1.3) [10].



Рисунок 1.3 – Георешетка [10]

Конструктивно представляет собой ячеистые удерживающие или «сотовые» элементы, которые обычно заполняются почвой или бетоном для укрепления почвы или обеспечения устойчивых к эрозии участков [106].

**Геосетка** – это геосинтетический плоский полимерный рулонный материал с сетчатой структурой, образованный эластичными рёбрами из высокопрочных пучков нитей, скреплёнными в узлах прошивочной нитью, переплетением, склеиванием, сплавлением или иным способом, с образованием ячеек, представленный на рисунке 1.4 [24].



Рисунок 1.4 – Геосетка [24]

**Геомат** – это трехмерный геосинтетический материал, состоящий из нескольких слоев полипропиленовых экструдированных решеток, наложенных друг на друга и связанных с помощью полипропиленовой нити термическим способом, представленный на рисунке 1.5 [19].



Рисунок 1.5 – Геомат [23]

Геоматы обычно используются для того, чтобы защитить грунт от эрозии, закрепить на склоне корни трав, деревьев или небольших растений, а

также в строительстве и гидротехнике.

**Геокомпозит** – это материал, который состоит из геотекстиля и сетки (специальной георешетки) с ромбовидными ячейками. Такая решетка выступает каркасом, который с обеих сторон покрывает нетканый иглопробивной текстиль, представленный на рисунке 1.6, обеспечивающий очень хорошую водопроницаемость, не пропуская грунт [87].

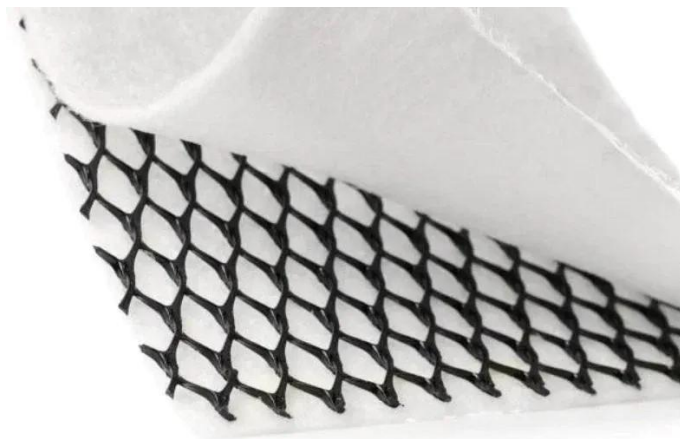


Рисунок 1.6 – Геокомпозит [87]

Большинство геокомпозитов используется для борьбы с эрозией, включает в себя как синтетические маты, так и геотекстиль с натуральными материалами.

**Биотекстиль** – представленный на рисунке 1.7 рулонный материал способствует защите растений в вегетационный период, а разлагаемые составляющие служат для питания растений. Полимерный компонент геотекстиля – это армирующая часть, которая будет укреплять верхний слой грунта. Основа биотекстиля является армирующей, биоразлагаемой и полимерной. Между различными слоями биотекстиля есть семена многолетних трав, выведенных специально для подобных материалов [88, 103].

Биологический геотекстиль является довольно выгодным материалом с экономической точки зрения.



Рисунок 1.7 – Биотекстиль [103]

**Бентонитовые маты** – это геосинтетический материал рулонного типа, применяемый для гидроизоляции, разработан на основе природной бентонитовой глины (рисунок 1.8). Такие маты обладают свойством быстро поглощать и надежно удерживать влагу [87].

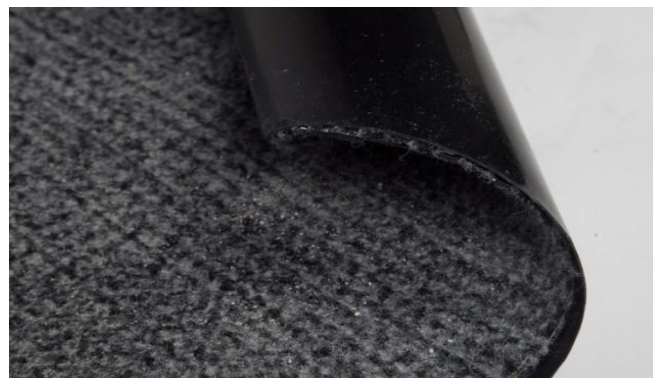


Рисунок 1.8 – Бентонитовый мат [87]

Этот материал можно использовать для защиты горизонтальных и вертикальных подземных и заглубленных частей зданий и сооружений, а также как противофильтрационные экраны в гидротехнических сооружениях и в качестве слоя, защищающего почву и грунтовые воды от попадания в них загрязняющих веществ.

**Геоплита** – геосинтетический материал, получаемый методом экструзии, вспенивания синтетического полимера или по технологии изготовления композитов, применяемый в дорожных конструкциях [89].

**Геосинтетические глинистые вкладыши**, представленные на рисунке 1.9, состоят из слоя бентонита или другого материала с очень низкой

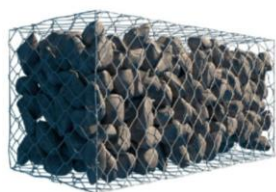
проницаемостью, поддерживаемого геотекстилем или геомембранами, механически скрепленных иглой, сшивом или химическими клеями [89].



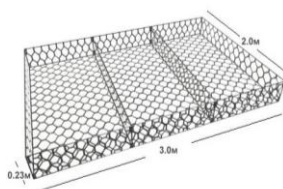
Рисунок 1.9 – Геосинтетический глинистый вкладыш [89]

**Габион** – это объемная сетчатая конструкция из металлической проволоки, наполненная различными природными материалами. Термин происходит от итальянского слова *gabbione*, что дословно переводится как «большая клетка». Каркас делают из металлической проволоки диаметром от 2 мм до 3,9 мм, сплетенной в шестигранные звенья с двойным кручением. Для защиты от коррозии сетку покрывают цинком, полимерными составами или сплавом цинка с алюминием. Габионы – прочные и долговечные. Максимальная устойчивость достигается минимум за один год. После этого срок службы габиона практически неограничен. Основные схемы габионных креплений показаны на рисунке 1.10.

а)



б)



в)



а–коробчатые, б – матрацно-тюфячные матрацы Рено, в – цилиндрические  
Рисунок 1.10 – Виды габионов [86]

Габионные конструкции можно возводить в любое время года. Быстрый монтаж и легкая подготовка основания не требуют тяжелой техники.

## **1.2. Обзор современных геосинтетических материалов с применением растительности для защиты от водной эрозии**

Современное состояние большинства водных объектов и прибрежных территорий не соответствует действующим экологическим и градостроительным требованиям [13]. При этом зачастую требуется не только защитить береговую линию от механического разрушения водными потоками, но и ликвидировать источники поступления наносов в водоток. Укрепление берега особенно актуально при сооружении каналов, русел рек, отводящих участков водосбросов, при строительстве насыпей транспортных водных магистралей. Помимо практической функции укрепление берега носит и эстетическую функцию, помогая облагородить прилегающую территорию, повысить комфортность проживания в зоне действия водного объекта [9,54,75,108]. Проблема комплексного использования водных ресурсов и эксплуатации существующих гидротехнических сооружений тесно связаны с охраной больших и малых рек, защитой естественных и техногенных ландшафтов от разрушительного действия сил природы, одним из которых является водная эрозия [26, 110]. Под водной эрозией обычно понимают процесс разрушения горных пород и почв водным потоком, в частности речным. Эрозия грунта обусловлена различными, часто взаимосвязанными факторами: гидрологическими, геологическими, гидродинамическими и техногенными, в этой связи берегозащитные и берегоукрепительные мероприятия различаются в довольно широком диапазоне [5, 99, 109].

Воздействие эрозии приводит к негативным последствиям как для самих

гидротехнических сооружений, окружающей территории, так и для водного объекта в целом. Вследствие чего происходят размывы, разрушения, затопления и другие негативные воздействия воды и ветра, а природные условия, техногенные и антропогенные факторы создают затруднения для использования территорий для освоения, максимального использования при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, представленные на рисунке 1.11 [77].



а, б – обрушение и эрозия; в, г – деформации и разрушение

Рисунок 1.11 – Повреждения откосов прибрежной линии водных объектов [77]

Эрозии водного потока подвергаются и сами водопропускные и водоотводящие сооружения, а её разрушительное воздействие приводит к негативным последствиям, включающим в себя, в том числе необходимость восстановления работоспособности гидротехнических сооружений в целом.

Для предотвращения таких последствий важно правильно подобрать защитный материал и конструкцию крепления прибрежных склонов, откосов насыпей, в первую очередь, теряющих устойчивость, снижающих надёжность и безопасность работы [107, 117].

Выбор типа крепления зависит от характера воздействия водного потока на берег и скоростей течения водотока, вида грунтов. В зависимости от назначения сооружения облицовки откосов могут выполняться из разных материалов. Выбор оптимального конструктивного решения при создании берегоукрепления водных объектов, является задачей, при решении которой необходимо знать все расчетные параметры материала и работы конструкции противозерозионной защиты [84,92]. Предотвратить негативный результат воздействия воды на целостность русел и склонов водных объектов можно довольно эффективно с помощью инженерных решений с использованием геосинтетических материалов.

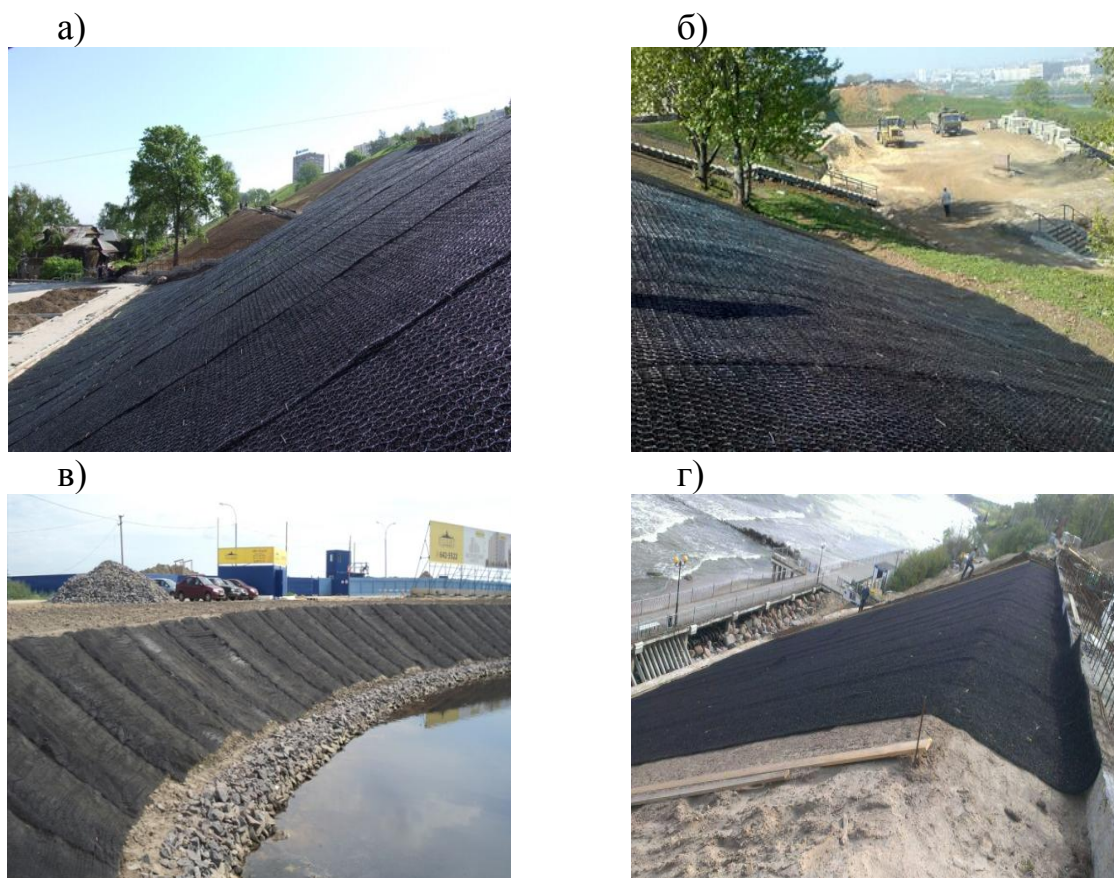
Геосинтетические материалы используются при строительстве и восстановлении плотин в местах, где они могут быть доступны в случае необходимости, не только потому, что они могут быть единственным практическим выбором для конкретного применения, но и потому, что они обеспечивают жизнеспособную и долгосрочную экономическую альтернативу другим видам обычных строительных материалов. Распространенным геосинтетическим материалом являются геоматы, которые нашли свое применение в строительстве. Так же как и другие геосинтетические материалы, геоматы имеют достаточно обширную область применения в гидротехническом строительстве [17, 51, 93].

Геоматы обычно используются для того, чтобы защитить грунт от эрозии, закрепить на склоне корни трав, деревьев или небольших растений, а также в строительстве и гидротехнике. Структура и основные характеристики геоматов позволяют произвести армирование грунта на берегах рек, озер, прудов, а также в других местах, примеры применения

представлены на рисунке 1.12 [4, 104].

Толщина мата может быть 10, 18 или 20 мм. Открытая поверхность составляет более 95%. Чем больше предполагаемая нагрузка, тем толще должен быть мат [40, 45].

Выделим, некоторые случаи применения противоэрозионного покрытия геомата: защита насыпей и откосов от ветровой и водной эрозии, создание растительного покрова на крутых откосах, защита насыпей от действия чрезмерных гидравлических воздействий, защита откосов дамб [40, 44].



а, б – для укрепления дорожных кюветов  
в, г – при ренатурировании рек в сочетании с каменной наброской

Рисунок 1.12 – Крепление откосов с применением противоэрозионного материала геомата [104]

При укладке этого материала на откосах необходимо принимать во внимание геотехнические аспекты. Геомат может применяться на очень крутых склонах или даже вертикальных: повышается устойчивость откосов в

результате замедления или даже прекращения эрозионных процессов. В процессе укладки геомата необходимо обращать внимание на крутизну откоса: заложение 1:1 для задержания откосов сухих насыпей; заложение 1:1,5 для откосов, которые находятся под водой. Если откос довольно крутой, то в этом случае в геомате возникают растягивающие усилия, поэтому рекомендуется использовать геомат с армированной подложкой. Предварительно необходимо рассчитать растягивающие силы, которые действуют на мат [45, 74].

В природе существует естественный способ защиты грунтов от эрозии. Таким способом является растительность. Однако в некоторых случаях, например, когда эрозионные процессы протекают слишком быстро или необходимо создание и развитие растений в случае естественных и антропогенных влияний, требуется вмешательство человека [43].

Рассмотрим принцип применения геомата с растительностью, который заключается в том, что наличие растительности дополнительно защищает грунт от эрозии. Корни растений переплетаются с нитями геомата, при этом имеют достаточно плотное сплошное покрытие, тем самым укрепляется сам грунт, то есть он может выдержать большую нагрузку. В таблице 1.1, показаны типы и преимущества покрытий с применением посева трав, геомата и геомата с посевом трав [45].

Таблица 1.1 – Характеристики покрытий с применением посева трав, геомата и геомата с посевом трав [45]

Характеристика покрытий	Тип покрытия		
	Посев трав	Геомат	Геомат с посевом трав
Защита от (водной и ветровой эрозии)	+	+	+
Биологическая защита откоса	+	–	+
Укрепление откосов	+	+	+
Укрепление почвенного покрова корневой системой	+	–	+
Экологические характеристики объекта	+	–	+

Продолжение таблицы 1.1

Характеристика покрытий	Тип покрытия		
	Посев трав	Геомат	Геомат с посевом трав
Развитие флоры и фауны	+	–	+
Защита от сезонного подтапливания или природных катаклизмов	+/-	+	+/-
Защита железнодорожных насыпей или водных каналов, кюветов, быстотоков	+	+	+
Способность выдерживать большую нагрузку	+/-	+/-	+
Стоимость покрытия	+	+	+

Количество засеиваемых в геомат семян составляет 1/3 посевного материала при условии, что геомат уже заполнен грунтом, и 2/3 если геомат только что уложен и пока еще пуст. Маты, предназначенные для укладки на очень крутых и длинных склонах, засевают с использованием гидропосева. Развитие растительного покрова обычно занимает несколько месяцев [20, 48]. Пример противоэрозионного материала геомата с посевом трав представлен на рисунке 1.13 [45].



Рисунок 1.13 – Применение противоэрозионного мата – геомат с посевом трав

Укладывается геомат на ровную поверхность, поэтому поверхность предварительно выравнивается и уплотняется. В тех случаях, когда участок

подвержен воздействию влаги, необходимо предусмотреть дополнительные дренажные элементы, например, нагорные и отводящие каналы [51].

Использование геомата для закрепления растительного покрова повышает сопротивляемость грунта эрозии, что при определенных условиях служит альтернативной жесткой одежде откосов. Пример использования противозэрозийного покрытия в виде геомата с посевом трав представлено на рисунке 1.14 [45].

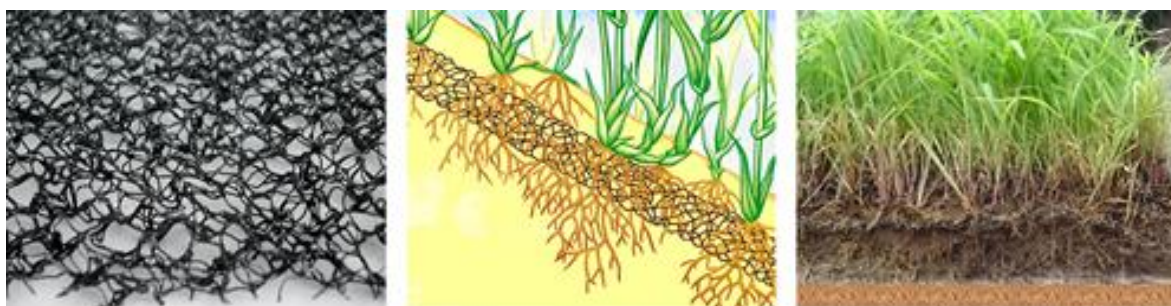


Рисунок 1.14 – Использование противозэрозийного покрытия в виде геомата с посевом трав [45]

Примеры использования геомата для озеленения и водоотведения крыш и для фиксации грунта на берегах водоемов представлены на рисунках 1.15 и 1.16 [100].



Рисунок 1.15 – Использование геомата для озеленения и водоотведения крыш [100]



Рисунок 1.16 – Применение геомата для фиксации грунта на берегах водоемов [100]

Особенности применения геомата с растительностью:

1. С позиций экологии – защита грунта с использованием растительности;
2. С позиции эстетики: укрепленная растительность смеси на геомате визуально не отличается от неукрепленной, что означает, что она идеально подходит в естественном ландшафте;
3. Использование растений стимулирует развитие флоры и фауны; кроме этого, использование крепления с растительностью экономичнее.

Выбирая растительный слой необходимо соблюдать требования: корневая система растений должны достаточно глубоко проникать в грунты; растения должны хорошо переносить засушливые времена; быстро расти.

Для прорастания семян температура почвы должна быть не менее 10°C, почва должна быть достаточно увлажнена. При благоприятных условиях для прорастания семян необходимо от 1 до 3 недель. В первый вегетационный период обнаруживают сплошной растительный слой, для образования полного растительного слоя требуются два вегетационных периода. Лучшее время для посева в умеренном климатическом поясе – апрель и сентябрь [20].

Так же стоит оценить применение этого материала с точки зрения гидравлики потока, для этого необходимо знать продолжительность гидравлической нагрузки, поскольку выбор типа геомата зависит от степени создания устойчивой растительности. Особое внимание уделяют узлам и соединениям материала, они выполняют свою соединительную функцию на протяжении всего периода эксплуатации мата. Плохо скрепленные узлы и свободные концы - это слабое место в конструкции, они особенно подвержены опасности во время наката волн. Если геомат располагается на участке, который подвержен воздействию однонаправленных течений, его следует укладывать внахлест в направлении течения потока [1, 47, 49].

### **1.3. Биоинженерная система защитного крепления откоса из геомата**

Благодаря удачному сочетанию многих положительных свойств, геосинтетические материалы имеют ряд неоспоримых преимуществ, главные из которых – долговечность и экономичность. Геосинтетики – универсальны, в отдельных случаях они могут стать единственным решением почти неразрешимой проблемы. Они также имеют экологический эффект, так как снижают вредное влияние на окружающую природную среду, а также сокращают использование природных ресурсов при строительстве противofильтрационных покрытий, поэтому можно говорить о такой их функции как природосбережение [73, 81].

Одним из наиболее экологичных, природоподобных и перспективных способов защиты откосов и подпорных гидротехнических сооружений является растительность. Слой травяной растительности, высаживаемой на защитное крепление, например, выполненного из мастики и мелкого щебня, которые обработаны органическим вяжущим материалом, хорошо показал себя при реализации пилотного проекта на землях Баден – Вюртемберга в Германии (рисунок 1.17), как и покрытие с использованием полимерного

мата из монофиламентов – Энкамата (геокомпозита из плодородного грунта и корней растений) [59]. Эти защитные покрытия являются альтернативой противозерозионных креплений из таких материалов как камень, бетон или асфальтовые смеси.



Рисунок 1.17 – Укрепление с травянистыми растениями: керн защитного крепления из известкового щебня и мастики [59]

Такое экологичное покрытие эстетично для парковых территорий, часто не отличается от неукреплённой поверхности, и, таким образом, хорошо вписывается в любой естественный агроландшафт. Кроме того, использование растений стимулирует развитие флоры и фауны, а укрепление с помощью растительности в большинстве случаев дешевле, чем другие способы защиты земель от эрозии и деградации береговых склонов малых водных объектов [59].

Поскольку существующий в природе естественный способ защиты грунтов от ветровой и водной эрозии - посадка травяной растительности, является одним из хороших вариантов защиты почвы и берегов, особенно пологих их участков, то естественный способ можно рекомендовать для защиты малых водных объектов от эрозии [7].

Поскольку наличие травы, как и иной растительности, обуславливает значительную турбулентность потока водотока, сопровождающуюся потерями энергии, то в результате этого происходит уменьшение скорости

течения воды на различных участках транзитной части естественного либо искусственного водного объекта [112]. Поэтому для оценки области применения композитной конструкции укрепительных покрытий, параметров, оказывающих влияние на устойчивость такого крепления, и его экономической эффективности, было решено провести серию масштабных исследований, позволяющих теоретически обосновать и доказать опытным путём свойства нового крепления в лабораторных условиях, приближённых к натурным. Применение конструкций противofильтрационных и защитных покрытий с геосинтетическими материалами с травянистой растительностью, в целом позволяют создать более благоприятную экологическую обстановку на орошаемых землях за счет снижения уровня грунтовых вод и повысить их плодородие вследствие исключения вторичного засоления, подтопления и заболачивания территорий. При строительстве таких противofильтрационных покрытий можно сэкономить значительные средства без ухудшения их эксплуатационных характеристик, снизить расходы на обслуживание.

Исходя из этого, применение геосинтетических материалов с травянистой растительностью для противofильтрационных покрытий открывает широкие возможности выбора высоконадежных конструкций и более совершенных технологий их строительства.

Для защиты откосов гидротехнических сооружений от водной эрозии применяются покрытия, состоящие из геомата марки – Энкамат 7225 с наполнителем из щебня и щебня с посевом многолетних трав рода райграс [100]. Одной из наших задач была проверка возможности применения таких креплений для водопроводящих сооружений и получение их характеристик.

Вариант использования комбинации геомата, заполненного щебнем, содержащим семена многолетних трав, надёжно защищает склоны водного объекта от ветровой и водной эрозии. Анализ технической литературы показывает, что пока травяной покров полностью не разовьется и

окончательно не закрепится, канал не достигает своей максимальной пропускной способности [18, 112, 113]. Известно, что для большинства материалов, используемых для облицовки откосов и дна канала, значение коэффициента шероховатости  $n$  достаточно корректно определяется по формуле Маннинга, существенно не меняется в зависимости от глубины потока и обычно принимается постоянным. Однако для каналов, покрытых травой, значение  $n$  меняется и сильно зависит от глубины потока [52]. Это изменение вызвано реакцией травы на поток: если увеличивается глубина потока – трава наклоняется, тем самым уменьшая её высоту и изменяя сопротивление воздействию на поток [6, 28, 58, 112]. Всё это указывает на актуальность и необходимость проведения экспериментальных исследований по определению гидравлических сопротивлений, проверки надёжности и устойчивости в целом системы «геомат–водонасыщенный грунт заполнителя и основания – травяное покрытие».

#### **1.4. Обзор литературных источников по оценке влияния растительности на сопротивление движению водного потока**

Результаты исследований защитных покрытий из геосинтетических материалов, используемых в гидротехническом строительстве, а также гидравлических характеристик и свойств геотекстиля, представлены в работах Р.Р. Аллямова, Е.В. Баранова, Е.Л. Бочкова, О.Н. Бурмистровой, Н.Д. Дегенбаевой, В.Н. Кондратьева, Ю.М. Косиченко, Т. Нгуен, А.Б. Понамарева, Ю.Н. Соколова, В.А. Шнайдер, М.В. Abbott, J.M. Bartolome, R.M. Khatsuria и др. [3, 10, 16, 34, 118, 119].

Значительный объем исследований защитных возможностей геосинтетических материалов, включая геомат, проведен на кафедре гидротехнических сооружений (в лаборатории водопропускных сооружений) Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н.

Костякова ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева изложен в работах А.П. Гурьева, Н.В. Ханова, Д.В. Козлова, К.Д. Козлова, В.А. Фартукова, Е.В. Баранова, А.В. Еремеева и др [11, 29, 37, 41, 64, 105].

Древесные и кустарниковые, а также травянистые и водные растения, имеющие контакт с потоком, оказывают сопротивление течению. В течение половодий и паводков также под водой могут оказаться растения прибрежных территорий (поймы рек, заросшие травой или злаковыми и бобовыми растениями), которые тоже сыграют эту роль. В то же время, трава с ее разветвленной корневой системой укрепляет грунтовое ложе и делает более устойчивым русло водотока, препятствует размыву и перемещению слагающих ложе частиц [33].

Ю.Н. Соколовым были проведены исследования, в процессе которых определялось гидравлическое сопротивление потока при наличии растительности на пойме реки с учетом морфологических характеристик этой растительности. Им был сделан вывод о том, что, получая сопротивление при разных высотах травостоя, необходимо учитывать степень прогибания травы при разных скоростях потока [97].

Согласно анализу Ц.Е. Мирцхулавы оценка эрозии почвогрунтов происходит с учетом размеров отдельностей, величины которых зависят от структурных свойств грунтов. Количественное значение эрозии (или размыва) определяется также величиной превышения действующих донных скоростей поверхностного стока над не размывающими значениями. С уменьшением разницы между этими скоростями интенсивность размыва уменьшается. В случае наличия растительности в русле происходит увеличение сопротивляемости размыву в зависимости от развития корневой системы, увеличивающей связность грунта. Результаты исследований Ц.Е. Мирцхулавы показали, что сопротивляемость силовому воздействию потока на поверхности, закрепленной растительностью в десятки и сотни раз больше, чем сопротивляемость непокрытой поверхности почвогрунтов, и,

соответственно это относится и к допускаемым (неразмывающим) скоростям потока. В таблице 1.2 приведены величины допускаемых скоростей для некоторых растительных покровов каналов [79].

Таблица 1.2 – Допускаемые скорости для каналов, покрытых растительностью по данным Ц.Е. Мирхцулавы [79]

Растительный покров	Уклон, %	Категории почвы по сопротивляемости эрозии	Допускаемая скорость, м/с
Трава стоножка	0–5	9	2,14
Бермудская трава	5–10	8	1,84
Высококачественные сенокосы	Более 10	7	1,53
	0–5	8	1,84
Бермудская трава	5–10	7	1,53
	Более 10	6	1,22
Буйволова трава	0–5	7	1,53
Мятлик	5–10	6	1,22
Костер безостый	Более 10	5	0,92
Пастбищная трава	0–5	5	1,22
Смесь трав	5–10	4	0,92

Нгуен Тай в своих исследованиях рассматривает течение в заросшем русле как фильтрационное в пористой среде, при том, что глубина в естественном потоке всегда значительно больше, при этом смоченный периметр русел не намного отличается от ширины русла, и в расчетах речных русел гидравлический радиус допустимо заменить средней глубиной. А в заросшем русле большинство исследователей в качестве характерной скорости принимают среднюю скорость течения потока. В качестве линейного параметра принимают глубину потока или гидравлический радиус, таким образом шероховатость, создаваемая растительным покровом, может изменяться с изменением скоростей и глубин потока [82].

Ван Те Чоу в своих натурных исследованиях рассматривал влияние растительного покрова на коэффициент шероховатости по Маннингу. По его мнению, растительность может рассматриваться как разновидность

поверхностной шероховатости, которая в то же время уменьшает пропускную способность русла, которая зависит главным образом от высоты, густоты, распределения и типа растений [112].

В гидротехническом строительстве при природоприближенном восстановлении водных объектов необходимо внедрение методов инженерной биологии, при этом по мнению И.С. Румянцева и Р.К. Кромера, при создании новых или обустройстве уже существующих природоприближенных русел рекомендуется использовать местные строительные материалы, которые могут быть «живыми», «мертвыми» и «комбинированными» [95].

### **Выводы по главе**

1. Современное состояние большинства водных объектов и прибрежных территорий не соответствует действующим экологическим и градостроительным требованиям. При этом зачастую требуется не только защитить береговую линию от механического разрушения водными потоками, но и ликвидировать источники поступления наносов в водоток. Проблема комплексного использования водных ресурсов и эксплуатации существующих гидротехнических сооружений тесно связаны с охраной больших и малых рек, защитой естественных и техногенных ландшафтов от разрушительного действия сил природы, одним из которых является водная эрозия.

2. Геосинтетические материалы широко используются в строительстве, считаются надежным и долговечным строительным материалом с доказанной производительностью во многих областях применения, так же является частью более широкой группы инженерных материалов. Распространенным геосинтетическим материалом является геомат, который нашел свое применение в гидротехническом строительстве для укрепления берегов

водных объектов, каналов и других сооружений.

3. Анализ данных исследований 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 этой связи изучение 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, является актуальным.

С учетом изложенного, целью настоящей монографии является гидравлические исследования и обоснование применения защитных покрытий откосов гидротехнических сооружений и водных объектов на основе геоматов с различным заполнением.

## **ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОМАТА С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ**

### **2.1. Цели проведения эксперимента, описание экспериментальной установки и оборудования**

Получивший широкое применение в практике геосинтетический материал геомат марки Энкамат 7225, был принят к исследованиям в лаборатории для оценки возможностей защиты грунтовых откосов водопропускных и водопроводящих сооружений от воздействия воды [100]. 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.

Целью лабораторных исследований было оценка использования геомата с различными заполнителями в качестве защитных покрытий откосов гидротехнических сооружений и водных объектов от воздействия водного потока.

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. В обеих схемах использовался щебень крупностью от 6 до 10 мм.

В процессе лабораторных исследований решались следующие задачи:

- оценка коэффициентов шероховатости исследуемых противозерозионных покрытий при различных значениях расходов потока и уклонах русла;

- изучение закономерностей пульсации потока на элементы покрытия геомата с заполнителем из щебня;

– оценка фильтрационных характеристик защитного покрытия геомата с заполнителем из щебня;

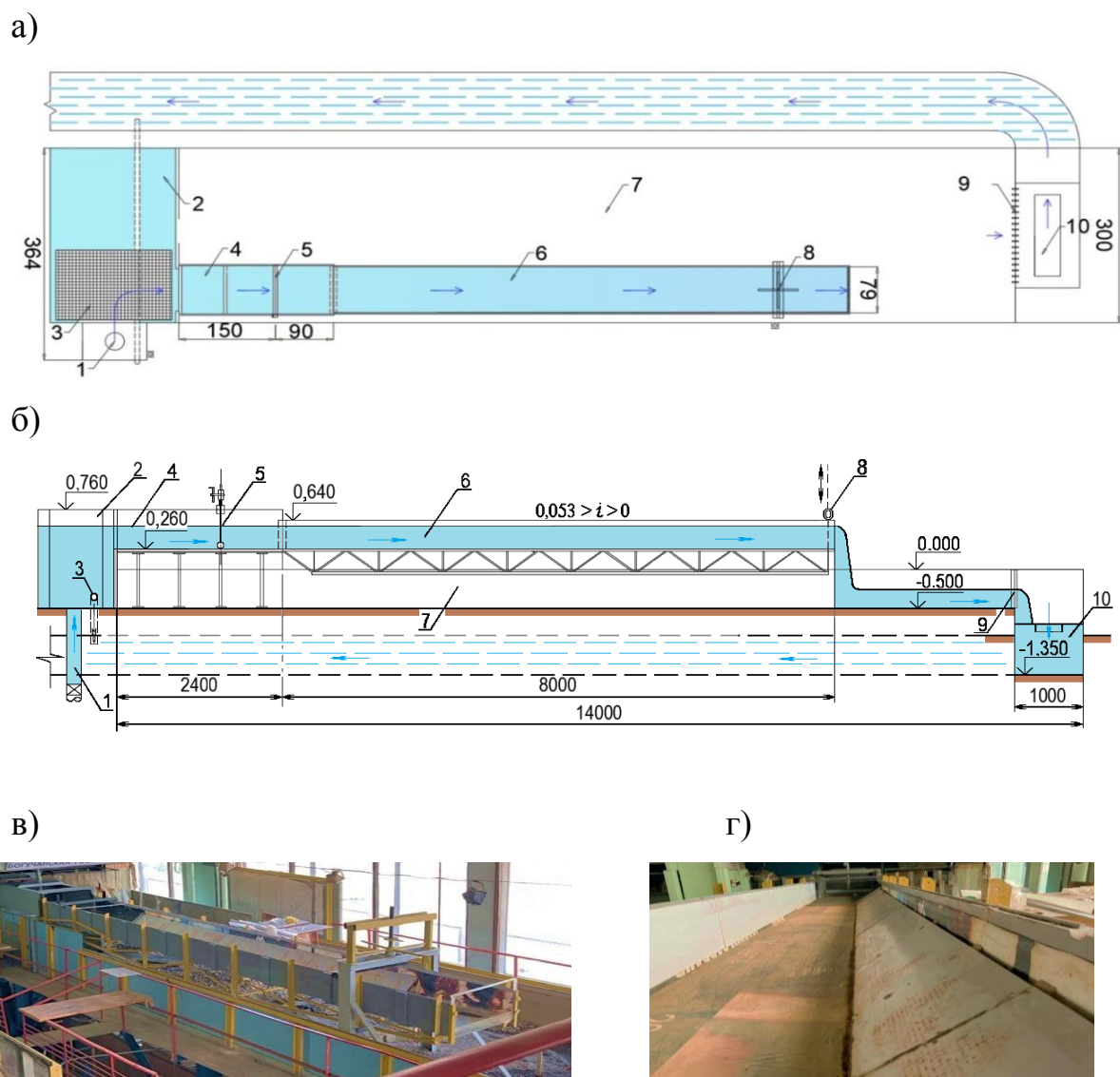
– определение коэффициента трения защитного покрытия геомата с заполнителем из щебня и оценка сопротивления сдвигу подошвы покрытия по контакту с грунтовым основанием.

Лабораторные исследования защитных покрытий из геоматов выполнялись с использованием комплекса экспериментальных установок, включая гидравлический лоток для исследования гидравлических параметров поверхностного потока, прибор Дарси для оценки фильтрационных характеристик и сдвиговой лоток для оценки сопротивления сдвигу подошвы покрытия.

Схема и общий вид гидравлического лотка приведен на рисунке 2.1 [54, 62].

Для определения гидравлических характеристик потока использовался гидравлический лоток, в котором была установлена модель канала, выполненная в виде канала с поперечным сечением в виде прямоугольной трапеции с коэффициентом заложения наклонного откоса равным единице (рисунок 2.1, г). Размеры канала: длина рабочего участка – 8250 мм; высота – 390 мм; ширина – 790 мм, установка позволяла изменять уклон дна канала до  $i = 0,053$  [29, 62].

Вода в лоток подавалась из приёмного бака с системой поддержания постоянного уровня, в начале подводящего лотка была установлена успокоительная решетка для выравнивания скоростей потока, подаваемый на модель расход регулировался плоским затвором, обеспечивая равномерное распределение в пределах рабочего участка канала. Для управления основными гидравлическими характеристиками потока на модели, в частности для регулирования кривой подпора на контрольном участке, установлен затвор жалюзийного типа в конце лотка. Отводящий лоток сбрасывает воду и отводит ее с модели [30, 62, 65].



а – план; б – продольный разрез; в – вид на гидравлический лоток, г – рабочий участок; 1 – питающий трубопровод, 2 – приёмный бак, 3 – сливной трубопровод, 4 – подводящий лоток, 5 – затвор, 6 – рабочий участок канала, 7 – гидравлический лоток, 8 – подъёмник рабочего лотка, 9 – жалюзийный затвор, 10 – отводящий лоток

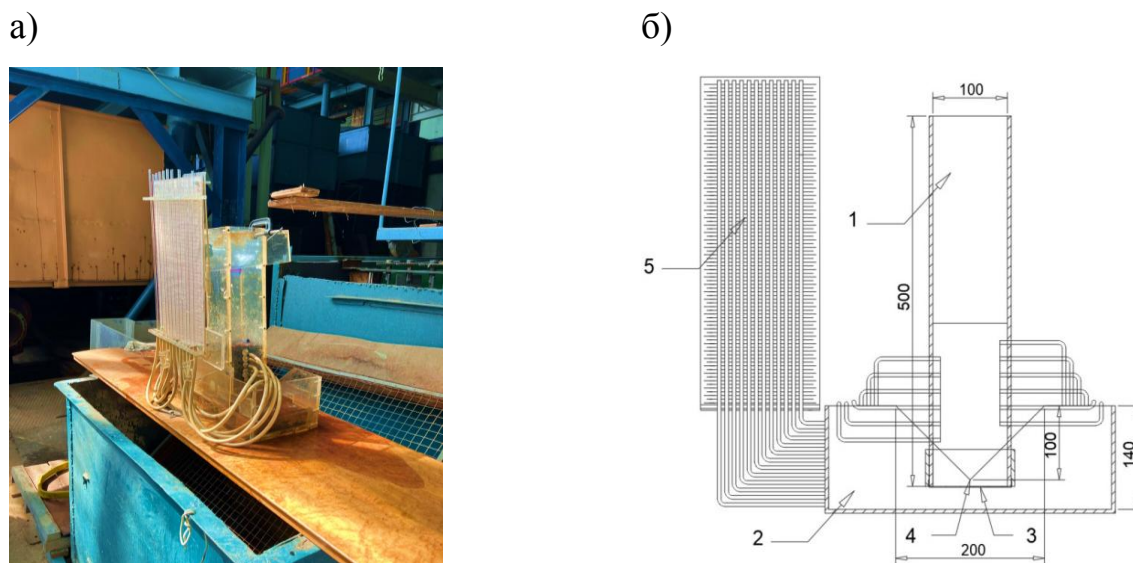
Рисунок 2.1 – Схема и общий вид экспериментальной установки [54, 62]

Для определения гидравлических характеристик потока использовался гидравлический лоток, в котором была установлена модель канала, выполненная в виде канала с поперечным сечением в виде прямоугольной трапеции с коэффициентом заложения наклонного откоса равным единице (рисунок 2.1, г). Размеры канала: длина рабочего участка – 8250 мм; высота – 390 мм; ширина – 790 мм, установка позволяла изменять уклон дна канала до

$i = 0,053$  [29, 62].

Вода в лоток подавалась из приёмного бака с системой поддержания постоянного уровня, в начале подводящего лотка была установлена успокоительная решетка для выравнивания скоростей потока, подаваемый на модель расход регулировался плоским затвором, обеспечивая равномерное распределение в пределах рабочего участка канала. Для управления основными гидравлическими характеристиками потока на модели, в частности для регулирования кривой подпора на контрольном участке, установлен затвор жалюзийного типа в конце лотка. Отводящий лоток сбрасывает воду и отводит ее с модели [30, 62, 65].

Для оценки фильтрационных характеристик материала, использовался модифицированный прибор Дарси, представленный на рисунке 2.2.



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

Рисунок 2.2 – Вид и схема прибора для определения параметров фильтрационного потока при исследовании геомата

Для экспериментальных исследований свойств фильтрационного потока покрытия из геомата с наполнителем из щебня, использовалась фильтрационная колонна квадратного поперечного сечения, выполненная из органического стекла, которая имела высоту 500 мм и сечение 100x100 мм.

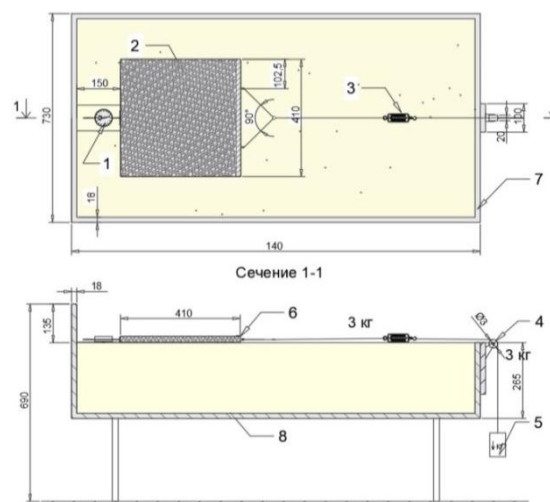
Колонна опиралась на короб, снабженный мерным водосливом. На противоположных ребрах колонны были установлены с одной стороны пьезометры в количестве 6 штук, расположенные с шагом 18 мм. Расположение этих пьезометров на этой стороне соответствовало толщине исследованного экспериментального материала, а на противоположной стороне расположение пьезометров было смещено на 9 мм, то есть на расстояние, равное половине толщины покрытия. С целью получения показаний был выполнен щит с размещением 12 пьезометров, снабженный градуировочной шкалой. Для устранения выпадения исследуемого материала была установлена решетка с размерами ячеек 20x20 мм на дне колонки. Опорный короб имел внутренние размеры 380x200x140 мм.

Сопrotивление подошвы покрытия сдвигу на контакте с грунтовым основанием исследовалось на установке, приведенной на рисунке 2.3.

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

Установка включала контейнер, заполненный грунтом, на котором размещался образец геомата с наполнителем из щебня, размером 410 х 410

мм, средней толщиной 18 мм и фиксировалась сдвиговая пластина, которая с помощью капроновой нити через динамометр с использованием блока соединялась с грузом. Фиксация перемещений образца осуществлялась с помощью индикатора часового типа с точностью измерения 0,01 мм. Экспериментальный образец защитного покрытия пригружался сверху равномерно распределенной по поверхности нагрузкой массой 3, 6 и 10 кг.

## **2.2. Приборы и оборудование, оценка точности измерений при проведении гидравлических исследований**

Для измерений гидравлических характеристик потока, применялись следующие основные и вспомогательные приборы: для измерения скоростей потока - трубка Пито; для определения отметок поверхности воды и элементов модели - шпитценмасштаб; для фиксации картин движения потока - фотоаппарат; для измерения расстояний - металлическая линейка и рулетка; секундомер; динамометр; индикатор часового типа.

Трубка Пито, применявшаяся для измерения скоростей потока, имела диаметр 3 мм, приёмные отверстия были диаметром 0,5 мм (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Картина движения потока на модели, где происходит измерение скоростей потока трубкой Пито

Назначение трубки Пито заключается в получении значения полной

энергии потока в точке, где происходит измерение.

**Оценка ошибки измерений скоростей потока.** В измеряемой точке удельную кинетическую энергию потока  $E_k = u^2/2g$  следует определять как разницу показаний статического и динамического пьезометров трубки Пито, где:  $u^2$  – местная скорость, дм/с;  $g$  – ускорение свободного падения, дм/с<sup>2</sup>.

Абсолютная ошибка измерений скоростей определяется как сумма точности показаний, снятых с двух пьезометров и точности установления мерной шкалы на этих пьезометрах [32, 106].

$$\delta_{E_k} = 0,1 + 0,1 + 0,1 = 0,3 \text{ мм.} \quad (2.1)$$

При этом предельную абсолютную ошибку определения местной скорости можно определить по формуле:

$$\delta_u = \sqrt{2g\delta_{E_k}} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,0003} \approx 0,076 \text{ м/с.} \quad (2.2)$$

В качестве примера, при максимальном значении местной скорости, равной 1,62 м/с, предельная ошибка для местных скоростей потока составит:

$$\overline{\delta_u} = \frac{\delta_u}{2,26} 100\% = \frac{0,076}{1,62} \cdot 100\% = 4,69\%. \quad (2.3)$$

Измерение уровней и глубин потока в мерных вертикалях осуществлялось с использованием шпитценмасштаба (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Измерение уровней воды шпитценмасштабом

**Ошибки измерения уровней и глубин потока.** С помощью

шпитценмасштаба глубины потока определялись как разность отсчетов между уровнем свободной поверхности потока и уровнем поверхности конструкции модели, например геомата. На шкале шпитценмасштаба устанавливался «ноль» с точностью 0,1 мм. С учетом колебаний уровней воды, которые вызываются наличием системы косых поверхностных волн из-за неровностей поверхности противоэрозионного материала – геомата, достоверность показаний шпитценмасштаба в среднем составили 0,1...0,2 мм.

По вертикали колебания косых волн достигали  $10 \div 15$  % от глубины потока, что влияло на точность определения глубин потока, которая составила 5...10%. В связи с этим, было принято решение об установлении 11 мерных вертикалей, что снизило ошибку измерений глубин на 3...5 % [25,27].

При определении пульсационных характеристик потока, на модели канала использовался комплекс приборов, который включал в себя:

- индукционный датчик давления ДД-10, применяемый для измерений пульсаций потока в случае малых глубин до 1,5 м. Он включал в себя мембрану, воспринимающую пульсационные нагрузки, которые в виде сигнала затем передавались по кабелю связи;

- микропроцессорный измеритель давления, задачей которого было снятие и обработка данных, полученных от индукционного датчика;

- цифровой запоминающий осциллограф (модель АСК-3107) для оцифровки сигналов, полученных от индукционного датчика давления с дальнейшей обработкой и отображением на компьютере (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Измерительное оборудование в комплекте для определения пульсационных характеристик потока

### **Ошибки измерения пульсационных характеристик потока.**

Появлялись при измерении и осреднении измеренных значений, измерении пульсационных характеристик. Для повышения точности получения величин пульсации проводились шестикратные измерения ( $n = 6$ ) и среднеквадратичная погрешность измерений определялась по формуле:

$$\delta_{max} = \sqrt{\frac{\sum x_i}{n-1}} = \sqrt{\frac{11,86}{5}} = 1,54. \quad (2.4)$$

Для шести измерений, используя критерий Шовенье, проводилось определение количества сомнительных результатов измерений пульсации. Среднеквадратичная погрешность определялась по формуле:

$$\xi = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1,54}{\sqrt{6}} = 0,64. \quad (2.5)$$

Определялся квантиль, с помощью таблицы квантилей распределения Стьюдента (коэффициентов Стьюдента). Определялось число степеней свободы:

$$k = n - 1 = 6 - 1 = 5. \quad (2.6)$$

Число степеней свободы, равное 5 квантиль (процентиль) будет равна  $t_{\alpha,k} = 2,015$  и при уровне значимости  $\alpha = 0,10$  (доверительной вероятности  $\alpha = 0,9$ ) [41].

При исследовании фильтрационных характеристик геомата основные измерения производились с помощью пьезометров.

**Ошибки измерения при проведении фильтрационных исследований.** Пьезометрический уклон определяется как разница показаний двух пьезометров, которые находятся в начале и в конце пути фильтрации, деленная на длину пути фильтрации, используя формулу.

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

Для определения абсолютной ошибки измерения пьезометрического уклона следует суммировать точность показаний пьезометров, шкалы пьезометрического щита, длин пути фильтрации.

$$\delta_H = 0,1 + 0,1 + 0,1 = 0,3 \text{ мм.} \quad (2.7)$$

При минимальном значении пути фильтрации  $l_{min} = 1,8$  см предельная абсолютная ошибка определения пьезометрического уклона:

$$\delta_u = \frac{2\delta_H}{1,8} = \frac{0,6}{1,8} \approx 0,33. \quad (2.8)$$

При максимальном значении пьезометрического уклона, равного  $J_{i,i+1} = 2,36$  предельная ошибка нахождения пьезометрического уклона:

$$\overline{\delta_u} = \frac{\delta_u}{2,36} 100\% = \frac{0,33}{2,36} \cdot 100\% = 13,9\%. \quad (2.9)$$

Напор  $h$  менялся в пределах от 289 до 405 мм, а при измерениях значения фильтрационного напора  $H_\phi$  изменялись в границах от 200 до 462 мм. Эти величины используем для нахождения предельной относительной ошибки определения расхода  $dQ/Q$ , по формуле:

$$\frac{dQ}{Q} = 2,5 \frac{dh}{h}. \quad (2.10)$$

Величины предельных относительных ошибок определяются по формулам:

$$d\overline{Q} = \frac{dQ}{Q} = 2,5 \frac{0,5}{289 \div 405} \cdot 100\% = (0,43 \div 0,3)\%. \quad (2.11)$$

$$d\overline{H}_\phi = \frac{dH_\phi}{H_\phi} = \frac{0,5}{200 \div 462} \cdot 100\% = (0,25 \div 0,1)\%. \quad (2.12)$$

Величина предельной относительной точности при определении коэффициента фильтрации осуществляется по формуле:

$$d\overline{K}_\phi = \frac{dK_\phi}{K_\phi} = d\overline{Q} + d\overline{H}_\phi = (0,43 \div 0,3 + 0,25 \div 0,1 = 0,68 \div 0,4)\%. \quad (2.13)$$

Величину предельной ошибки измерения коэффициента фильтрации с вероятностью 99,9% можно определить как  $3\sigma$  ( $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение измеряемого значения):

$$\sigma_{d\overline{K}_\phi} = \frac{d\overline{K}_\phi}{3} = \frac{0,68 \div 0,4}{3} = (0,22 \div 0,13)\%. \quad (2.14)$$

**Ошибки измерения сдвиговых параметров на модели.** Коэффициент трения определяется как разница силы трения (измеряется динамометром, точность 1 г) и модуля вектора силы (измеряется весами, точность 10 г). Абсолютная ошибка измерения сопротивления сдвигу определяется как сумма точности показаний измерительных приборов по формуле:

$$\delta_{\text{изм.}} = 1 + 10 = 11 \text{ г.} \quad (2.15)$$

Относительная ошибка вычисления коэффициента трения определяется при максимальном значении абсолютной ошибки:

$$\overline{\delta_u} = \frac{\delta_{\text{изм.}}}{0,99} 100\% = \frac{0,011}{0,99} \cdot 100\% = 1,11\%. \quad (2.16)$$

Для фиксации малых перемещений применялся индикатор часового типа, точность измерения которого составляла 0,01 мм, также использовалась металлическая линейка, с точностью 0,1 мм. В итоге 0,11 мм была предельная ошибка измерения перемещения. Входящие в предел возможности измерения индикатора часового типа, использовались измерения при расчёте коэффициента трения.

### **2.3. Методика экспериментальных исследований геомата с заполнителями**

На первом этапе была дана оценка гранулометрического состава заполнителя геомата – щебня с фракцией от 6 до 10 мм.

Сущность метода заключается в распределении и разделении зерен щебня на фракции путем просеивания пробы материала через набор соответствующих сит и определении полных остатков на каждом сите. Гранулометрический состав щебня с фракцией от 6 до 10 мм определялся после предварительной промывки материала для определения содержания пылевидных и глинистых частиц в его составе. При проведении испытания щебня должны соблюдаться следующие условия для помещений: температура воздуха  $(21 + 4)^\circ \text{C}$ ; относительная влажность воздуха не более

80 % [88].

Для получения гранулометрического состава пробу грунта (щебня) подвергают сушке при температуре  $(110 + 5)^\circ \text{C}$  до постоянной массы, после чего его взвешивают и затем просеивают через набор сит, которые располагаются по степени уменьшения размеров ячеек сверху вниз. Заканчивают процесс просеивания когда масса остатка на сите через одну минуту после процесса просеивания уменьшится не более чем на 1 %. Масса мерной пробы должна соответствовать значениям, приведенным в таблице 2.1 [87].

Таблица 2.1 – Масса мерной пробы [87]

Наибольший размер зерен, мм	Масса мерной пробы, г
90	80000–500
63	40000–250
31,5	10000–150
16	5000–100
8	2000–50

Опыт по изучению гранулометрического состава щебня с фракцией от 6 до 10 мм проводился в 3 этапа для более точного определения гранулометрического состава, чтобы не допустить потери материала.

Для этого была взята высушенная мерная проба щебня  $m=2000$  г. Насыпная плотность состава щебня с фракцией от 6 до 10 мм определялась с помощью весов и составляла  $1440 \text{ кг/м}^3$ . Сита располагались сверху вниз по степени уменьшения размеров ячеек, заканчивая поддоном. Размеры ячеек в ситах были установлены  $m_{i10}$ ,  $m_{i5}$ ,  $m_{i2,5}$ ,  $m_{i1,25}$ . Определение насыпной плотности щебня с фракцией от 6 до 10 мм представлено на рисунке 2.7.

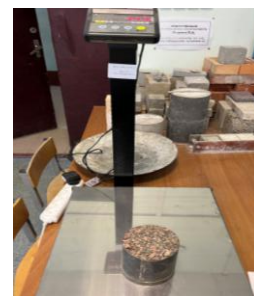


Рисунок 2.7– Определение насыпной плотности щебня с фракцией от 6 до 10 мм

Затем предварительно высушенную пробу высыпали на сито, сита были установлены в колонку. Просеивание производили ручным способом. После просеивания взвешивали остатки на каждом сите, вычисляли в процентах частные ( $a_{i10}$ ,  $a_{i5}$ ,  $a_{i2,5}$ ,  $a_{i1,25}$ ) и полные ( $A_{i10}$ ,  $A_{i5}$ ,  $A_{i2,5}$ ,  $A_{i1,25}$ ) остатки.

Частным остатком называют отношение массы не прошедших сквозь сито зерен к общей массе пробы заполнителя, выраженного в процентах (%).

Частные остатки, % определяются по формуле:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

Определение частных остатков пробы № 1:

$$a_{10} = \frac{240}{2000} \cdot 100\% = 12\%; \quad a_5 = \frac{1300}{2000} \cdot 100\% = 65\%;$$

$$a_{2,5} = \frac{430}{2000} \cdot 100\% = 22\%; \quad a_{1,25} = \frac{30}{2000} \cdot 100\% = 1\%.$$

Определение частных остатков пробы № 2:

$$a_{10} = \frac{270}{2000} \cdot 100\% = 13,5\%; \quad a_5 = \frac{1200}{2000} \cdot 100\% = 60\%;$$

$$a_{2,5} = \frac{488}{2000} \cdot 100\% = 24,4\%; \quad a_{1,25} = \frac{42}{2000} \cdot 100\% = 2,1\%.$$

Определение частных остатков пробы № 3:

$$a_{10} = \frac{275}{2000} \cdot 100\% = 13,75\%; \quad a_5 = \frac{1250}{2000} \cdot 100\% = 62,5\%;$$

$$a_{2,5} = \frac{428}{2000} \cdot 100\% = 21,3\%; \quad a_{1,25} = \frac{47}{2000} \cdot 100\% = 2,4\%.$$

Полным остатком называют сумму частных остатков на данном сите и на всех ситах с отверстиями большего размера.

Полные остатки определяются по формуле:

$$A_i = \sum a_i. \quad (2.18)$$

Определение полных остатков пробы №1:

$$A_{10} = a_{10} = 12\%,$$

$$A_5 = a_{10} + a_5 = 12\% + 65\% = 77\%,$$

$$A_{2,5} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} = 12\% + 65\% + 22\% = 99\%,$$

$$A_{1,25} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} + a_{1,25} = 12\% + 65\% + 22\% + 1\% = 100\%.$$

Определение полных остатков пробы № 2:

$$A_{10} = a_{10} = 13,5\%,$$

$$A_5 = a_{10} + a_5 = 13,5\% + 60\% = 73,5\%,$$

$$A_{2,5} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} = 13,5\% + 60\% + 24,4\% = 97,9\%,$$

$$A_{1,25} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} + a_{1,25} = 13,5\% + 60\% + 24,4\% + 2,1\% = 100\%.$$

Определение полных остатков пробы № 3:

$$A_{10} = a_{10} = 13,8\%,$$

$$A_5 = a_{10} + a_5 = 13,8\% + 62,5\% = 76,3\%,$$

$$A_{2,5} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} = 13,8\% + 62,5\% + 21,3\% = 97,6\%,$$

$$A_{1,25} = a_{10} + a_5 + a_{2,5} + a_{1,25} = 13,8\% + 62,5\% + 21,3\% + 2,4\% = 100\%.$$

Результаты определения частных остатков сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Частные остатки на ситах с размерами ячеек (мм)

Размеры ячеек, (мм)	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм
Проба №1, г	240	1300	430	30
Проба №2, г	270	1200	488	42
Проба №3, г	275	1250	428	47
Среднее, г	785	3750	1346	119

Для оценки зернового состава щебня по результатам просеивания был построен график полных остатков щебня на стандартных ситах, приведенный на рисунке 2.8.

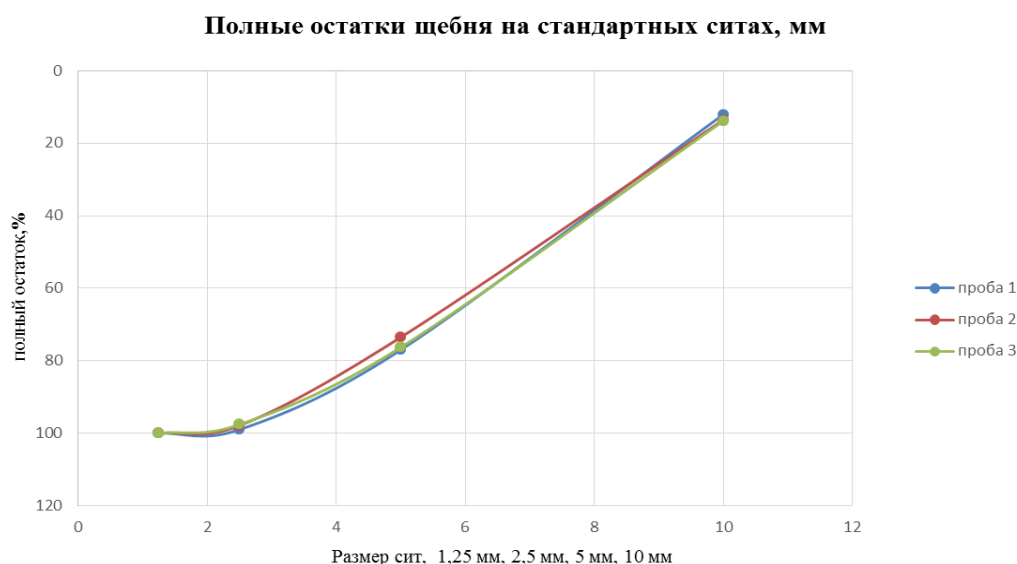


Рисунок 2.8 – График полных остатков щебня на стандартных ситах

Далее были изучены возможности смесей многолетних трав для формирования травостоя в условиях использования геомата с растительностью.

Для эксперимента было сделано четыре образца противозерозионного

покрытия с посевом разнообразных трав, которые находились в оттапливаемом помещении с постоянной температурой 16...20 °С. Образцы геомата укладывались на грунт основания, после укладки структура геомата заполнялась грунтом, который засеивался различными сортами семян многолетних трав [76,85]. Выбор семян базировался на рекомендациях ОДМ 218.2.064–2015 «Методы укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог посевом трав в различных климатических зонах» и анализе соответствующей научно-технической литературы. За основу брались рекомендации РОСДОРНИИ для противозерозионных полотен сухих откосов автодорог [80, 88].

**Первый образец (№1)** – семена рода райграс (*Arrhenatherum*), которые на первый год после посадки образуют густой газон, корневая система злака довольно мощная, сильно разветвленная, быстро проникает в почву и образует хорошую дернину. Стебли злака коленчато-восходящие или прямостоячие, в нижней части имеет достаточное количество листьев [42, 121].

**Во второй образец (№2)** – смесь трав, состоящая из: райграс пастбищный (*Lolium perenne*) – 50%, овсяница красная (*Festuca rubra*) – 15%, овсяница луговая (*Festuca pratensis*) – 20%, тимофеевка луговая (*Phleum pratense*) – 15%. Данные семена не требовательны к условиям произрастания. На первый год после посадки образуется густой газон, но побеги появляются на надземной части растения. В корневой системе можно увидеть только один узел [121].

**Третий образец (№3)** – трава вида овсяница красная (*Festuca rubra*), корневищно-рыхлокустовой, низовой, многолетний злак, образующий прочную дернину, вид не требователен к условиям произрастания, отличается значительной долговечностью, морозостойкий, засухоустойчив, обладает высокой конкурентоспособностью [120].

**Четвертый образец (№4)** – мятлик луговой (*Poa pratensis*),




многолетний корневищный, рыхлокустовой низовой злак, в год посева растет медленно, вследствие преобладания низкорослых вегетативных побегов при скашивании сохраняет значительно большую листовую поверхность [121].










В процессе исследований за образцами велось визуальное наблюдение, с целью изучения особенностей формирования травостоя для дальнейшего применения противозерозионного покрытия.

Лучшие показатели получены у трех образцов, которые отличались равномерной густотой: № 1, райграсс; № 2 смесь трав и № 3 овсяница красная.

Высота всех образцов травостоя в первые дни сильно не отличалась, в последующем высота травостоя стала меняться: смесь трав стала увеличиваться каждый день на 5 мм – 10 мм, райграсс стал увеличиваться на 10 мм, овсяница красная на 10 мм, мятлик луговой на 3 –5 мм. В конце опыта высота травостоя четырех образцов соответствовала: райграсс и смесь трав на 135–140 мм, овсяница красная на 70 мм, мятлик луговой не превысил 45 мм, затем рост травостоев вовсе остановился. Результаты исследований представлены в таблице 2.3 [46, 121].

Таблица 2.3 – Результаты исследования образцов многолетних трав [46, 121]

Номер образца	Внешний вид, день вегетации при высоте травостоя		
	5 день	11 день	18 день
№1.	 25–30 мм	 100 мм	 125–140 мм

Номер образца	Внешний вид, день вегетации при высоте травостоя		
	5 день	11 день	18 день
№2.	 27 мм	 110–120 мм	 140 мм
№3.	 30 мм	 35–47 мм	 70 мм
№4.	 10–15 мм	 23–28 мм	 45 мм

По результатам анализа материалов эксперимента, получен график изменения высоты травостоя в вегетационный период, приведенный на рисунке 2.9. Для сравнения состояния корневой системы после проведения опытов были сделаны разрезы всех четырех образцов. Отметим, что при проведении эксперимента, продолжительность которого составляла 18 дней, прекращение вегетации к завершению эксперимента отмечалось у всех четырех образцов.

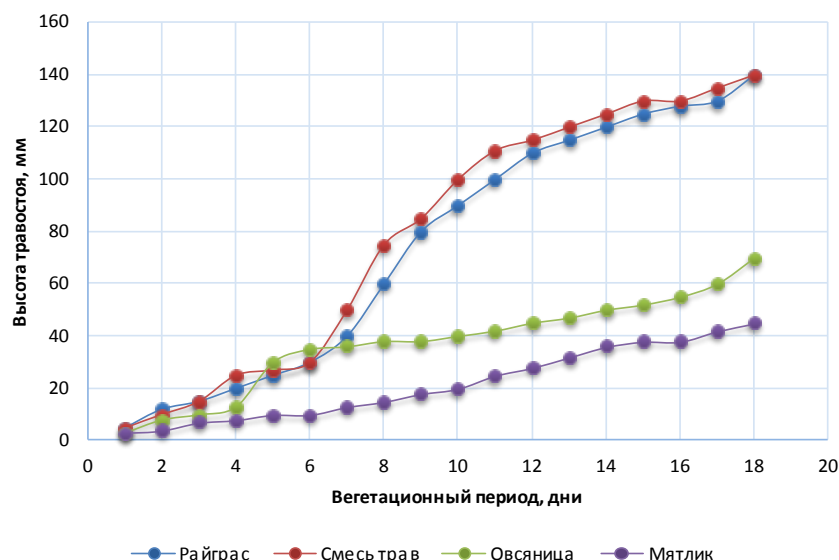
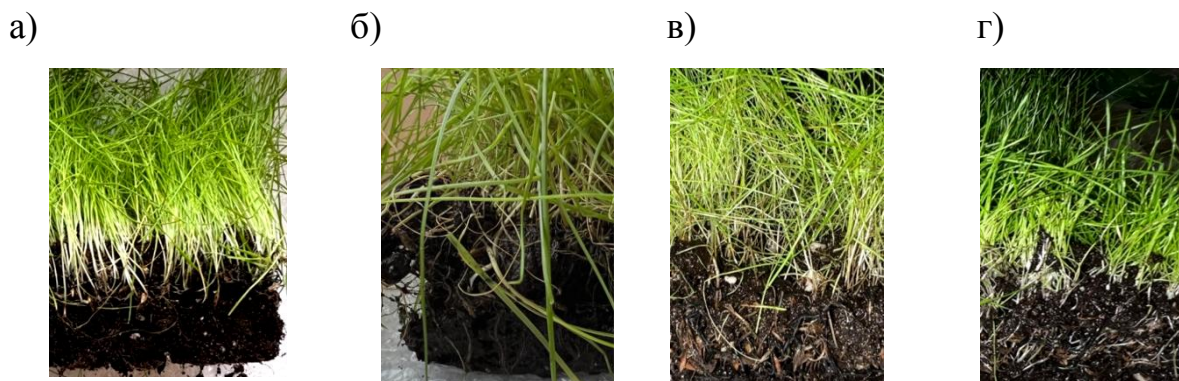


Рисунок 2.9 – Изменение высоты травостоя в вегетационный период

После прекращения вегетации смесь трав (образец № 2) стал ухудшать свои свойства, по сравнению с другими образцами. На рисунке 2.10 представлены разрезы корневой системы образцов противозерозионного материала геомата.



а – № 1, райграс; б – № 2 смесь трав; в – № 3 овсяница красная; г – мятлик луговой

Рисунок 2.10 – Разрезы корневой системы образцов

По результатам оценки корневой системы получено:

– образец №1 – за счёт армирующего свойства геомата грунт, находящийся в структуре, не рассыпается, корни обвивают нити геомата и надёжно фиксируют грунт в его структуре, образец так же обладает значительной связностью, плотностью и упругостью;

– образец №2 – заметно худшие свойства по сравнению с другими видами образцов, наблюдаемая корневая система характеризуется как поверхностная, тонкая, разветвленная, непрочная, корни не полностью обвивают нити геомата и хуже фиксируют грунт в его структуре;

– образец № 3 – видно, что дернина обладает значительной связностью, плотностью и упругостью, корни обвивают нити геомата и тем самым обеспечивают дернине прочность и надёжно фиксируют грунт в структуре геомата, отметим, что образец – корневищно-рыхлокустовой, низовой, многолетний злак;

– образце №4 – образует ровный, однородный травостой, корневая система обвивает нити геомата, но не полностью, листовая пластинка не очень тонкая, как № 3, но и не такая грубая, как у № 1, в год посева растет медленно.

Анализируя полученные данные, можно сделать заключение, что образец №1 с семенами трав райграс и образец №3 с семенами трав овсяница красная в период эксперимента проявили себя наилучшим образом. У данных образцов хорошо развита корневая система, благодаря чему корни растений хорошо обвивают нити геомата и более надёжно фиксируют грунт в структуре покрытия, также эти образцы обладают значительной связностью, плотностью и упругостью.

Учитывая вышеизложенное, было решено основную часть экспериментальных исследований проводить с использованием покрытия из травы рода райграс (образец №1).

При проведении исследований, посвященных гидравлическим задачам, рассматривались два варианта противоэрозионного покрытия: геомат с наполнителем из щебня и геомат с наполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс.

Первый вариант представлял собой геомат с наполнителем из щебня. В этом случае был подобран гранулометрический состав щебня из условия,

чтобы пустоты в структуре геомата были заполнены полностью. На рабочем участке экспериментальной установки длиной 4,9 м (рисунок 2.1) был сформирован фрагмент канала с поперечным сечением в виде прямоугольной трапеции [62, 66]. Вертикальный борт канала был обшит листами из гладкой глянцевой пластмассы для уменьшения сил трения и исключения влияния неровности обшивки борта на структуру потока. Перед тем, как укладывался геомат, дно и откос канала были накрыты армирующей сеткой для улучшения сцепления с сечением проволоки 1 мм и с ячейками 1x1см [41, 53, 54, 104]. На рисунке 2.11 показаны фрагменты канала трапецеидального поперечного сечения с креплением, состоящим из геомата с наполнителем из щебня.

Для исследования были приняты уклоны и расходы, исходя из условий движения частиц щебня по дну (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Значения уклона и расхода воды на модели канала, полученные исходя из условий движения частиц щебня по дну

Уклон дна, $i$	Расход, $Q$ л/с
0,001	43,7 84,33 128,03
0,0087	43,7 84,33 128,03
0,010	43,7 84,33
0,017	43,7

а)



б)



в)



а – армирующая сетка с ячейками 1х1см; б – геомат без заполнителя;  
в – геомат с заполнителем в виде щебня

Рисунок 2.11– Рабочий участок фрагмента канала с покрытием из геомата с заполнителем в виде щебня

Второй вариант – геомат с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс. Проведение этого эксперимента осуществлялось на той же модели, использовалась аналогичная методика [41, 53, 54, 104].

Перед укладкой геомата, был уложен гумусный растительный грунт толщиной 14 мм, на откос канала для лучшего сцепления грунта с откосом была уложена сетка с сечением проволоки 1 мм и ячейками 1х1см, затем уложенный слой грунта увлажнялся для исключения его сползания вниз. Высев семян на гумусный слой выполнялся из расчета 100 г на 1 м<sup>2</sup>. После чего семена были увлажнены и закрыты слоем грунта толщиной 7...8 мм с укаткой, далее вся засеянная площадь была увлажнена.

На рисунке 2.12 показан фрагмент канала с поэтапным формированием покрытия от укладки гумусового растительного грунта, высевом семян и последующим периодом формирования растительного покрова в процессе вегетации. По завершению подготовки варианта покрытия, отвечающего условиям эксперимента, в лоток подавалась вода с расчетным расходом, после установления расчетного режима проводились замеры скоростей в соответствии с общепринятыми методиками.

С учётом изменяющейся высоты растительности  $h_{раст} = 50$  мм, 100 мм, 150 мм для проведения исследований были подобраны уклоны и расходы, представленные в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Значения уклона и расхода воды на модели канала, исходя от высоты растительности

Уклон дна, $i$	Расход, $Q$ л/с	Высота растительности $h_{раст}$ , мм
0,010	43,70 84,33 128,03	150
	43,70 84,33	100
	43,70	50
0,017	43,70 84,33 128,03	150
	43,70 84,33	100
	43,70	50
0,030	43,70 84,33	100
	43,70	50

а)



б)



в)



г)



д)



е)



а – растительный грунт; б – высев семян травы;  
в – в день посадки травы; г – через 5 дней; д – через 10 дней; е – через 20 дней

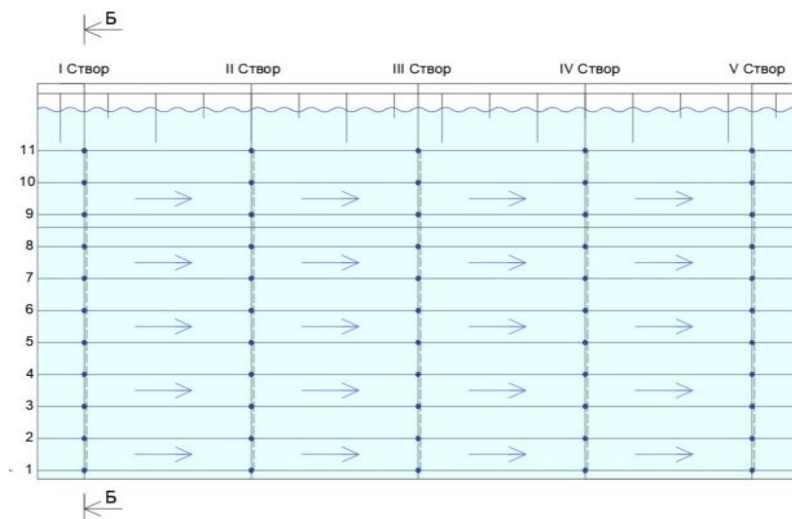
Рисунок 2.12 – Технология устройства и динамика формирования растительного покрова в канале

На рабочем участке лотка были выбраны пять поперечных створов, которые располагались на расстояниях 210, 307, 407, 507 и 636 см от начала рабочего участка, выполнялись замеры скоростей потока, на 11 вертикалях расположенных на расстояниях 20, 90, 160, 230, 300, 370, 440, 510, 580, 650, и 710 мм от вертикальной стенки лотка, на вертикали замеры скоростей производились в шести точках по глубине потока [50, 62, 67].

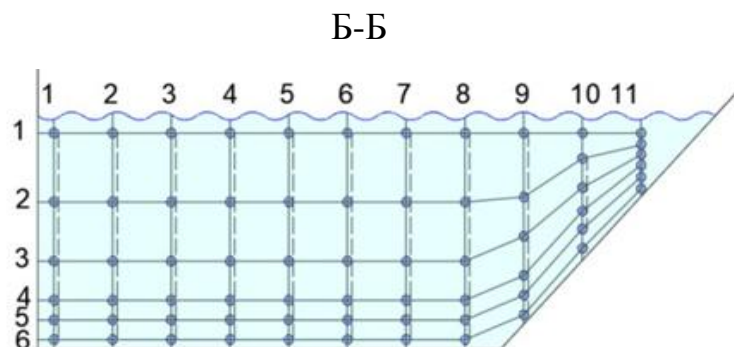
На рисунке 2.13 показано размещение точек, в которых осуществлялись замеры скоростей потока.

После обработки полученных данных были построены эпюры скоростей, анализ которых с помощью численного интегрирования позволил определить коэффициент Кориолиса  $\alpha$  на каждой вертикали.

а)



б)



а – створов и вертикалей; б – точек в поперечном сечении

Рисунок 2.13 – Схема расположения створов, вертикалей и точек для определения скоростей потока модели канала

При обработке результатов замеров использовались нижеприведенные зависимости.

Площадь живого сечения лотка  $\omega$  и смоченный периметр  $\chi$  находились по формулам [15, 56, 115]:

$$\omega = \frac{1}{2} h_{\text{cp}} \cdot (B + b) \text{ и } \chi = b + h_{\text{cp}}(1 + \sqrt{1 + m^2}). \quad (2.19)$$

где:  $h_{\text{cp}}$  – средняя глубина потока в рассматриваемом сечении, дм;

$B$  – ширина лотка по поверхности потока, дм;

$b$  – ширина дна лотка, дм;

$m$  – заложение откоса,  $m = 1$ .

Средняя глубина потока была получена после обработки данных по формуле:

$$h_{\text{cp}} = \frac{\int_0^h h \cdot db}{b}. \quad (2.20)$$

Удельная энергия потока была определена по формуле [14,71]:

$$E = Z + \frac{\bar{p}}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}. \quad (2.21)$$

где:  $Z$  – расстояние от нижней точки рассматриваемого сечения до плоскости сравнения;

$\frac{\bar{p}}{\gamma}$  – (статический) напор;

$\gamma$  – удельный вес жидкости  $\gamma = 1 \text{ т/м}^3$ ;

$\frac{u^2}{2g}$  – скоростной напор.

В зависимости от уклона канала энергия положения  $Z$  определяется по формуле:

$$Z = (x_0 - x) \cdot i. \quad (2.22)$$

где:  $x_0$  – расстояние от начала оси  $x$  до сечения, через которое проходит плоскость сравнения, дм;

$x$  – расстояние до рассматриваемого сечения, дм;

$i$  – уклон дна лотка.

Удельная энергия сечения определяется по формуле:

$$e = z + \frac{\bar{p}}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}. \quad (2.23)$$

Энергию для плавно изменяющегося потока можно определить по формуле:

$$e = h + \frac{u^2}{2g}. \quad (2.24)$$

Чтобы найти коэффициент Кориолиса использовалась формула [2,83]:

$$\alpha = \frac{\int_0^h \frac{u^3}{2g} dz}{\frac{V^2}{2g} q}. \quad (2.25)$$

или после преобразования

$$\alpha = \int_0^1 \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{\Delta u}{v} \right)^2 \right] \cdot d\bar{z} \approx 1 + 3 \cdot \sum_0^n \left( 1 - \frac{u}{V} \right)^2. \quad (2.26)$$

где:  $n$  – количество точек на аппроксимированной эпюре скоростей.

Среднее значение коэффициента Кориолиса по сечению потока определялось по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} \approx \frac{\sum_0^n \alpha \cdot q \cdot \Delta b}{Q}. \quad (2.27)$$

где:  $\Delta b$  – расстояние между мерными вертикальными створами.

Полная удельная энергия потока определяется по формуле [2]:

$$E_x = (x_0 - x) \cdot i + h + \alpha \cdot \frac{V^2}{2g}. \quad (2.28)$$

Между рассматриваемыми сечениями для нахождения гидравлического уклона применялась зависимость:

$$J = \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{E_{i+1} - E_i}{x_{i+1} - x_i}. \quad (2.29)$$

С учетом (2.17) находится гидравлический радиус  $R$  [60, 69]:

$$R = \frac{\omega}{x} = \frac{b \cdot h_{\text{ср}}}{b + 2 \cdot h_{\text{ср}}}. \quad (2.30)$$

Для оценки состояния потока на исследуемых участках определялось число Фруда по формуле [10]:

$$Fr = \frac{\alpha_i \cdot v_i^2}{g \cdot h_i} \quad (2.31)$$

Диапазон чисел Фруда составил для покрытия из геомата с наполнителем из щебня  $Fr = 0,36...2,34$ , а для покрытия из геомата, заполненный щебнем с посевом многолетних трав рода райграс  $Fr = 0,32...2,81$ , т. е. спокойный поток.

**Изучение пульсационных характеристик.** На рабочем участке экспериментальной установки для определения гидродинамических характеристик, было выполнено измерение пульсационных характеристик потока крепления, выполненного из геомата с наполнителем из щебня. Для измерения пульсационных характеристик были выбраны места с целью оценки влияния пульсаций на устойчивость покрытия: под креплением и на одном уровне с поверхностью исследуемого материала. Датчики были установлены на расстоянии 3570 мм от начала рабочего участка в одном створе на дне и на откосе на расстоянии 45 мм от дна [61]. На рисунке 2.14 показаны места расположения датчиков. При статическом нагружении, изначально проводилась тарировка датчика. Устанавливалась в трубке мембрана в одной плоскости с поверхностью воды, которая находилась в верхней плоскости датчика. Плоскость с нулём шкалы тарированного стенда совпадала. С шагом 50 мм проводилось постепенное увеличение напора в трубке. При увеличении напора в диапазоне от 0 до 50 мм проводилась фиксация показаний. Тарировка проводилась в обратном направлении от максимальной точки до нуля шкалы, это необходимо для проверки исправной работы датчика. Время замера составляло 120 секунд. Затем проводилась тарировка при динамическом пригрузении. Для создания условий колебаний потока, который должен соответствовать колебаниям потока в лотке установки на тарировочном стенде применялся мотор-редуктор. Характеристики колебаний составляли: диапазон от 0,5 гц и больше, амплитуда величиной 10 мм, частота колебаний регулировалась используя блок питания с изменением подаваемого напряжения. Методика

проведения тарировки датчика была аналогичной методике статического нагружения.

а)



б)



в)



г)



а – под покрытием на дне; б – под покрытием на откосе; в – на дне на одном уровне с покрытием; г – на откосе на одном уровне с покрытием

Рисунок 2.14 – Расположения датчика ДД-10 на модели

Для нахождения нулей и коэффициентов пересчёта, проводилась тарировка датчика ДД–10 перед началом и в конце серий опытов на тарировочном стенде, приведенном на рисунке 2.15.

а)

б)



а – статическое нагружение; б – динамическое нагружение

Рисунок 2.15 – Тарированный стенд

Тарировка датчика проводилась в конце серии опытов, это необходимо для контрольной проверки работы измерительного оборудования [27, 41, 62].

После тарировки датчика был построен график, связывающий напор и показания датчика в милливольтках, показанный на рисунке 2.16.

При трех разных расходах, но с одним и тем же уклоном лотка проводились измерения пульсаций с помощью одного датчика. Последовательность измерения была следующая: сначала измерялись пульсационные характеристики под покрытием, затем в покрытии выполнялось отверстие над расположением датчика, а далее измерялись характеристики пульсации на поверхности покрытия. При этом осуществлялось измерения скорости потока, используя трубку Пито и пьезометры. Одновременно с помощью трубки Пито и пьезометров проводились измерения скорости потока. Положение поверхности потока измерялось с помощью шпитценмасштаба.

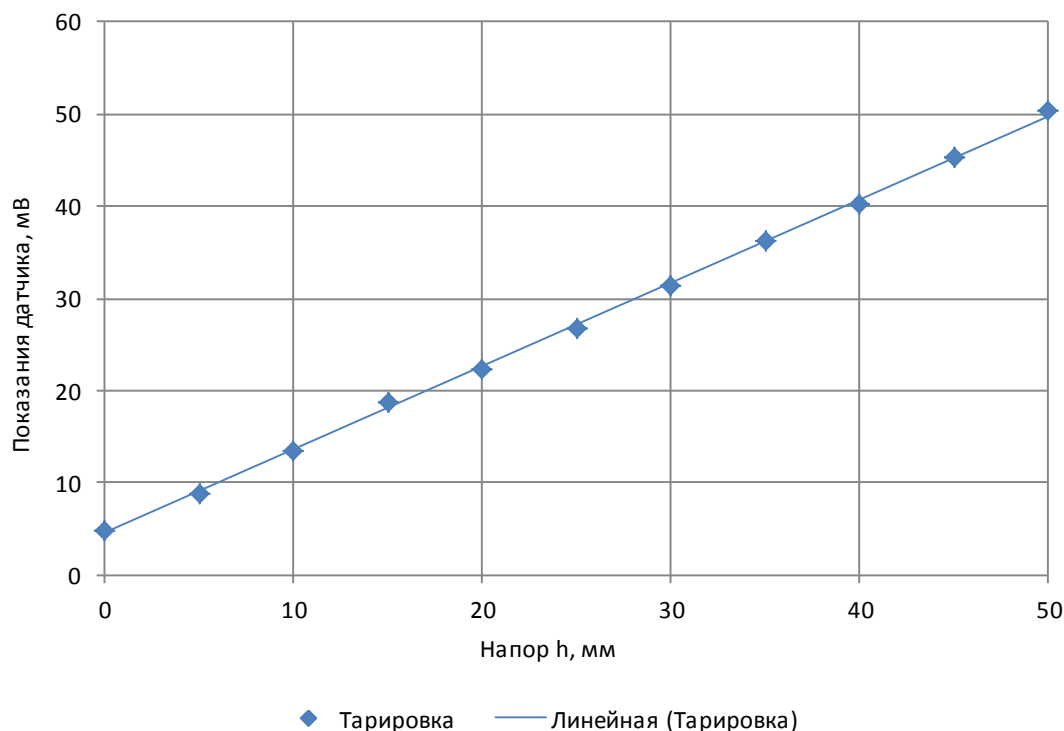


Рисунок 2.16 – График тарировки датчика для случая статического нагружения

Зависимость, характеризующая показания датчика на рисунке 2.16 носит линейный характер, поэтому она была аппроксимирована линейной функцией. Проводился перевод значений, которые были получены с датчика с помощью тарировочного графика из милливольт в миллиметры.

**Изучение фильтрационных показателей материала.** Для определения фильтрационных показателей используемый в экспериментах материал геомат с наполнителем из щебня был разделен на образцы с размерами 100 x 100 мм. В соответствии с внутренним размером прибора Дарси [36].

На опорной решетке прибора последовательно располагались слои образцом геомата. Чтобы избежать фильтрации воды между боковыми гранями образцов каждого слоя и стенками прибора, была выполнена герметизация изолирующим материалом. Чтобы провести измерение пьезометрического напора, в стенках были выполнены отверстия для вставки пьезометрических трубок. При этом, с одной стороны прибора отверстия

размещались между слоями, а с другой – внутри слоя. В прибор вода с температурой 10°C подавалась с помощью шланга, на котором стоял регулятор расхода, что позволило определить параметры фильтрации при напорах на модели от 200 до 462 мм.

Исследования для получения фильтрационных характеристик материала защитного покрытия (геомат с наполнителем из щебня) осуществлялось для напорного и безнапорного режимов фильтрации.

Для создания напорного режима фильтрации образцы исследуемого материала, находящиеся в приборе, опускались ниже уровня воды в водоотводящем резервуаре, имеющем мерный водослив. Разность между уровнями воды в приборе и резервуаре считается действующим напором.

Для создания безнапорной свободной фильтрации прибор с образцами размещался выше уровня воды в резервуаре [36, 41]. Для каждого режима фильтрации было выполнено по 8 серий замеров, включающих изменение напора над материалом от максимального до минимального. Потери напора по длине фильтрационного потока определялись по показаниям соответствующих пьезометров, которые измеряли давление внутри слоев и между слоями исследуемого материала.

**Изучение характеристик трения.** В исследованиях использовался один фрагмент геомата с наполнителем из щебня. Эксперимент выполнялся в два этапа.

На первом этапе в экспериментальную установку был послойно засыпан песчаный не насыщенный водой грунт. Затем разравнивался и уплотнялся этот песчаный грунт, на поверхность которого укладывался фрагмент покрытия. Этот фрагмент через динамометр и ролик прикреплялся к площадке, на которую устанавливались грузы с постепенным увеличением веса, при этом увеличивалась горизонтальная нагрузка на фрагмент покрытия [38, 41].

В процессе проведения опыта фиксировались перемещения фрагмента

покрытия, фиксация начальных перемещений производилась с помощью индикатора часового типа. Для измерения перемещений вне пределов измерений с помощью индикатора часового типа использовалась стальная линейка с делением 0,1 мм. Фиксация величины сдвигающей силы происходила после стабилизации показаний динамометра.

Методика проведения второго этапа эксперимента была аналогичной, также находилась весовая влажность грунта. На втором этапе перед началом эксперимента для насыщения песчаного грунта водой в установку подавалась вода. Влажность грунта оставалась постоянной на всем протяжении эксперимента благодаря тому, что внутренняя часть установки закрывалась полиэтиленовой пленкой.

Во время проведения эксперимента вариант покрытия из геомата, заполненного щебнем, дополнительно пригружался равномерно распределенной вертикальной нормальной нагрузкой, для чего использовался песчаный грунт, который был упакован в прямоугольную форму по размерам образца.

### **Выводы по главе**

1. Анализ предшествующих исследований позволил разработать лабораторную установку в виде фрагмента канала, методику проведения экспериментальных исследований геосинтетического защитного покрытия, состоящего из геомата с наполнителем из щебня и комбинации щебнем с посевом многолетних трав рода райграс. В процессе исследований рассмотрены варианты и дана оценка используемых материалов – отдельно щебня и травяного покрова.

2. Разработана методика гидравлических исследований на рабочем участке фрагмента канала, дно и откосы которого имеют покрытие предлагаемыми материалами, целью которых было изучение кинематических характеристик движения воды и определение гидравлических

сопротивлений, а именно коэффициента шероховатости.

Изучение пульсационных характеристик потока проводилось на экспериментальной установке с использованием измерительного комплекса, включающего микропроцессорный измеритель давления в комплекте с индукционным датчиком давления ДД-10, регистратор сигналов АСК-3107 с выводом информации на компьютер.

3. Оценка фильтрационных характеристик защитного крепления из геомата с заполнителем из щебня, осуществлена на установке, разработанной и выполненной с учетом реальных условий работы исследуемого элемента и получения достоверных данных о возможностях применяемого материала.

4. Для определения характеристик сопротивления на сдвиг использовалась установка, соответствующая натурным условиям работы сооружения, что позволило определить коэффициенты трения геомата с заполнителем из щебня, лежащего на песчаном грунте, находящемся в насыщенном и ненасыщенном водой состоянии. Образец испытывался при наличии вертикальной нагрузки, а также и без нее.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГЕОМАТА С ВАРИАНТАМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Гидравлические исследования включали проведение серии опытов по оценке кинематических характеристик потока для определения коэффициента сопротивления покрытия канала из геомата с исследуемыми вариантами заполнителя и воздействия пульсации потока на покрытие.

#### 3.1. Результаты исследований по определению коэффициента шероховатости покрытия из геомата с заполнителем из щебня

По полученным результатам экспериментальных исследований на модели участка канала с креплением из геомата с заполнителем из щебня, получены кинематические характеристики потока, которые позволили рассчитать коэффициент шероховатости для исследуемого крепления канала в пяти мерных створах, которые приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты обработки измерения кинематических характеристик потока в русле канала с креплением из геомата с заполнителем из щебня

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
Уклон лотка $i = 0,001$					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,207	1,122	1,120	1,074	0,998
Скорость потока $V$ , дм/с	5,506	5,876	5,900	5,981	6,749
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,819	0,779	0,778	0,755	0,715
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,115	1,110	1,054	1,047	1,09
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,023	2,052	2,063	2,084	2,119
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,952	2,801	2,632	2,442	2,119
Гидравлический уклон $J$	-	0,001	0,001	0,002	0,002
Расход $Q$ , л/с	43,767	43,811	43,807	43,829	43,855
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,733	1,712	1,688	1,659	1,600

Продолжение таблицы 3.1

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Скорость потока $V$ , дм/с	7,345	7,407	7,476	7,670	7,944
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,031	1,024	1,023	1,005	0,983
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,150	1,130	1,103	1,136	1,09
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,612	2,634	2,653	2,670	2,679
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,342	3,228	3,056	2,872	2,679
Гидравлический уклон $J$	-	0,001	0,001	0,002	0,001
Расход $Q$ , л/с	84,467	84,365	84,404	84,37	84,603
$Q_{cp} = 128,03$ л/с					
Глубина $H$ , дм	2,329	2,290	2,267	2,254	2,053
Скорость потока $V$ , дм/с	8,273	8,477	8,548	8,625	9,637
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,217	1,206	1,200	1,196	1,137
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,013	1,014	1,013	1,012	1,011
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,883	2,893	2,905	2,910	2,926
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,637	3,421	3,295	3,118	2,926
Гидравлический уклон $J$	-	0,002	0,001	0,001	0,001
Расход $Q$ , л/с	128,14	128,17	128,09	128,16	128,07
Уклон лотка $i = 0,0087$					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,102	1,060	1,059	1,037	1,028
Скорость потока $V$ , дм/с	5,888	6,108	6,200	6,216	6,223
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,767	0,747	0,746	0,736	0,732
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,034	1,016	1,010	1,012	1,007
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,306	2,361	2,406	2,443	2,502
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,330	3,238	3,150	3,090	2,502
Гидравлический уклон $J$	-	0,009	0,008	0,006	0,004
Расход $Q$ , л/с	42,60	43,65	43,95	43,10	42,95
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,497	1,491	1,458	1,403	1,400
Скорость потока $V$ , дм/с	8,397	8,438	8,688	8,884	9,050
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,943	0,940	0,927	0,905	0,903
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,014	1,003	1,004	1,009	1,002
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,609	2,632	2,703	2,756	2,878
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,682	3,612	3,523	3,432	2,878
Гидравлический уклон $J$	-	0,007	0,008	0,009	0,004
Расход $Q$ , л/с	83,64	84,03	85,91	84,66	84,59

Продолжение таблицы 3.1

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
$Q_{cp} = 128,03$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,806	1,789	1,761	1,734	1,700
Скорость потока $V$ , дм/с	10,987	11,135	11,434	11,524	11,746
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,057	1,051	1,041	1,032	1,02
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,001	1,002	1,005	1,008	1,007
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,824	2,871	2,891	2,896	2,958
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,789	3,734	3,653	3,525	2,958
Гидравлический уклон $J$	-	0,005	0,009	0,009	0,004
Расход $Q$ , л/с	128,35	128,88	130,30	128,67	129,14
Уклон лотка $i = 0,010$					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,194	1,177	1,176	1,168	1,155
Скорость потока $V$ , дм/с	5,826	6,127	6,223	6,356	6,579
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,813	0,805	0,804	0,801	0,794
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,110	1,151	1,163	1,13	1,126
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,010	2,034	2,076	2,111	2,143
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,477	2,458	2,457	2,328	2,143
Гидравлический уклон $J$	-	0,010	0,010	0,012	0,014
Расход $Q$ , л/с	43,31	43,63	43,66	43,74	43,76
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,496	1,435	1,393	1,374	1,307
Скорость потока $V$ , дм/с	8,442	8,741	8,969	9,145	9,491
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,942	0,918	0,900	0,892	0,864
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,149	1,159	1,145	1,139	1,134
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,058	2,084	2,126	2,188	2,210
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,858	2,730	2,552	2,428	2,210
Гидравлический уклон $J$	-	0,013	0,017	0,012	0,016
Расход $Q$ , л/с	84,42	84,47	84,64	84,60	84,77
Уклон лотка $i = 0,017$					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,144	1,120	1,082	0,975	0,923
Скорость потока $V$ , дм/с	5,899	6,058	6,314	6,937	7,356
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,789	0,778	0,759	0,705	0,677
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,062	1,069	1,012	1,001	1,002
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,575	2,626	2,653	2,773	2,901
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,628	3,435	3,289	3,105	2,901
Гидравлический уклон $J$	-	0,019	0,014	0,018	0,015
Расход $Q$ , л/с	43,71	43,75	43,81	43,72	43,95

Результаты измерения скоростей потока в виде эпюр представлены в приложении А, результаты обработки данных эксперимента в приложении Б, графики изменения по длине лотка основных характеристик потока, представлены в приложении В.

Расчёт коэффициента шероховатости в формуле Шези выполнялся по известным в гидравлике формулам Е. Гангилье и В. Куттера, Р. Маннинга и Н.Н. Павловского, преобразованным к условиям экспериментов в виде [21, 55, 57, 68, 90]:

$$\text{Гангилье-Куттера} \quad n_{Г-К} = \frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - V \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot V} + \sqrt{\left(\frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - V \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot V}\right)^2 + \frac{R \cdot \sqrt{J}}{23 \cdot V}} \quad (3.1)$$

$$\text{Маннинга} \quad n_M = \frac{R^{2/3} \cdot \sqrt{J}}{V} \quad (3.2)$$

$$\text{Павловского} \quad n_{П} = \frac{R^{0,37+2,5\sqrt{n}-0,75\sqrt{R}(\sqrt{n}-0,1)}}{V} \cdot \sqrt{J} \quad (3.3)$$

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

При условии  $J > 0,005$ , возможно использование формулы Гангилье-Куттера, при соблюдении условия (3.4) возможно использовать формулы Маннинга и Н.Н. Павловского:

$$Re_R = \frac{VR}{\nu} \geq 2500. \quad (3.4)$$

где:  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Числа Рейнольдса определялись по формуле (3.4) и величины находились в промежутке: геомат с заполнителем из щебня:  $Re_R = 63120 \div 133250$ .

Результаты расчётов по определению коэффициента шероховатости, базирующиеся на экспериментальных данных, отражены в таблицах 3.2-3.4.

Таблица 3.2 – Результаты определения коэффициента шероховатости по формулам (3.1), (3.2) и (3.3) при уклоне  $i = 0,001$ ,  $i = 0,0087$  и расходах крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$			$Q = 128,03 \text{ л/с}$		
Уклон лотка $i = 0,001$									
1-2	0,0211	0,0215	0,0214	0,0216	0,0219	0,0218	0,0217	0,0224	0,0221
1-3	0,0211	0,0213	0,0215	0,0219	0,0223	0,0224	0,0219	0,0229	0,0224
1-4	0,0221	0,0229	0,0227	0,0217	0,0221	0,0219	0,0217	0,0228	0,0219
1-5	0,0222	0,0228	0,0224	0,0224	0,0229	0,0225	0,0218	0,0224	0,0221
2-3	0,0217	0,0225	0,0221	0,0223	0,0228	0,0226	0,0221	0,0228	0,0225
2-4	0,0217	0,0220	0,0219	0,0218	0,0229	0,0221	0,0220	0,0229	0,0226
2-5	0,0220	0,0225	0,0221	0,0218	0,0229	0,0224	0,0220	0,0229	0,0225
3-4	0,0221	0,0228	0,0223	0,0213	0,0224	0,0218	0,0221	0,0228	0,0226
3-5	0,0226	0,0229	0,0227	0,0220	0,0223	0,0221	0,0222	0,0229	0,0225
4-5	0,0219	0,0228	0,0226	0,0218	0,0227	0,0224	0,0219	0,0224	0,0223
Уклон лотка $i = 0,0087$									
1-2	0,0217	0,0224	0,0219	0,0220	0,0228	0,0225	0,0219	0,0228	0,0228
1-3	0,0218	0,0223	0,0220	0,0217	0,0225	0,0221	0,0220	0,0229	0,0224
1-4	0,0217	0,0223	0,0220	0,0216	0,0229	0,0223	0,0221	0,0229	0,0227
1-5	0,0214	0,0224	0,0216	0,0211	0,0226	0,0221	0,0216	0,0223	0,0217
2-3	0,0216	0,0221	0,0219	0,0218	0,0228	0,0220	0,0219	0,0227	0,0226
2-4	0,0210	0,0229	0,0218	0,0217	0,0224	0,0222	0,0217	0,0227	0,0225
2-5	0,0210	0,0221	0,0215	0,0219	0,0227	0,0221	0,0218	0,0226	0,0221
3-4	0,0214	0,0222	0,0218	0,0215	0,0221	0,0217	0,0217	0,0228	0,0219
3-5	0,0215	0,0219	0,0221	0,0220	0,0229	0,0226	0,0216	0,0229	0,0225
4-5	0,0219	0,0229	0,0221	0,0216	0,0226	0,0218	0,0218	0,0225	0,0223

Таблица 3.3 – Расчет коэффициента шероховатости по формулам (3.1), (3.2) и (3.3) при уклоне  $i = 0,010$  и расходах крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$		
Уклон лотка $i = 0,010$						
1-2	0,0217	0,0228	0,0225	0,0210	0,0228	0,0226
1-3	0,0212	0,0229	0,0224	0,0215	0,0228	0,0223
1-4	0,0211	0,0228	0,0226	0,0218	0,0229	0,0222
1-5	0,0223	0,0229	0,0227	0,0224	0,0228	0,0226
2-3	0,0222	0,0229	0,0225	0,0225	0,0229	0,0227
2-4	0,0219	0,0226	0,0222	0,0222	0,0228	0,0225
2-5	0,0217	0,0225	0,0221	0,0219	0,0229	0,0225
3-4	0,0220	0,0226	0,0224	0,0223	0,0227	0,0225
3-5	0,0218	0,0227	0,0223	0,0218	0,0226	0,0224
4-5	0,0216	0,0228	0,0221	0,0219	0,0228	0,0221

Таблица 3.4– Расчет коэффициента шероховатости по формулам (3.1), (3.2) и (3.3) при уклоне  $i = 0,017$  и расходе крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{z-k}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$		
Уклон лотка $i = 0,017$			
1-2	0,0219	0,0227	0,0226
1-3	0,0225	0,0231	0,0229
1-4	0,0226	0,0232	0,0229
1-5	0,0221	0,0229	0,0223
2-3	0,0219	0,0229	0,0221
2-4	0,0220	0,0228	0,0225
2-5	0,0221	0,0229	0,0224
3-4	0,0223	0,0227	0,0225
3-5	0,0223	0,0229	0,0226
4-5	0,0221	0,0228	0,0224

При расчёте коэффициента шероховатости на модели канала с разной шероховатостью наряду с покрытием геоматом с заполнителем из щебня, учитывалось наличие покрытой глянцевыми пластмассовыми листами вертикальной стенки (рисунок 3.1).

Полученные таким образом значения коэффициента шероховатости для канала с покрытием из геомата с заполнителем из щебня, отражают величину осредненного коэффициента шероховатости в поперечном сечении русла.

Значения коэффициента шероховатости, полученные таким методом для канала, дно и откосы которого имеют покрытие из геомата с заполнителем из щебня, отражают величину осредненного коэффициента шероховатости в поперечном сечении русла.



Рисунок 3.1 – Вертикальная стенка лотка, покрытая глянцевыми пластмассовыми листами

Если на модели разные участки смоченного периметра имеют различную шероховатость, то среднее значение коэффициента шероховатости с учетом этого  $n_{cp}$  находится по формуле [78, 94, 96]:

$$n_{cp} = \frac{n_n \cdot \chi_n + n_{nl} \cdot \chi_{nl}}{b + (1 + \sqrt{m^2 + 1}) \cdot h_{cp}} \quad (3.5)$$

где:  $n_n$  и  $n_{nl}$  – коэффициент шероховатости соответственно покрытия из геомата с заполнителем из щебня и глянцевых пластмассовых листов;

$\chi_n$  и  $\chi_{nl}$  – смоченный периметр участков, соответственно из геомата с заполнителем из щебня и покрытых пластмассовыми листами;

$b$  – ширина дна лотка, дм;

$m$  – заложение откоса,  $m = 1$ ;

$h_{cp}$  – средняя глубина потока, дм.

Из формулы (3.5) получим зависимость для определения приведенного значения коэффициента шероховатости  $n_n$  [111,114,121]:

$$n_n = \frac{n_{cp} \cdot b + n_{cp} (1 + \sqrt{m^2 + 1}) \cdot h_{cp} - n_{nl} \cdot h_{cp}}{b + \sqrt{m^2 + 1} \cdot h_{cp}} \quad (3.6)$$

В расчётах коэффициента шероховатости  $n_n$ , коэффициент шероховатости пластмассовых листов принят равным  $n_{nl} = 0,009$ , как для поверхностей, покрытых эмалью или глазурью [94]. Величины пересчитанных значений коэффициентов шероховатости, истинного значения коэффициента шероховатости  $n_n$  покрытия из геомата с заполнителем из щебня приведены в таблице 3.5–3.7, а статистическая оценка в таблицах 3.8–3.10.

Таблица 3.5 – Результаты пересчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,010$  и  $i = 0,0087$  крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{z-k}$	$n_m$	$n_n$	$n_{z-k}$	$n_m$	$n_n$	$n_{z-k}$	$n_m$	$n_n$
		$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$			$Q = 128,03 \text{ л/с}$	
Уклон лотка $i = 0,001$									
1-2	0,0223	0,0228	0,0225	0,0225	0,0229	0,0228	0,0229	0,0234	0,0230

Продолжение таблицы 3.5

Створы	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$			$Q = 128,03 \text{ л/с}$		
1-3	0,0222	0,0228	0,0224	0,0229	0,0232	0,0231	0,0227	0,0234	0,0231
1-4	0,0230	0,0234	0,0233	0,0223	0,0232	0,0226	0,0226	0,0232	0,0229
1-5	0,0234	0,0239	0,0235	0,0236	0,0241	0,0238	0,0229	0,0233	0,0230
2-3	0,0229	0,0235	0,0233	0,0231	0,0233	0,0232	0,0230	0,0234	0,0232
2-4	0,0221	0,0232	0,0231	0,0223	0,0234	0,0231	0,0231	0,0239	0,0234
2-5	0,0230	0,0236	0,0232	0,0229	0,0233	0,0232	0,0229	0,0236	0,0230
3-4	0,0230	0,0234	0,0231	0,0228	0,0231	0,0230	0,0231	0,0235	0,0233
3-5	0,0230	0,0235	0,0233	0,0230	0,0236	0,0233	0,0230	0,0235	0,0232
4-5	0,0229	0,0233	0,0231	0,0231	0,0234	0,0232	0,0227	0,0236	0,0234
Уклон лотка $i = 0,0087$									
1-2	0,0228	0,0231	0,0230	0,0232	0,0239	0,0234	0,0227	0,0235	0,0231
1-3	0,0231	0,0236	0,0234	0,0230	0,0237	0,0233	0,0228	0,0238	0,0234
1-4	0,0225	0,0233	0,0228	0,0228	0,0237	0,0232	0,0230	0,0232	0,0231
1-5	0,0225	0,0228	0,0227	0,0231	0,0234	0,0233	0,0227	0,0235	0,0234
2-3	0,0224	0,0234	0,0227	0,0226	0,0231	0,0230	0,0228	0,0235	0,0231
2-4	0,0228	0,0235	0,0232	0,0229	0,0235	0,0232	0,0228	0,0234	0,0230
2-5	0,0227	0,0236	0,0233	0,0226	0,0235	0,0231	0,0230	0,0233	0,0232
3-4	0,0229	0,0235	0,0232	0,0230	0,0235	0,0235	0,0227	0,0236	0,0228
3-5	0,0228	0,0234	0,0231	0,0229	0,0234	0,0230	0,0225	0,0231	0,0229
4-5	0,0230	0,0234	0,0232	0,0227	0,0236	0,0233	0,0226	0,0232	0,0230

Таблица 3.6 – Результаты пересчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,010$  крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$		
1-2	0,0231	0,0234	0,0233	0,0232	0,0237	0,0235
1-3	0,0230	0,0239	0,0233	0,0230	0,0236	0,0234
1-4	0,0231	0,0239	0,0236	0,0231	0,0235	0,0233
1-5	0,0230	0,0235	0,0233	0,0234	0,0237	0,0235
2-3	0,0230	0,0237	0,0233	0,0231	0,0235	0,0234
2-4	0,0233	0,0236	0,0234	0,0226	0,0229	0,0228
2-5	0,0232	0,0235	0,0234	0,0232	0,0236	0,0235
3-4	0,0231	0,0236	0,0235	0,0229	0,0234	0,0232
3-5	0,0233	0,0236	0,0234	0,0228	0,0235	0,0231
4-5	0,0231	0,0235	0,0233	0,0231	0,0234	0,0233

Таблица 3.7 – Результаты пересчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,017$  крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{2-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$		
1-2	0,0255	0,0259	0,0257
1-3	0,0251	0,0254	0,0253
1-4	0,0246	0,0249	0,0246

Продолжение таблицы 3.7

Створы	$n_{г-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$		
1-5	0,0241	0,0244	0,0242
2-3	0,0237	0,0243	0,0241
2-4	0,0243	0,0246	0,0244
2-5	0,0238	0,0242	0,0240
3-4	0,0239	0,0241	0,0240
3-5	0,0236	0,0239	0,0238
4-5	0,0239	0,0245	0,0242

Таблица 3.8 – Результаты пересчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,001$  и  $i = 0,0087$  русла канала с креплением из геомата с наполнителем из щебня

Створы	$n_{г-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{г-к}$	$n_m$	$n_n$	$n_{г-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$			$Q = 128,03 \text{ л/с}$		
Уклон лотка $i = 0,001$									
$\sum n$	0,2286	0,2313	0,2296	0,2297	0,2304	0,2301	0,230	0,2335	0,2319
$n_{ср}$	0,0228 6	0,0231 3	0,0229 6	0,0229 7	0,0230 4	0,2301	0,0230	0,0233 5	0,0231 9
$n_{min}$	0,0221	0,0222	0,0224	0,0223	0,0229	0,0226	0,0226	0,0232	0,0229
$n_{max}$	0,0234	0,0239	0,0235	0,0236	0,0241	0,0238	0,0231	0,0239	0,0234
$n_{min}/n_{max}$	1,058	1,076	1,049	1,058	1,065	1,053	1,022	1,030	1,021
$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{ср}}\right)^2}{10}} \%$	1,81	2,13	1,69	2,00	2,03	1,79	1,25	1,28	1,11
$\left(1 - \frac{n_{г,к}}{n}\right) \cdot 100\%$	-	4,4	1,9	-	4,7	4,3	-	3,8	1,8
Уклон лотка $i = 0,0087$									
$\sum n$	0,2298	0,2327	0,2316	0,2305	0,2320	0,2316	0,2298	0,2311	0,2299
$n_{ср}$	0,0229 8	0,0232 7	0,0231 6	0,0230 5	0,0232 0	0,0231 6	0,0229 8	0,0223 1	0,0229 9
$n_{min}$	0,0224	0,0228	0,0227	0,0226	0,0231	0,0230	0,0225	0,0231	0,0229
$n_{max}$	0,0231	0,0236	0,0234	0,0232	0,0239	0,0234	0,0230	0,0238	0,0234
$n_{min}/n_{max}$	1,031	1,035	1,030	1,026	1,034	1,017	1,022	1,030	1,021

Створы	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_{п}$	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_{п}$	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_{п}$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$			$Q = 128,03 \text{ л/с}$		
Уклон лотка $i = 0,0087$									
$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{ср}}\right)^2}{10}} \%$	1,992	2,505	1,954	1,874	2,03	1,473	1,870	2,705	1,440
$\left(1 - \frac{n_{г.к}}{n}\right) \cdot 100\%$	-	2,7	1,8	-	3,2	2,0	-	3,5	1,8

Таблица 3.9 – Результаты расчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,010$  с креплением русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_n$	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$			$Q = 84,33 \text{ л/с}$		
$\sum n$	0,2343	0,2372	0,2367	0,2377	0,240	0,2394
$n_{ср}$	0,02343	0,02372	0,02367	0,02377	0,0240	0,02394
$n_{min}$	0,0230	0,0234	0,0233	0,0227	0,0229	0,0228
$n_{max}$	0,0233	0,0239	0,0236	0,0234	0,0237	0,0235
$n_{min}/n_{max}$	1,013	1,021	1,012	1,030	1,034	1,028
$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{ср}}\right)^2}{10}} \%$	1,83	1,98	1,60	2,13	2,68	1,9
$\left(1 - \frac{n_{г.к}}{n}\right) \cdot 100\%$	-	2,0	1,0	-	2,1	1,2

Таблица 3.10 – Результаты расчёта коэффициента шероховатости при  $i = 0,017$  крепления русла канала из геомата с заполнителем из щебня

Створы	$n_{г-к}$	$n_M$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$		
$\sum n$	0,2475	0,2488	0,2486
$n_{ср}$	0,02475	0,02488	0,02486
$n_{min}$	0,0236	0,0239	0,0238
$n_{max}$	0,0255	0,0259	0,0257
$n_{min}/n_{max}$	1,080	1,083	1,079

Створы	$n_{г-к}$	$n_m$	$n_n$
	$Q = 43,7 \text{ л/с}$		
$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{cp}}\right)^2}{10}} \%$	1,36	1,57	1,17
$\left(1 - \frac{n_{г.к}}{n}\right) \cdot 100\%$	-	4,5	3,7

Результаты расчета средних значений коэффициента шероховатости, с учётом всех расчётных значений, отраженных в таблицах 3.8–3.10 при разных уклонах и расходах, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Итоговые результаты расчёта коэффициента шероховатости  $n$ 

Параметр	$\sum n$	$n_{cp}$	$n_{min}$	$n_{max}$	$\frac{n_{min}}{n_{max}}$	$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{cp}}\right)^2}{10}} \%$	$\left(1 - \frac{n_{г.к}}{n}\right) \cdot 100\%$
$n_{г-к}$	2,086	0,0226	0,0221	0,0255	0,866	2,519	–
$n_m$	2,109	0,0237	0,0222	0,0259	0,857	2,645	7
$n_{II}$	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 наполнителем из щебня [8, 12, 35, 66].

Сравнив среднеквадратические отклонения значений коэффициента шероховатости, рассчитанного по трём формулам получим, что в расчётах по формуле Маннинга получилось наибольшее среднеквадратичное отклонение, которое составляет 2,6% , что при гидравлическом расчёте каналов будет завывать его пропускную способность.

Рекомендуется для каналов, работающих в исследованном диапазоне

основополагающих параметров (расходы, глубины, уклоны дна лотка и энергетические показатели), для данной конструктивной схемы противозерозионного покрытия при проектировании принимать значение  $n = 0,0237$ , рассчитанное по формуле Маннинга. Полученный коэффициент шероховатости для покрытия с щебнем  $n = 0,0237$  сопоставим с коэффициентом шероховатости таких поверхностей, как гравелистое русло [71, 94]. Выбор большего значения коэффициента шероховатости из представленной таблицы 3.11, пойдет в запас при определении пропускной способности каналов. Исследования по оценке коэффициента шероховатости для данного противозерозионного защитного покрытия, опытным путём, показали на практике возможности применения миксированных инновационных креплений.

### **3.2. Результаты исследований по определению коэффициента шероховатости покрытия из геомата с наполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс**

Экспериментальная установка, методика и инструментарий лабораторных исследований, а также расчетные зависимости и порядок оценки гидравлических параметров данного варианта покрытия, аналогичны гидравлическим исследованиям и расчетам параметров геомата с наполнителем из щебня.

Результаты исследований и измерений кинематических характеристик потока для определения коэффициента шероховатости покрытия геомата с наполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав рода райграс приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты обработки измерения кинематических характеристик потока в русле канала с креплением из геомата с наполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав родом райграс

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
Уклон лотка $i = 0,010$ , $h_{расст} = 150$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,392	1,387	1,350	1,267	1,245
Скорость потока $V$ , дм/с	4,962	4,975	5,164	5,428	5,686
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,900	0,898	0,882	0,846	0,836
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,017	1,019	1,013	1,012	1,018
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,220	2,259	2,271	2,337	2,547
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,946	2,828	2,723	2,687	2,547
Гидравлический уклон $J$	-	0,012	0,012	0,010	0,014
Расход $Q$ , л/с	44,68	44,54	45,13	44,47	45,85
$Q_{ср} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,787	1,763	1,750	1,721	1,702
Скорость потока $V$ , дм/с	7,357	7,487	7,569	7,619	7,718
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,050	1,042	1,037	1,027	1,020
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,085	1,081	1,080	1,082	1,087
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,454	2,648	2,732	2,803	2,887
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,325	3,205	3,047	2,932	2,887
Гидравлический уклон $J$	-	0,012	0,015	0,011	0,013
Расход $Q$ , л/с	85,12	85,34	85,65	84,93	85,05
$Q_{ср} = 128,03$ л/с					
Глубина $H$ , дм	2,098	2,071	2,064	1,952	1,944
Скорость потока $V$ , дм/с	9,494	9,641	9,665	10,207	10,262
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,149	1,142	1,140	1,105	1,103
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,095	1,087	1,084	1,101	1,094
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,739	2,930	3,019	3,065	3,072
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,529	3,408	3,306	3,203	3,072
Гидравлический уклон $J$	-	0,012	0,010	0,010	0,010
Расход $Q$ , л/с	128,97	129,21	129,19	129,04	129,19
Уклон лотка $i = 0,010$ , $h_{расст} = 100$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,216	1,203	1,196	1,154	1,131
Скорость потока $V$ , дм/с	5,208	5,309	5,388	5,481	5,571
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,823	0,817	0,814	0,794	0,783
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,039	1,042	1,026	1,029	1,019
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,058	2,091	2,129	2,198	2,462

Продолжение таблицы 3.12

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
Уклон лотка $i = 0,010$ , $h_{расст} = 100$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,978	2,845	2,713	2,598	2,462
Гидравлический уклон $J$	-	0,013	0,013	0,011	0,010
Расход $Q$ , л/с	44,02	44,23	45,03	44,16	44,28
$Q_{ср} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,585	1,572	1,542	1,531	1,498
Скорость потока $V$ , дм/с	7,933	8,047	8,118	8,213	8,557
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,977	0,972	0,960	0,956	0,943
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,082	1,079	1,081	1,084	1,087
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,199	2,230	2,342	2,375	2,595
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,168	3,023	2,875	2,772	2,595
Гидравлический уклон $J$	-	0,014	0,014	0,010	0,013
Расход $Q$ , л/с	84,47	84,65	84,48	84,42	84,73
Уклон лотка $i = 0,010$ , $h_{расст} = 50$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,173	1,157	1,140	1,075	1,059
Скорость потока $V$ , дм/с	6,015	6,104	6,238	6,406	6,661
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,803	0,795	0,787	0,756	0,748
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,038	1,022	1,010	1,023	1,015
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,851	1,996	2,033	2,112	2,146
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,532	2,408	2,304	2,203	2,146
Гидравлический уклон $J$	-	0,012	0,010	0,010	0,014
Расход $Q$ , л/с	45,70	45,41	46,08	44,54	45,62
Уклон лотка $i = 0,017$ , $h_{расст} = 150$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,158	1,141	1,017	0,973	0,961
Скорость потока $V$ , дм/с	5,571	5,662	6,183	6,590	6,731
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,796	0,785	0,715	0,704	0,698
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,017	1,020	1,014	1,013	1,018
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,930	1,946	1,965	2,068	2,106
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,588	2,423	2,246	2,135	2,106
Гидравлический уклон $J$	-	0,018	0,017	0,011	0,014
Расход $Q$ , л/с	41,72	41,85	40,72	41,54	41,91
$Q_{ср} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,317	1,297	1,269	1,265	1,250
Скорость потока $V$ , дм/с	9,912	10,053	10,269	10,367	10,435
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,868	0,859	0,847	0,845	0,838

Продолжение таблицы 3.12

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,069	1,058	1,047	1,061	1,055
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,582	2,644	2,699	2,780	2,870
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,528	3,355	3,198	3,023	2,870
Гидравлический уклон $J$	-	0,017	0,015	0,017	0,013
Расход $Q$ , л/с	84,53	84,43	84,38	84,84	84,37
$Q_{cp} = 128,03$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,548	1,495	1,443	1,434	1,418
Скорость потока $V$ , дм/с	12,800	13,246	13,820	13,906	14,087
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,963	0,942	0,921	0,917	0,911
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,103	1,095	1,085	1,082	1,067
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,490	2,528	2,570	2,610	2,694
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,453	3,253	3,098	2,953	2,694
Гидравлический уклон $J$	-	0,018	0,015	0,014	0,018
Расход $Q$ , л/с	128,23	128,22	129,07	129,04	129,31
Уклон лотка $i = 0,017$ , $h_{расч} = 100$ мм					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,122	1,113	1,014	0,985	0,973
Скорость потока $V$ , дм/с	6,158	6,437	6,891	7,278	7,755
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,779	0,774	0,725	0,710	0,704
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,041	1,048	1,038	1,032	1,028
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,972	2,008	2,081	2,128	2,168
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,753	2,589	2,396	2,221	2,168
Гидравлический уклон $J$	-	0,016	0,019	0,017	0,014
Расход $Q$ , л/с	44,76	44,82	45,26	43,21	44,14
$Q_{cp} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,681	1,645	1,621	1,609	1,604
Скорость потока $V$ , дм/с	8,404	8,461	8,618	8,655	8,688
Гидравлический радиус $R$ , дм	1,012	0,998	0,991	0,986	0,984
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,084	1,067	1,085	1,098	1,069
Удельная энергия сечения $e$ , дм	2,437	2,473	2,612	2,757	2,861
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,131	3,126	3,088	2,912	2,861
Гидравлический уклон $J$	-	0,015	0,013	0,017	0,014
Расход $Q$ , л/с	83,87	83,34	84,54	84,73	84,70
Уклон лотка $i = 0,017$ , $h_{расч} = 50$ мм					
$Q_{cp} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,107	1,058	1,009	0,970	0,963

Продолжение таблицы 3.12

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
Уклон лотка $i = 0,017$ , $h_{расм} = 50$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Скорость потока $V$ , дм/с	6,242	6,827	6,922	7,426	7,818
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,771	0,747	0,722	0,702	0,699
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,042	1,044	1,039	1,042	1,038
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,831	2,003	2,052	2,165	2,210
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,836	2,698	2,523	2,387	2,210
Гидравлический уклон $J$	-	0,014	0,017	0,013	0,013
Расход $Q$ , л/с	44,05	44,73	44,71	44,89	44,90
Уклон лотка $i = 0,03$ , $h_{расм} = 100$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	0,780	0,778	0,750	0,731	0,728
Скорость потока $V$ , дм/с	9,062	9,112	9,310	9,601	9,733
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,597	0,594	0,579	0,566	0,564
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,025	1,032	1,026	1,023	1,018
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,491	1,656	1,675	1,797	1,843
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,552	2,331	2,010	1,982	1,843
Гидравлический уклон $J$	-	0,026	0,03	0,028	0,019
Расход $Q$ , л/с	45,76	45,83	45,15	45,41	45,84
$Q_{ср} = 84,33$ л/с					
Глубина $H$ , дм	1,234	1,223	1,204	1,192	1,173
Скорость потока $V$ , дм/с	10,691	11,061	11,176	11,509	11,781
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,831	0,826	0,817	0,811	0,803
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,094	1,081	1,082	1,091	1,086
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,907	2,065	2,091	2,220	2,251
Полная удельная энергия $E$ , дм	3,257	2,952	2,698	2,491	2,251
Гидравлический уклон $J$	-	0,031	0,025	0,020	0,018
Расход $Q$ , л/с	85,42	84,83	84,82	85,58	85,87
Уклон лотка $i = 0,03$ , $h_{расм} = 50$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Глубина $H$ , дм	0,775	0,760	0,740	0,724	0,719
Скорость потока $V$ , дм/с	9,118	9,288	9,601	9,916	10,012
Гидравлический радиус $R$ , дм	0,594	0,585	0,573	0,563	0,560
Коэффициент Кориолиса $\alpha$	1,036	1,028	1,022	1,032	1,038
Удельная энергия сечения $e$ , дм	1,486	1,640	1,667	1,791	1,834
Полная удельная энергия $E$ , дм	2,732	2,512	2,307	2,115	1,834

Продолжение таблицы 3.12

Кинематические характеристики потока	Значения по створам в зависимости от уклона лотка и расхода воды				
	1	2	3	4	5
Уклон лотка $i = 0,03$ , $h_{расст} = 50$ мм					
$Q_{ср} = 43,7$ л/с					
Гидравлический уклон $J$	-	0,022	0,021	0,019	0,022
Расход $Q$ , л/с	45,78	45,51	46,05	46,51	46,55

Результаты измерения скоростей потока в виде эпюр представлены в приложении А, результаты обработки данных эксперимента в приложении Б, графики изменения по длине лотка основных характеристик потока, представлены в приложении В.

Расчеты по определению коэффициента шероховатости в исследуемом диапазоне расходов канала, уклонов русла, а также с учетом поверхности лотка с разной шероховатостью, выполнялись по трём формулам: Гангилье–Куттера (3.1),  $n_{г-к}$ , Маннинга (3.2)  $n_m$ , и Павловского (3.3)  $n_n$ . Числа Рейнольдса определялись по формуле (3.4) для геомата с наполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав род райграс, величины находились в промежутке: при высоте растительности 50 мм:  $Re_R = 42690 \div 105780$ , при высоте растительности 100 мм:  $Re_R = 56102 \div 119500$ , при высоте растительности 150 мм:  $Re_R = 67250 \div 130320$ .

Отличительная особенность исследуемого варианта от предыдущего, заключалась во влиянии на коэффициент шероховатости высоты травостоя, которая увеличивалась в процессе вегетационного периода и изменялась в опытах от 50 мм до 150 мм, что наглядно видно на рисунке 3.2.

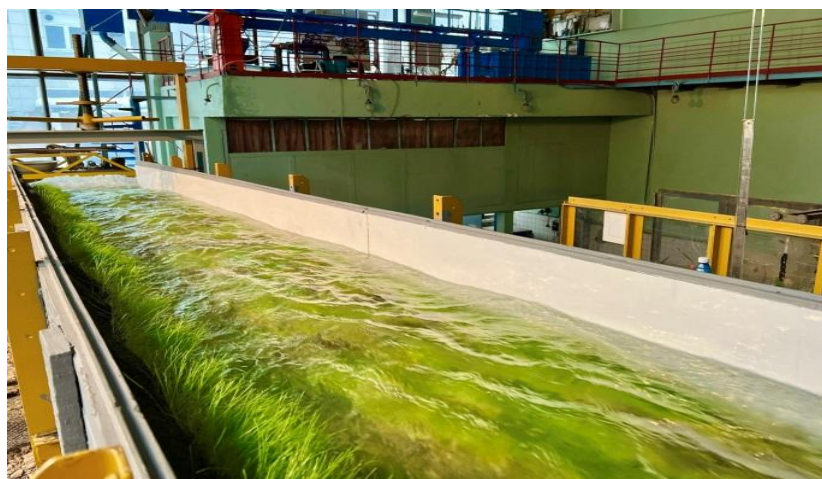


Рисунок 3.2 – Русло участка канала для исследования покрытия геомата с растительностью

Опуская промежуточные расчеты, выполненные с учетом зависимостей (3.5) и (3.6) в порядке, представленном выше в таблицах № 3.2 – 3.10, в таблице 3.13 приведены итоговые результаты расчета коэффициента шероховатости для покрытия из геомата с заполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав рода райграс.

Таблица 3.13 – Итоговые результаты расчёта коэффициента шероховатости  $n$

Параметр	$\sum n$	$n_{\text{ср}}$	$n_{\text{min}}$	$n_{\text{max}}$	$n_{\text{min}}/n_{\text{max}}$	$\sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{n_i}{n_{\text{ср}}}\right)^2}{10}} \%$	$\left(1 - \frac{n_{\text{г.к}}}{n}\right) \cdot 100\%$
$n_{\text{Г-К}}$	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

Сравнив полученные значения коэффициента шероховатости по высоте растительности, отметим, что при большей высоте растительности и увеличению уклона дна водотока, значения коэффициента шероховатости увеличиваются [8,12,70]. Благодаря большему значению коэффициента шероховатости увеличиваются гидравлические сопротивления.

Сравнение среднеквадратических отклонений значений коэффициента шероховатости, определенного по трем формулам, показало, что в расчётах с использованием формулы Маннинга имеет место наибольшее среднеквадратичное отклонение – 3,1 %. Значения коэффициента

шероховатости, рассчитанные по формуле Гангилье–Куттера, получились ниже значений, рассчитанных по другим формулам.

Исходя из полученных результатов расчётов коэффициента шероховатости  $n$  для покрытия геомата с заполнителем в виде щебня с посевом многолетних трав родом райграс при разных расходах и уклонах dna лотка, можно принимать значение  $n = 0,0301$ , рассчитанное по формуле Маннинга. Полученный коэффициент шероховатости для покрытия геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс  $n = 0,0301$  сопоставим с коэффициентом шероховатости для каналов со значительным зарастанием русла [71, 94]. Выбор большего значения коэффициента шероховатости из представленной таблицы 3.13 пойдет в запас при определении пропускной способности каналов. Исследования по оценке коэффициента шероховатости для данного противозерозионного защитного покрытия, выполненные опытным путём, показали возможности применения на практике миксированных инновационных креплений.

По результатам анализа материалов исследований вариантов покрытия показывает, что наряду с выполнением защитных функций покрытие на основе геомата оказывает существенное влияние на характеристики потока независимо от типа заполнителя, а сопоставление данных таблиц 3.11 и 3.13 свидетельствует, что использование растительности в составе покрытия из геомата увеличивает коэффициент шероховатости более чем на 20%.

### **3.3. Результаты экспериментального исследования пульсационных характеристик потока**

На противозерозионное покрытие канала могут оказывать влияние пульсации давления при движении потока. Поэтому была поставлена задача выполнить исследования по выявлению влияния пульсаций в водном потоке на крепление канала, состоящего из геомата с заполнителем из щебня. А

именно провести оценку устойчивости покрытия и исследование влияния величины расхода воды на изменение пульсационных характеристик.

Цель исследования пульсационных характеристик потока заключалась в оценке влияния пульсации потока на устойчивость покрытия откоса и дна канала из геомата с наполнителем из щебня.

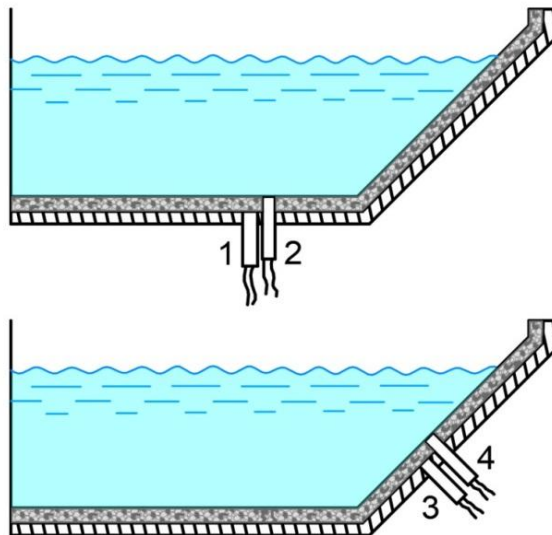
Для получения пульсационных характеристик воздействия потока на крепление дна и откосов канала был выбран один створ на рабочем участке для избежания влияния различных характеристик потока. Влияние пульсационных характеристик потока на крепление осуществлялось при расходах  $Q = 43,7$  л/с,  $Q = 84,33$  л/с и  $Q = 128,03$  л/с, при этом уклон дна оставался неизменным  $i = 0,0087$ .

В исследованиях всего было сделано 4 серии опытов. Датчик находился под исследуемым противоэрозионным покрытием в первых двух сериях опытов. На откосе и на дне лотка просверливались отверстия, которые соответствовали диаметру датчика.

Эксперименты состояли из четырех серий опытов. В первых двух сериях датчик ДД-10 находился под противоэрозионным покрытием. Для его установки на откосе и дне канала просверливались отверстия диаметром, соответствующим диаметру датчика. Датчик по очереди устанавливался в эти отверстия и закреплялся, после чего проводились серии опытов при трех расходах.

В третьей и четвертой серии опытов датчик находился на одном уровне с исследуемым противоэрозионным покрытием. Для его установки в покрытии просверливались отверстия в тех же местах, что и в первой и второй серии опытов.

Скорости потока в местах расположения датчиков измерялись с помощью трубки Пито. Расположение датчиков представлено на рисунке 3.3.



1 – на дне под покрытием; 2 – то же на уровне с покрытием;  
 3 – на откосе под покрытием; 4 – то же на уровне с покрытием

Рисунок 3.3– Схема расположения датчиков на модели:

При определении времени, в течение которого необходима фиксация измерений датчика, использовалась теорема Котельникова В.А, в соответствии с которой интервал дискретизации  $\Delta t$  определяется по зависимости:

$$\Delta t = \frac{f_{max}}{2}. \quad (3.7)$$

где:  $f_{max}$  – наибольшая частота в спектре.

Нижняя граница частотного диапазона определялась по зависимости:

$$f_0 = 1/T_0. \quad (3.8)$$

Чтобы определить горизонтальный масштаб турбулентности  $T_0$  используем формулу:

$$T_0 = L/V_{min}. \quad (3.9)$$

где:  $L$  – длина участка, м;

$V_{min}$  – минимальная средняя скорость водного потока.

Длина реализации определялась по формуле:

$$T = (5 \dots 6)T_0. \quad (3.10)$$

Было получено, что время фиксации измерений датчика от 120 до 180

секунд, шаг времени задержки 50 мс.

В результате проведения гидродинамических исследований были получены пульсационные характеристики исследуемого покрытия, представленные в таблице 3.14. Полученные пульсационные характеристики дают представление о нагрузке водного потока на исследуемое покрытие. В таблице 3.14 представлены результаты гидродинамических исследований в виде пульсационных характеристик исследуемого защитного покрытия канала, что дает информацию о нагрузке потока воды на покрытие.

Таблица 3.14 – Результаты измерения пульсационных характеристик

Расход $Q$ , л/с	Скорость потока $V$ , дм/с	Гидродинамическое давление
		Среднее значение, см
Датчик на дне под покрытием (1 датчик)		
43,7	6,196	2,169
84,33	8,436	2,889
128,03	11,127	3,609
Датчик на дне на одном уровне с покрытием (2 датчик)		
43,7	6,205	5,537
84,33	8,685	8,702
128,03	11,147	11,865
Датчик на откосе под покрытием (3 датчик)		
43,7	6,189	1,669
84,33	8,352	2,389
128,03	11,120	3,159
Датчик на откосе на одном уровне с покрытием (4 датчик)		
43,7	6,209	4,987
84,33	8,689	8,132
128,03	11,141	11,305

На рисунке 3.4 представлена зависимость гидродинамического давления от расхода воды.

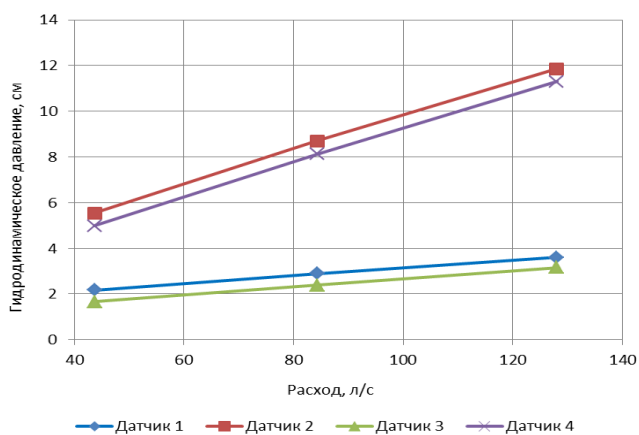


Рисунок 3.4 – Зависимость гидродинамического давления от расхода

Было получено, что результаты исследования соответствуют общим закономерностям изменения давления. Также было получено, что с увеличением расхода воды увеличивается гидродинамическое давление и при этом наблюдается, что гидродинамическое давление на дне канала больше, чем на откосе. Расположенный под креплением канала датчик показывал значение гидродинамического давления меньше чем датчик, расположенный на одном уровне с поверхностью покрытия, что объясняется гашением части давления покрытием. В таблице 3.15 представлены данные о давлениях, которые создаются потоком воды и определяется разницей показаний датчиков, находящихся на одном уровне с покрытием и под ним.

Таблица 3.15 – Разница гидродинамических давлений, определенных над покрытием и под покрытием

Расход $Q$ , л/с	Гидродинамическое давление, датчик на уровне с покрытием, см	Гидродинамическое давление, датчик под покрытием, см	Разница давлений, см	Превышение гидродинамического давления в %
Датчик на дне (1 и 2 датчик)				
43,7	5,537	2,169	3,368	60,9
84,33	8,702	2,889	5,813	66,9
128,03	11,865	3,609	8,256	69,6
Датчик на откосе (3 и 4 датчик)				
43,7	4,987	1,669	3,318	66,7
84,33	8,132	2,389	5,743	70,7
128,03	11,305	3,159	8,146	72,1

Значения гидродинамического давления, которые представлены в таблице позволяют сделать вывод, что в диапазоне исследованных расходов отсутствует опасность воздействия пульсационного давления потока на нижнюю часть поверхности покрытия, а следовательно угроза разрушения русла канала отсутствует.

### **3.4. Оценка состояния растительного грунта покрытия**

#### **геомата по итогам экспериментальных исследований**

После проведения опытов, был проведен анализ разрезов покрытия

геомата с наполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс, представленные на рисунке 3.5.

а)



б)



в)



г)



а, б – подводящий участок фрагмента канала; в, г – отводящий участок фрагмента канала

Рисунок 3.5 – Состояния покрытия после окончания экспериментов

Визуальный анализ разрезов показал, что каких-либо деформаций уложенного растительного грунта после серии проведённых экспериментов покрытия миксированного крепления и основания под ним обнаружено не было по сравнению с началом проведения серии опытов. Очевидно, что корни использованной травы послужили армирующим материалом грунта и препятствовали его эрозии. Экспериментальные данные, полученные о прочности удержания травяного покрова, показали значительную стойкость исследованного покрова с посевом трав против выдергивания влекущими силами гидравлического сопротивления воды.

Таким образом, засев травой покрытия из геомата с заполнением щебнем увеличивает стойкость против смыва щебня и повышает устойчивость всего композиционного покрытия.

Разрез защитного покрытия из материала геомата марки – Энкамат 7225 в совокупности с травяным покровом и размещённым под ним гумусовым слоем, выполненный после проведения гидравлических исследований, показал их удовлетворительное состояние.

### **Выводы по главе**

1. Гидравлические исследования и оценка коэффициента шероховатости проводилась с учетом наличия в экспериментальном лотке двух типов поверхностей – геомата с наполнителем из щебня на дне с откосом и пластиковым покрытием на вертикальной стенке, таким образом, полученный коэффициент шероховатости имел осредненное значение. Сравнение результатов экспериментов с расчетами по классическим зависимостям Гангилье-Куттера, Маннинга и Павловского позволяет рекомендовать формулу Маннинга для расчета коэффициента шероховатости геомата с наполнителями из щебня  $n = 0,0237$ ; из щебня с посевом многолетних трав рода райграс  $n = 0,0301$ , при этом использование растительности в составе покрытия из геомата увеличивает коэффициент шероховатости более чем на 20%.

2. Гидродинамические 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.

3. Анализ разрезов покрытия, выполненный после проведения гидравлических исследований, показал отсутствие каких-либо деформаций растительного грунта покрытия миксированного крепления и основания под ним, а корни травяного покрова послужили армирующим материалом грунта и препятствовали его эрозии.

## **ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ И УСТОЙЧИВОСТИ НА СДВИГ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОМАТА**

### **4.1. Методика оценки коэффициента фильтрации покрытия по данным экспериментальных исследований**

При решении этой задачи рассматривалось противоэрозионное покрытие, состоящее из геомата с наполнителем из щебня, исследования проводились в нескольких слоях этого покрытия. Оценка фильтрационных характеристик материалов покрытия осуществлялась при напорном и свободном движении воды. Напорный режим фильтрации будет наблюдаться при движении воды в канале в части крепления, расположенного ниже уровня воды, свободный режим фильтрации присутствует там, где покрытие расположено выше уровня воды.

Целью исследований являлось получение опытным путем значений скорости и расхода фильтрационного потока, затем по этим данным рассчитывался коэффициент фильтрации.

Для получения характеристик напорной фильтрации в прибор Дарси помещались восемь слоев исследуемого материала, а сечение на выходе из колонны располагалось ниже поверхности воды в отводящем резервуаре. Для получения характеристик свободной фильтрации исследуемый материал находился выше поверхности воды и на некотором расстоянии для того, чтобы профильтровавшаяся вода свободно удалялась в отводящий резервуар.

Расход профильтровавшейся воды пропорционален площади поперечного сечения, через которое проходит фильтрационный поток.

Величины расхода воды определялись на модели, используя треугольный водослив с тонкой стенкой с углом  $\alpha = 90^\circ$ . Расход воды через треугольный водослив определялись по формуле [41, 111, 116]:

$$Q = 14 \cdot h^{2,5}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (4.1)$$

где:  $h$  – напор на треугольном водосливе.

Порог водослива имел высоту 4 см, напор на треугольном водосливе определялся с помощью линейки.

Для нахождения скорости фильтрации  $V_{\phi}$  см/с использовалась зависимость:

$$V_{\phi} = \frac{Q}{\omega}, \text{ см/с} \quad (4.2)$$

где  $\omega$  – площадь поперечного сечения потока воды,  $\omega = 100 \text{ см}^2$ .

Для определения местной скорости фильтрации использовался закон Дарси, который связывает скорость фильтрации с градиентом напора и коэффициентом фильтрации:

$$U = k \cdot J. \quad (4.3)$$

где:  $k$  – коэффициент фильтрации;

$J$  – градиент напора (гидравлический уклон).

Применение формулы Дарси возможно, когда число Рейнольдса  $Re \leq 5$ , что соответствует ламинарному режиму фильтрации, оно определяется по формуле:

$$Re = \frac{V_{\phi} \cdot d}{\sqrt[3]{p} \cdot \nu}. \quad (4.4)$$

где:  $V_{\phi}$  – скорость фильтрации, см/с;

$d$  – эффективный диаметр (фракция);

$p$  – коэффициент пористости;

$\nu$  – коэффициент кинематический вязкости жидкости.

Для данного исследуемого материала невозможно определить число Рейнольдса, так как нельзя получить параметры материала, входящие в это число. Было установлено, что закон Дарси может нарушаться для крупнозернистых материалов, например для гравия, щебня [41]. Для нахождения средней скорости фильтрации  $V_{\phi}$ , применим формулу для

общего случая [94]:

$$V_{\phi} = \frac{Q}{\omega}. \quad (4.5)$$

Скорость фильтрации определяется степенным уравнением:

$$V_{\phi} = k \cdot J^m. \quad (4.6)$$

$m = 1$  – при ламинарном режиме фильтрации.

Пьезометрический уклон определяется как отношение потерь напора к длине пути фильтрации и находится по зависимости:

$$J_{i,i+1} = \frac{H}{l_{i,i+1}} = \frac{H_i - H_{i+1}}{l_{i,i+1}}. \quad (4.7)$$

где:  $H_i$  и  $H_{i+1}$  – показания пьезометров  $i$  и  $i + 1$ ;

$l_{i,i+1}$  – расстояние между точками присоединения пьезометров  $i$  и  $i + 1$ .

Для расчёта коэффициента фильтрации применимы следующие зависимости:

- в общем виде

$$k = \frac{V_{\phi}}{J^m}. \quad (4.8)$$

- для ламинарного режима фильтрации

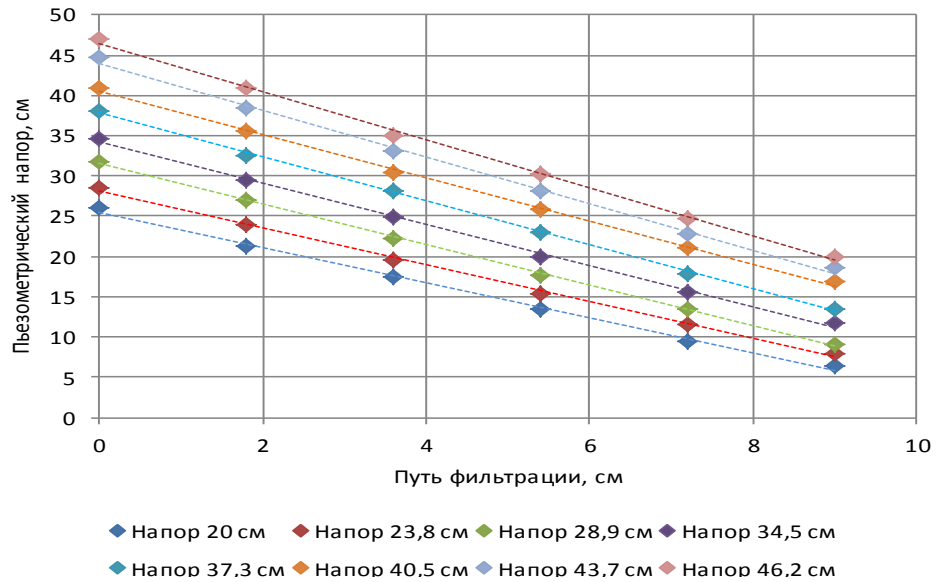
$$k = \frac{V_{\phi}}{J}. \quad (4.9)$$

## 4.2. Результаты эксперимента по определению коэффициента фильтрации

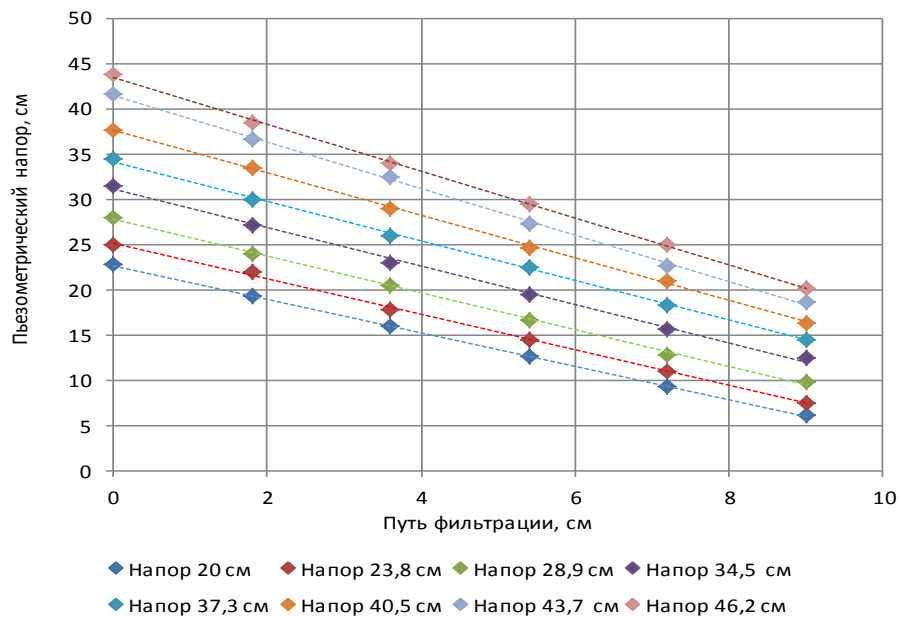
В процессе экспериментов по получению фильтрационных характеристик с противозерозионным материалом - покрытием, состоящим из геомата с наполнителем из щебня, было произведено восемь серий замеров, напор изменялся от максимального до минимально значений. Задачей было определить потери напора по длине фильтрационного потока используя показания соответствующих пьезометров, регистрирующих давление внутри и между слоями исследуемого материала.

На рисунках 4.1– 4.2 представлены полученные зависимости изменения пьезометрического напора по длине пути фильтрации для напорной и свободной фильтрации.

а)

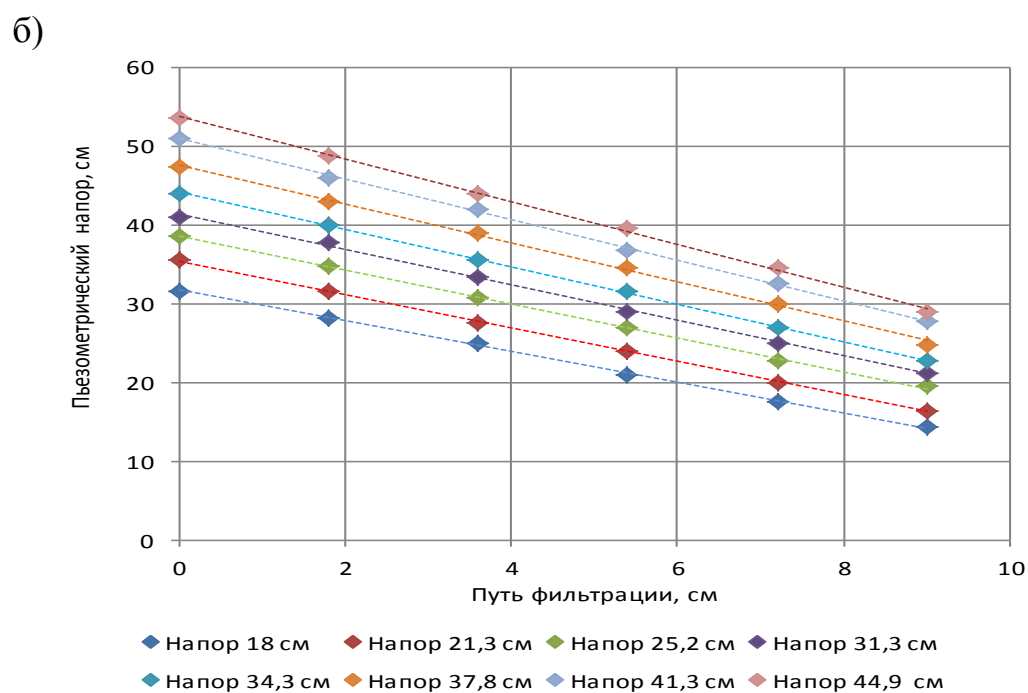
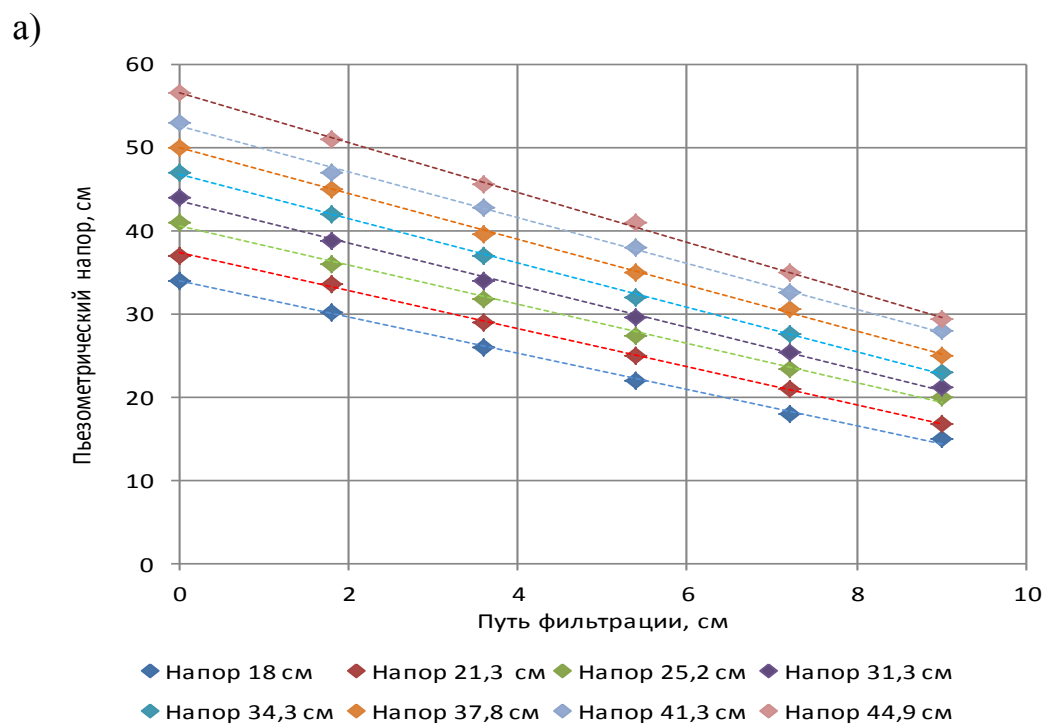


б)



а - внутри слоя; б - между слоями

Рисунок 4.1 – Зависимости изменения пьезометрических напоров по длине пути фильтрации для напорной фильтрации, полученные с помощью прибора Дарси



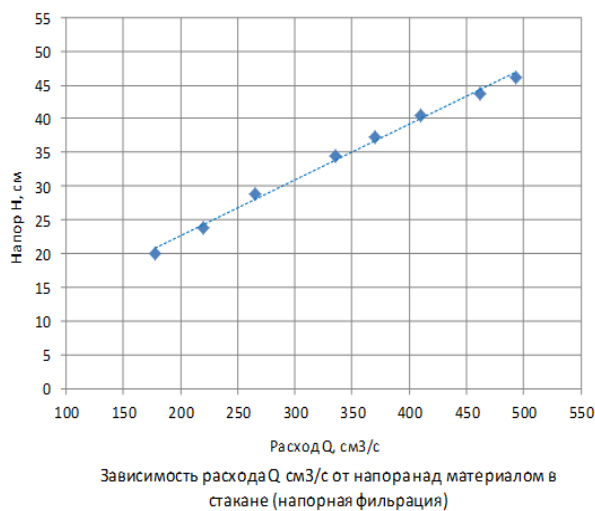
а - внутри слоя; б - между слоями

Рисунок 4.2 – Зависимости изменения пьезометрических напоров по длине пути фильтрации для свободной фильтрации, полученные с помощью прибора Дарси

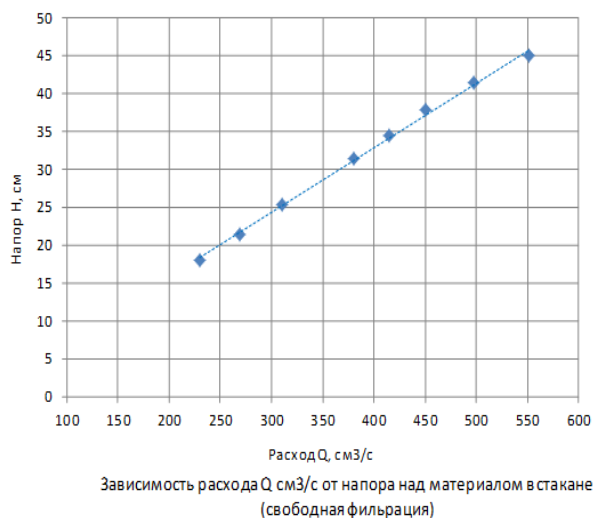
В опытах определялись расход и скорость движения воды, профильтровавшейся через слой материала, в зависимости от напора. По

полученным значениям строились графики, представленные на 4.3 – 4.4, как видно закономерности носят линейный характер.

а)



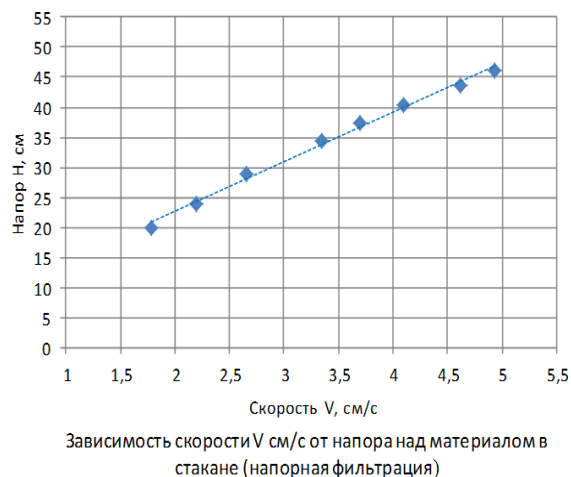
б)



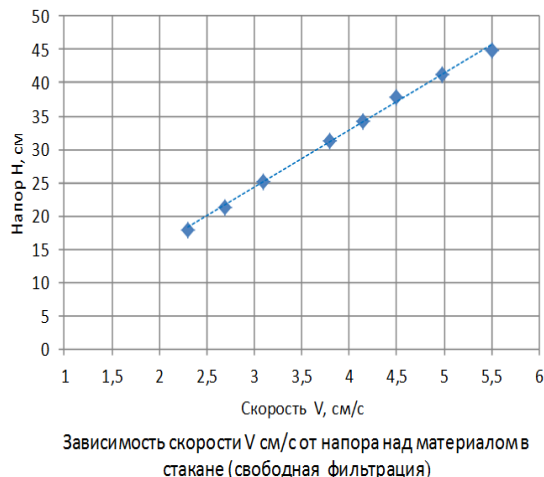
а – для напорной фильтрации; б – для свободной фильтрации

Рисунок 4.3 – Зависимость расхода профильтровавшейся воды от напора над исследуемым материалом

а)



б)



а – для напорной фильтрации; б – для свободной фильтрации

Рисунок 4.4 – Зависимость скорости профильтровавшейся воды от напора над исследуемым материалом

### 4.3. Результаты расчёта по определению коэффициента фильтрации

Расчеты по определению коэффициентов фильтрации выполнялись для напорного и свободного режимов фильтрации при восьми значениях напоров.

Для определения скорости профильтровавшейся воды в зависимости от полученных расходов использовалась формула (4.5). Пьезометрические уклоны определялись в зависимости от напоров, полученных по показаниям пьезометров, для чего использовалась формула (4.7). Для каждого напора расчетом определялось по десять значений коэффициентов фильтрации по формуле (4.9). Было получено для каждого режима фильтрации по 80 значений коэффициентов фильтрации.

Зависимость коэффициента фильтрации от длины пути фильтрации для расчётного напора, затем для каждого напора определялся средний коэффициент фильтрации и были построены графики зависимостей средних значений коэффициента фильтрации от напора над исследуемым материалом, которые представлены на рисунке 4.5 при напорном и свободном режимах фильтрации.

Графики на рисунке 4.5. показывают, что при малых напорах коэффициент фильтрации меньше, это можно объяснить тем, что с уменьшением напора, а следовательно, и расхода, фильтрация происходит не по всей площади образцов, а по участкам с минимальными гидравлическими сопротивлениями, это особенно относится к нижнему слою, где наблюдаются участки, свободные от фильтрационного потока. При итоговом расчёте, при определении коэффициентов фильтрации, результаты этих экспериментов не учитываются, чтобы исключить появление ошибки. Данные результаты эксперимента оставлены для дальнейшего исследования с целью определения действительных площадей, занятых фильтрационным потоком [15, 22, 36, 41].

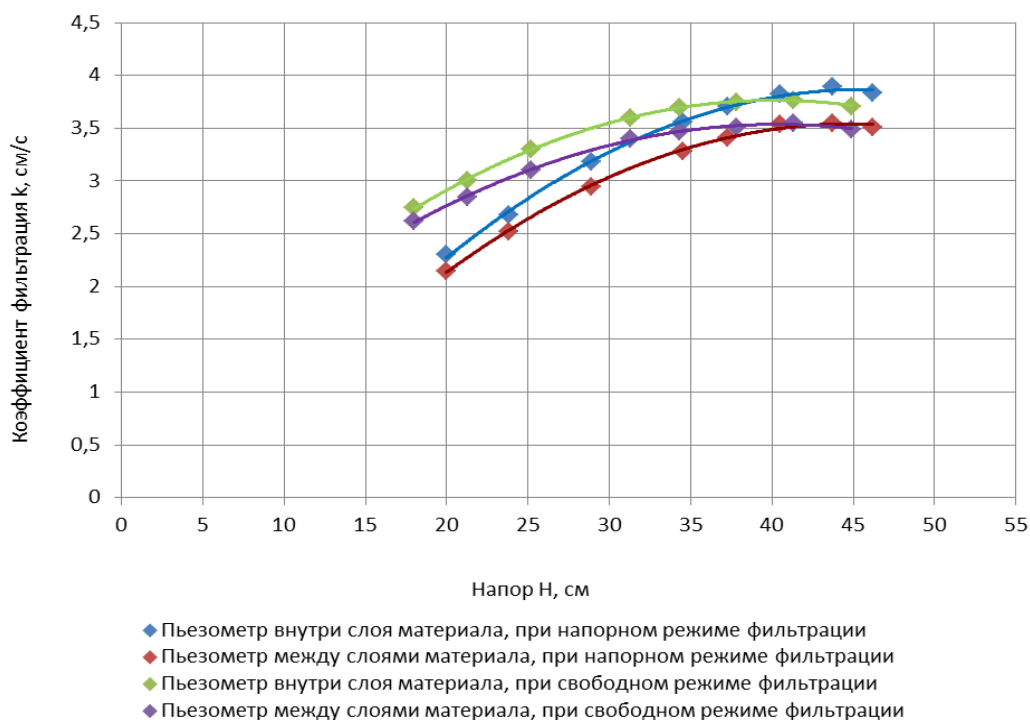


Рисунок 4.5 – Зависимости коэффициента фильтрации от напора над исследуемым материалом при напорном и свободном режиме фильтрации

Анализ полученных данных выполнен с учётом исключения значения коэффициента фильтрации при неполных площадях фильтрации.

На основании анализа проведённых экспериментов по изучению коэффициента фильтрации для противозэрозийного покрытия, состоящего из геомата с наполнителем из щебня, можно рекомендовать его к использованию, коэффициент фильтрации для напорного режима  $k_{\phi} = 3,24$  см/с, а для свободного режима  $k_{\phi} = 3,35$  см/с.

#### 4.4. Оценка сопротивления сдвигу на контакте геомата с грунтом основания в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии

Противозэрозийные защитные покрытия подвержены воздействию внешних факторов. Требуется оценить возможность их сопротивления на сдвиг для оценки условий их использования в дальнейшем, в первую очередь при расположении на основаниях, сложенных песчаными и супесчаными грунтами. Этот вопрос был рассмотрен на примере геомата с наполнителем

из щебня, горизонтально расположенном на песчаном основании в различных условиях работы гидротехнического сооружения, т.е. в ненасыщенном состоянии и при насыщении водой.

Для определения коэффициента трения использовалась установка, содержащая контейнер, который заполняется грунтом, на котором расположена и фиксируется сдвиговая пластина.

В качестве основания был принят однородный песчаный грунт средней крупности с диаметром  $d_{50} = 0,2$  мм [41, 94]. Исследования проводились в две серии для изучения трения при разных условиях расположения покрытия. Для изучения трения при различных условиях расположения покрытия исследования проводились в две серии. Первая из них выполнялась с песчаным грунтом, находящемся в ненасыщенном состоянии, а вторая серия с тем же грунтом, находящемся в насыщенном состоянии. Каждый эксперимент выполнялся трижды.

По данным, полученным в результате экспериментов, строились графики зависимости перемещения от горизонтальной силы, необходимой для сдвига пластины с учетом веса пригрузки на образец с покрытием канала из геомата с наполнителем из щебня. На рисунке 4.6 представлены кривые зависимости перемещения исследуемого покрытия от величины горизонтальной силы.

Из рисунков видно, что горизонтальная сила, которая необходима для смещения экспериментального покрытия, пропорционально возрастает с ростом массы пригрузки. Небольшие перемещения были в начале эксперимента. Перемещения резко возрастают при достижении определённой нагрузки. Максимальное расстояние перемещения исследуемого фрагмента в экспериментальной установке составило 42 см.

Перед началом экспериментов по определению сопротивления сдвигу по контакту подошвы геомата с песчаным грунтом в насыщенном водой состоянии определялась весовая влажность грунта.

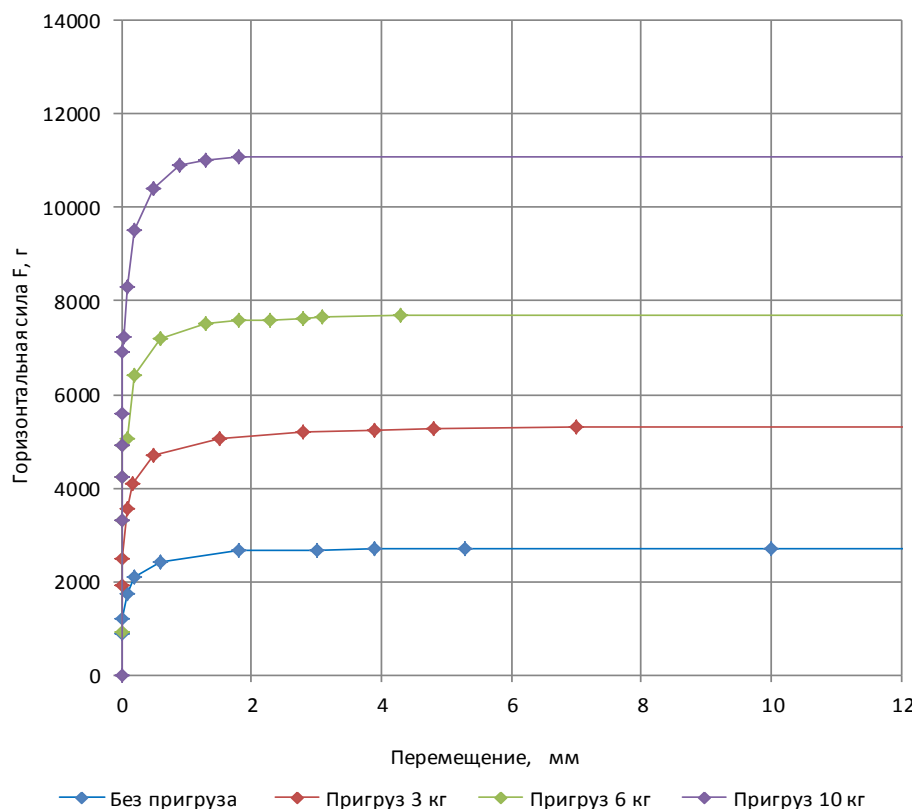


Рисунок 4.6 – Зависимость перемещения исследуемого покрытия канала из геомата с наполнителем из щебня от горизонтальной силы при основании из песчаного грунта в ненасыщенном водой состоянии при различной величине пригрузки

Перед проведением эксперимента, для определения относительного содержания воды в грунте, из контейнера установки были взяты пробы сухого и водонасыщенного песчаного грунта. Отобранные пробы помещались в емкость объемом 500 мл, далее они взвешивались на весах. Весовая влажность  $W$  находилась по зависимости [41, 111]:

$$W = \left( \frac{m_{\text{воды}}}{m_{\text{гр.сух}}} \right) \cdot 100, \% \quad (4.10)$$

где:  $m_{\text{воды}}$  – масса воды в грунте, г;

$m_{\text{гр.сух}}$  – масса сухого грунта, г.

Масса воды в грунте определяется по следующей зависимости:

$$m_{\text{воды}} = m_{\text{водонасыщ}} - m_{\text{гр.сух}} \quad (4.11)$$

$$m_{\text{воды}} = 1220 - 1022 = 198 \text{ г.}$$

ГДЕ:  $m_{\text{воды}}$  – масса воды в грунте, г;

$m_{\text{водонасыщ}}$  – масса водонасыщенного грунта, г;

$m_{\text{гр.сух}}$  – масса сухого грунта, г.

Откуда весовая влажность равна:

$$W = \left( \frac{198}{1022} \right) \cdot 100\% = 19,37\%.$$

Значение весовой влажности грунта составило 19,37 % при проведении данных исследований.

Подобным же образом проводилось 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. Водонасыщенность песчаного грунта оставалась постоянной во время выполнения исследования.

На рисунке 4.7 представлены кривые зависимости перемещения исследуемого покрытия от горизонтальной силы. На рисунке 4.7 наблюдается такая же картина, как и в предыдущем эксперименте. Видно, что при увеличении массы пригрузки возрастает горизонтальная нагрузка, которая необходима для перемещения фрагмента данного защитного покрытия.

Во время опыта прослеживаются медленно возникающие перемещения, которые вызваны проявлением молекулярных сил сцепления между геоматом с наполнителем из щебня и песчаным грунтом в насыщенном водой состоянии. Максимальное значение перемещения исследуемого фрагмента крепления в данном случае составило 42 см.

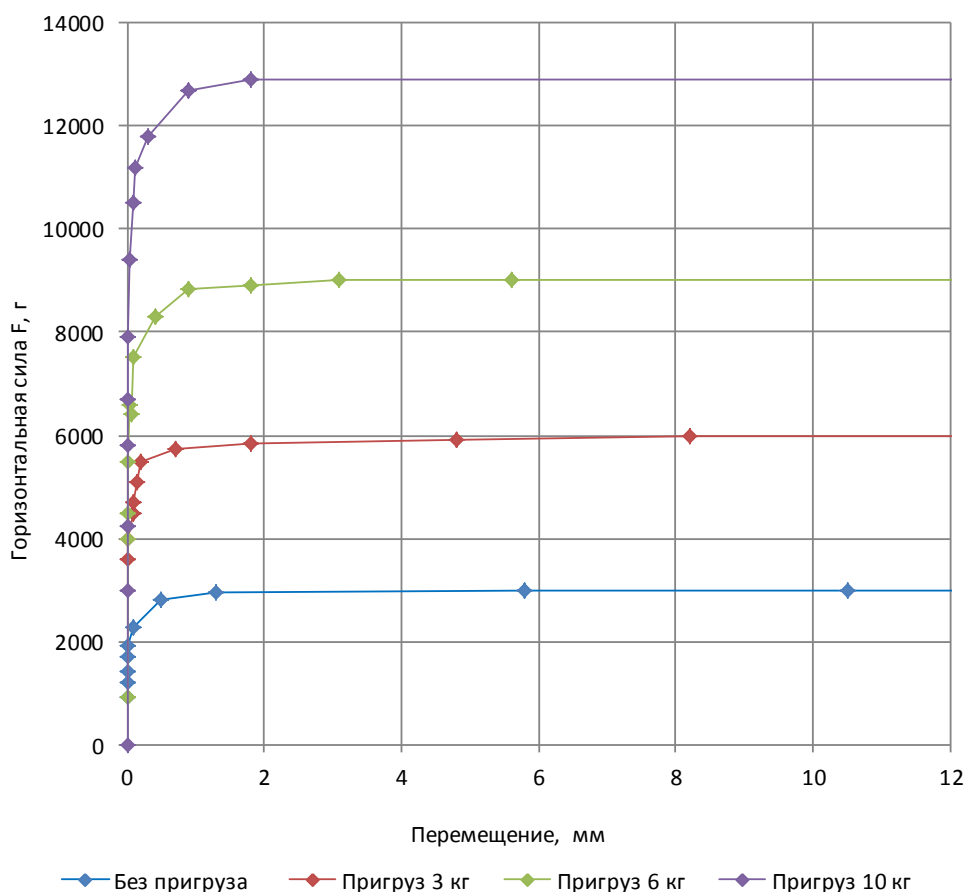
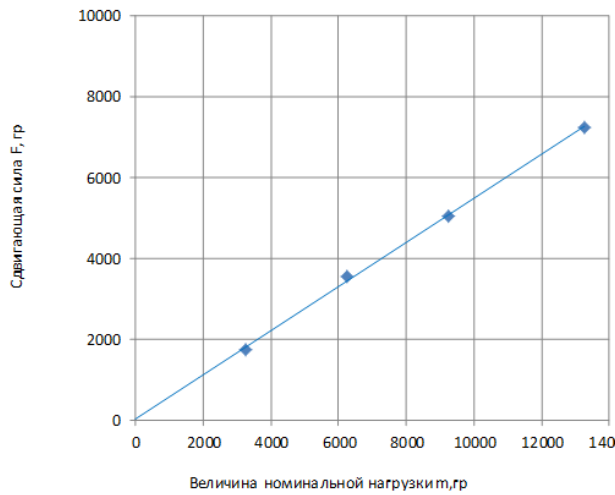


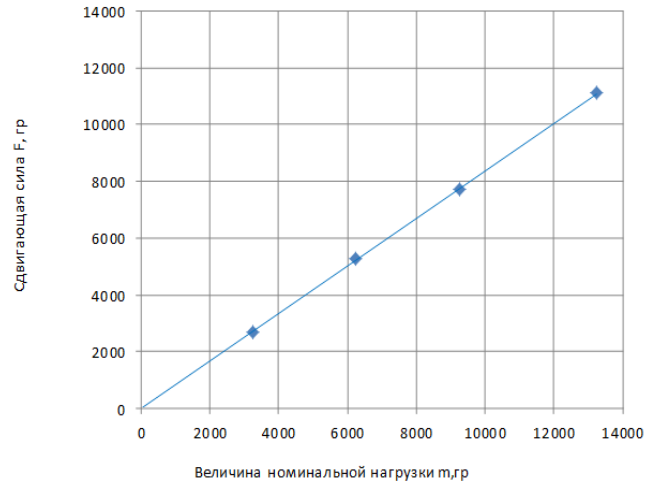
Рисунок 4.7 – Зависимость перемещения исследуемого покрытия канала из геомата с наполнителем из щебня от горизонтальной силы при основании из песчаного грунта в насыщенном водой состоянии при различной величине пригрузки

На основе выполненных исследований, построены обобщающие графики, показывающие зависимость силы сдвига от величины вертикальной пригрузки, а также величины критической нагрузки, которая приводит к сдвигу образца покрытия данной конструкции. На рисунках 4.8 и 4.9 представлены графики зависимости силы сдвига от массы пригрузки для случая ненасыщенного водой грунта основания (4.8) и случая насыщенного водой грунта основания (4.9).

а)



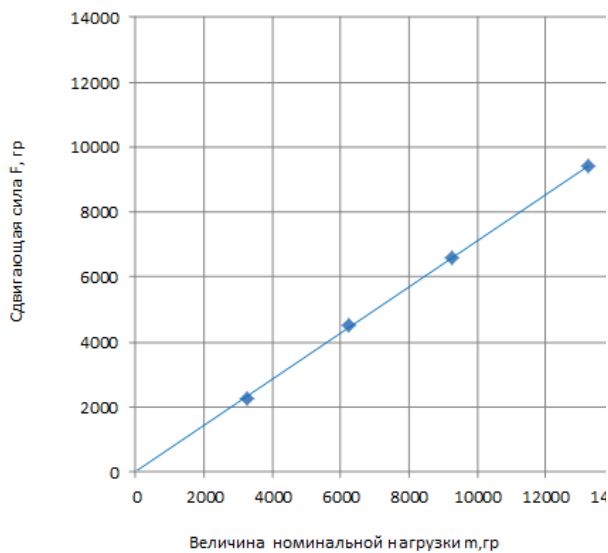
б)



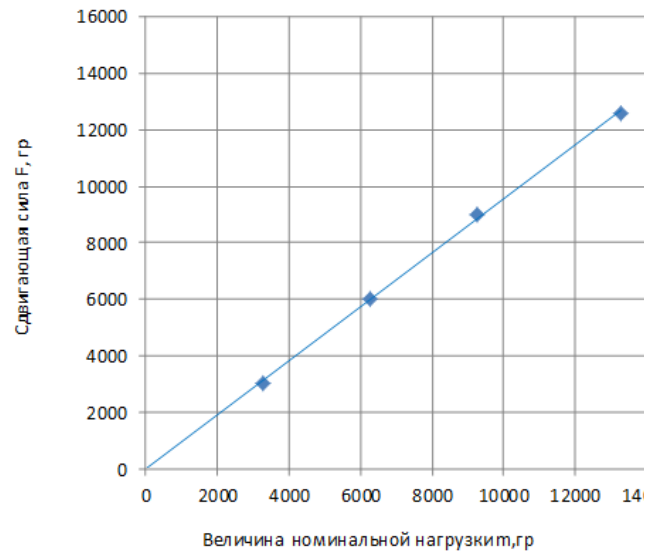
а – при сдвиге образца; б – при скольжении образца

Рисунок 4.8 – Зависимости сдвигающей силы от массы пригрузки при наличии песчаного грунта основания в ненасыщенном водой состоянии

а)



б)



а – при сдвиге образца; б – при скольжении образца

Рисунок 4.9 – Зависимости сдвигающей силы от массы пригрузки при наличии песчаного грунта основания в насыщенном водой состоянии

Из анализа представленных выше графиков видно, что отклонение

значений экспериментальных данных (точки) от аппроксимирующей прямой незначительны, а график зависимости сдвигающей силы от пригрузки имеет линейный характер.

#### 4.5. Результаты расчёта коэффициента трения

На сегодняшний день не выведена точная зависимость для нахождения коэффициента трения, так как это связано со сложностью физических процессов, которые происходят в момент трения, которые не подвергаются описанию, поэтому оценка сил трения происходит в соответствии с эмпирическими данными [18, 41, 94, 111]. Для того, чтобы определить силу трения, следует зафиксировать силу, при которой тело начинает трогаться без ускорения. Коэффициент трения можно определить по формуле:

$$f_{\text{тр}} = \frac{|F|}{N}. \quad (4.12)$$

где:  $F$  – сила трения скольжения;

$N$  – модуль вектора силы нормальной реакции.

Сила нормальной реакции находится по зависимости

$$N = (m_{\text{п.}} + m_{\text{пр.}}) \cdot g. \quad (4.13)$$

где:  $m_{\text{п.}}$  – масса образца покрытия  $m_{\text{п.}} = 3250$  г;

$m_{\text{пр.}}$  – масса пригруза, г;

$g$  - ускорение свободного падения  $g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>.

На рисунке 4.10 показана схема для определения коэффициента трения.

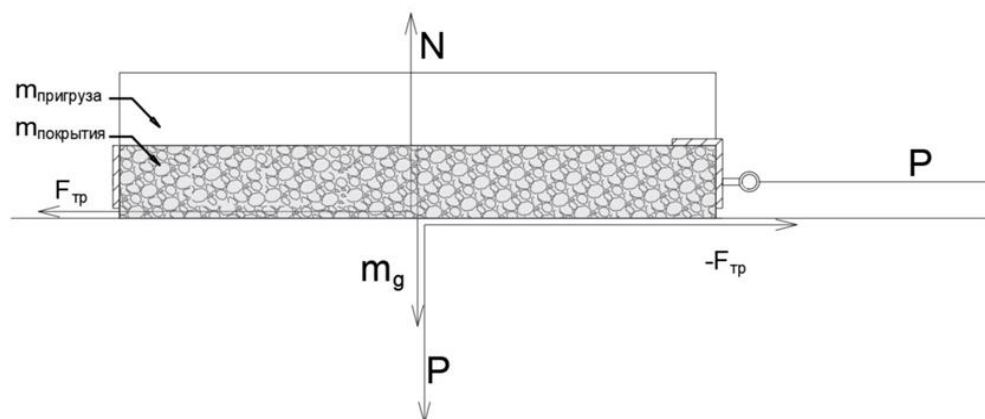


Рисунок 4.10 – Схема, иллюстрирующая определение коэффициента трения

Данные для расчета коэффициента трения между поверхностями соприкосновения образца покрытия и песчаного грунта в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии были получены на модельной установке. Результаты расчета приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета коэффициента трения между поверхностями соприкосновения образца покрытия канала и песчаного грунта основания, находящегося в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии

Параметры пригрузки	Коэффициент трения при песчаном грунте в основании в ненасыщенном и насыщенном водой состоянии	Коэффициент трения скольжения	Коэффициент трения покоя
Без пригрузки	$f_{тр}$ – ненасыщенном водой состоянии	0,85	0,54
Пригрузка 3 кг		0,86	0,57
Пригрузка 6 кг		0,84	0,55
Пригрузка 10 кг		0,85	0,56
Без пригрузки	$f_{тр}$ – насыщенном водой состоянии	0,94	0,71
Пригрузка 3 кг		0,97	0,73
Пригрузка 6 кг		0,98	0,72
Пригрузка 10 кг		0,99	0,72

В случае наличия песчаного грунта основания 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 основания в ненасыщенном водой

состоянии коэффициент трения покоя составляет  $f_{\text{тр}} = 0,55$ , с песчаный 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.

### Выводы по главе

1. Результаты экспериментальных исследований показали, что для защитного покрытия канала из геомата с заполнителем из щебня значения коэффициентов фильтрации для двух режимов фильтрации (напорного и свободного) составили: для напорного режима  $k_{\text{ф}} = 3,24$  см/с, для свободного режима  $k_{\text{ф}} = 3,35$  см/с.

Следовательно, как показывают проведенные эксперименты, крепление из геомата с заполнителем из щебня имеет возможность беспрепятственного прохождения воды через поры защитного покрытия и снижение противодавления под покрытием, что является его преимуществом.

2. Получены из исследований сопротивления на сдвиг значения коэффициентов трения между покрытием из геомата, заполненного щебнем и основанием из песчаного грунта, которые составили:

– 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  $f_{\text{тр}} = 0,72$ .

Более высокие значения коэффициента трения для случая с песчаным грунтом в основании в насыщенном водой состоянии объясняются большей

плотностью такого грунта.

Таким образом, защитное покрытие в виде геомата с наполнителем из щебня может применяться 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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абальянц, С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах / С.Х. Абальянц. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 240 с.
2. Агроскин, И.И. Гидравлика / И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М.: Энергия, 1964. – 352 с.
3. Аллямов, Р.Р. О применении геотекстиля для противофильтрационной защиты каналов и водоемов / Р.Р. Аллямов, Е.Н. Никифорова, А.А. Максимов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (smartex). –2017. – №1. – С. 377-380.
4. Алперин, И.Е. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И.Е. Алперин, Л.С. Быков, В.Б. Гуревич. – М.: Изд-во Транспорт, 1973. – 216 с.
5. Арманд, Д.Л. Антропогенные эрозионные процессы // Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней / Д.Л. Арманд. - М.: Наука, 2009. -411с.
6. Асанова Д.А. Гидравлические сопротивления и кинематика заросших каналов / МГМИ, 1981. Т. 68. С. 135-141.
7. Афонина, М.И. Озеленение склонов и откосов автодорог для противоэрозионной устойчивости / М.И. Афонина // Механизация строительства. 2007 №5 – С. 23-24.
8. Байгалиев, Б.Е. Исследование влияния откосов на гидравлические сопротивления трапецеидальных русел / Б.Е. Байгалиев, Ю.Ф. Гортышов, А.В. Самойленко. // Вестник Казанского Государственного Технического Университета им. А. Н. Туполева, 2012 – № 2, – С. 35-43.
9. Байнатов, Ж.Б. Автомобильные дороги защита откосов автомобильных дорог от размыва / Ж.Б. Байнатов, Б.Ф. Перевозников. – М.: ЦБНТИ Росавтодора, 1992. – 93 с.

10. Баранов, Е.В. Гидравлические обоснование конструкции объёмной полимерной георешётки с крупнозернистым наполнителем: дис. канд. техн. наук: 05.23.16 / Баранов Евгений Викторович. – Москва, 2016. – 233 с.
11. Баранов, Е.В. Применение объёмных полимерных георешеток в укреплении откосов подпорных грунтовых гидротехнических сооружений / Е.В. Баранов, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 45-48.
12. Барышников, Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел: учеб. пособие / Н.Б. Барышников. – СПб.: изд. РГГМУ, 2003. – 147 с.
13. Бойкова, И. Г. Эксплуатация, реконструкция и охрана водных объектов в городах. / В.В. Волшаник, Н.Б. Карпова, В.Г. Печников, Е.И. // – М: Издательство АСВ. 2008. – 256 с.
14. Богомолов, А.И. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью: учеб. пособие / А.И. Богомолов, В.С. Боровков, Ф.Г. Майрановский. – М.: Стройиздат, 1979. – 347 с.
15. Большаков, В.А. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов, В.Н. Попов, В.Ю. Даденков. Киев: Головное издательство издательского объединения «Вища школа», – 1997. – 280 с.
16. Бочков, Е. Л. Геомембраны: качество гарантировано / Е.Л. Бочков // Твердые бытовые отходы. – 2007. – № 4. – С. 32 – 34.
17. Бурмистрова, О.Н. Применение геосинтетических и геопластиковых материалов в дорожном строительстве, текст лекций / О.Н. Бурмистрова, М.А. Воронина. – Ухта: УГТУ, 2012. – 118 с.
18. Верейкин, Е.В. Вопросы устойчивости при укреплении откосов земляного полотна / Е.В. Верейкин, Б.С. Насымбаев // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / СибАДИ. –Омск. – 2011 С. 18-21.
19. Вязова, Е.В. Укрепление откосов противоэрозийными геоматами при реконструкции автомобильных дорог / Е.В. Вязова, А.И. Гилемханов //

Дорожно-транспортный комплекс: состояние, проблемы и перспективы развития. Сборник научных трудов / Волжский филиал МАДИ. - 2016. - С. 22-29.

20. Гвоздь, В.К. Подбор газонной травосмеси для создания конструкций на антропогенно-нарушенных почвах / В.К. Гвоздь, Д.И. Шаламов, Т.М. Джанчаров //В сборнике: Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150 – летию со дня рождения А.Я. Миловича. Сборник статей. Москва.–2024. – С.– 214-219.

21. Гладкий, Р.Н. Анализ методов расчета допустимой скорости течения воды в грунтовых каналах / Р.Н. Гладкий, В.В. Сиротюк, Т.П. Троян // Межвузовский сборник трудов студентов, аспирантов и молодых ученых / СибАДИ. – Омск, 2005 – С. 284-283.

22. Годес, Э.Г. Строительство в водной среде / Э.Г. Годес, Р.М. Нарбут. –Л.: Стройиздат, Ленингр. Отд-ние, 1989. – 527 с.

23. ГОСТ Р 55028-2012 Дороги автомобильные общего пользования Материалы геосинтетические для дорожного строительства Классификация, термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 8 с.

24. ГОСТ Р 53225-2008 Материалы геотекстильные. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2008. – 11 с.

25. ГОСТ 6943.16-94 Метод определения массы на единицу площади.

26. Глазунова, И.В. Технические решения при проектировании биоинженерных сооружений для улучшения качества вод: Учебное пособие/ И.В. Глазунова, Л.Д. Раткович, С.А. Соколова// Курск: изд-во ЗАО «Университетская книга», 2024. – 87 с.

27. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях: учебник / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 287 с.

28. Гришанин, К.В. Гидравлические сопротивления естественных русел / К.В. Гришанин. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 184 с.

29. Гурьев, А.П. Гидравлические исследования противозерозионного покрытия – геомата марки Энкамат А 20/ А.П. Гурьев, Д.В.Козлов, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, А.И. Новиченко, С.Н. Щукин. // Международная научная конференция «Научное кадровое обеспечение продовольственной безопасности России». Доклады ТСХА. Изд-во: Грин Эра 2, 2015. – С. – 358–363.

30. Гурьев А.П. Использование композиционных геоматов для борьбы с водной эрозией / А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, А.В. Еремеев, К.Д. Козлов, В.А. Фартуков, С.Н. Щукин // М.: РГАУ МСХА, 2020. – 253 с.

31. Гурин, К.Г. Неоднородная шероховатость частично облицованных русел крупных каналов: Диссертация на соискание степени кандидата технических наук // НГМА 2001.

32. Гутер, Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опытов / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1962. – 380 с.

33. Дегенбаева, Н.Д. Влияние травянистых растений на гидравлические сопротивления потока // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. - №5. С. 60-61.

34. Дегенбаева, Н.Д. Влияние травянистой растительности на изменение гидравлических характеристик потока при природоприближённом восстановлении рек. автореф. дис. к.т.н. 05.23.07 и 05.23.16 – М.: 2006. 29 с.

35. Дидковский, М.М. Сопротивление движению воды в больших земляных каналах / М. М. Дидковский, И. А. Родионов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1966. – 79 с.

36. Еремеев, А.В. Исследование фильтрационных характеристик геомата с наполнителем из щебня и битум-полимера / А.В. Еремеев, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. – 2018. – № 4. – С. 48-53.

37. Еремеев, А.В. Обзор применения полимербетонной композиции на основе уретановых связей в гидротехническом строительстве / А.В. Еремеев,

Н.В. Ханов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов «Наука молодых - агропромышленному комплексу». Сборник статей. М.: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2016. – С. 221-223.

38. Еремеев, А.В. Определение коэффициента трения геомата на песчаном грунте / А.В. Еремеев, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Мелиорация земель – неотъемлемая часть восстановления и развития АПК Нечерноземной зоны Российской Федерации. Материалы международной научно-практической конференции 24-25 октября 2018 г. –М.: Изд. ВНИИГиМ. 2019. – С. 530-534.

39. Еремеев, А.В. Оптимизация структуры геомата с наполнителем из щебня и битум-полимера / А.В. Еремеев, Н.В. Ханов // Природообустройство. – 2018. № 1. – С. 60-64.

40. 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.

41. Еремеев, А.В. Экспериментальное обоснование использования геоматов с полимерным вяжущим: дис. канд. техн. наук: 05.23.07 / Еремеев Андрей Викторович. – Москва, 2019. – 211 с.

42. Жукова, Т.Ю. Анализ применения инновационного противозерозионного 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.

43. Жукова, Т.Ю. Аспекты применения противозерозионного покрытия - геомата с грунтовым наполнителем 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.

44. Жукова, Т.Ю. Инновационные берегоукрепительные сооружения водных объектов / Т.Ю. Жукова // В книге: Молодые ученые в аграрной науке. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Луганск, 2024. – С. 181-183.

45. Жукова, Т.Ю. Исследование возможности применения инженерно - экологического противозерозийного покрытия - геомата с грунтом и посевом трав /Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев, Н.В. Ханов, М.И. Зборовская, А.И. Новиченко //Экономика строительства. – 2022. – №11. – С. 95-101.

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

47. 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.

48. Жукова, Т.Ю. Особенности применения противозерозийного покрытия - геомата с грунтовым наполнителем 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.

49. Жукова, Т.Ю. Современное и инженерно-экологическое противозерозийное 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.

50. Жукова, Т.Ю. Современные противозерозионные 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.

51. 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.

52. Жукова, Т.Ю. Современные тенденции и перспективы применения инновационного противозерозионного 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.

53. Жукова, Т.Ю. Сравнение гидравлических характеристик геоматов, заполненных щебнем с вяжущим заполнителем и без него / Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев, Д.А. Алексеев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2024. –№2 (93). –С 31-43.

54. 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.

55. Железняков, Г.В. Пропускная способность каналов и русел / Г.В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 308 с.

56. Зуйков, А.Л. Гидравлика: учебник для вузов: в 2 томах. Т. 1: Основы механики жидкости / А.Л. Зуйков. – М.: Изд-во МГСУ, 2014. – 518 с.

57. Иваненко, Ю.Г. Гидравлические аспекты устойчивых водных потоков в неразмываемых и размываемых руслах / Ю.Г. Иваненко, А.А. Ткачева, А.Ю. Иваненко. – Новочеркасск: Лик, 2013. – 352 с.
58. Катышевцева, В.Г. Прибрежно-водные и водные растения Брянской области/ В.Г. Катышевцева. –М., 1980. –78 с.
59. Квассер, Я. Противоэрозионная защита откосов дамб и земляных плотин при помощи крепления из известкового щебня и мастики / Я. Квассер, А. Биберштайн, Х. Вершинг, Г. Бернхард // Гидросооружения. – 2008. – 1. – С. 10–15.
60. Киселёв, П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г. Киселёв, А.Д. Альтшуль, Н.В. Данильченко, А.А. Каспарсон, Г.И. Кривченко, Н.Н. Пашков, С.М. Слисский. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 312 с.
61. Козлов, К.Д. Исследования гидродинамического воздействия водного потока на защитное покрытие из геосинтетического материала / К.Д. Козлов, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, Д.В. Козлов // Строительство: наука и образование. – 2018. – № 1. – С. 108-117.
62. Козлов, К.Д. Гидравлические исследования водопропускных сооружений с противоэрозионным покрытием из геомата: дис. канд. техн. наук: 05.23.16 / Козлов Константин Дмитриевич. – Москва, 2017. – 165 с.
63. Козлов, К.Д. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала / К.Д. Козлов, Н.В. Ханов, А.П. Гурьев // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 80-86.
64. Козлов, К.Д. Гидравлические исследования противоэрозионного покрытия - геомата марки Энкамат А20 / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, К.Д. Козлов, В. А. Фартуков // Сборник трудов Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – М.: Изд-во ФГБОУ ВПО «МГСУ». – 2015. – С. 353-356.

65. Козлов, К.Д. Гидравлические исследования условий работы покрытия из геокомпозитного материала - геомата марки Энкамат А20 / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, К.Д. Козлов // Сборник статей Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2015. – С. 305-307.

66. Козлов, К.Д. Модельные гидравлические исследования для определения коэффициента шероховатости материала Энкамат А20 / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов // Научная жизнь. – 2016. – № 1. – С. 6-12.

67. Козлов, К.Д. Определение коэффициента шероховатости материала Энкамат А20 по результатам модельных исследований / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, К.Д. Козлов, // Сборник статей международной исследовательской организации "Cognitio" по материалам V международной научно-практической конференции: «Актуальные проблемы науки XXI века». – М.: Международная исследовательская организация "Cognitio". – 2015. – С. 117-122.

68. Козлов, К.Д. Определение коэффициента шероховатости материала энкамат А20 по результатам модельных исследований / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 4. – С. 34-41.

69. Козырь, И.Е. Практикум по гидравлике. Учебно-методическое пособие/ И.Е. Козырь, И.Ф. Пикалова, Н.В. Ханов. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 176 с.

70. Кондратьев, В.Н. Обобщение результатов экспериментальных исследований укрепления откосов и русловой части каналов армированными травяными коврами / В.Н. Кондратьев, Т.Г. Свиридович // журнал Мелиорация. – 2015. – №1. – С. 171-188.

71. Косиченко, Ю.М. Гидравлика мелиоративных каналов. Учебное пособие – Новочеркасск: 1992. – 143с.

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

73. Косиченко, Ю.М. Противofiltrационные покрытия из геосинтетических материалов / Ю.М. Косиченко, О.А. Баев. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. - 239 с.

74. Косиченко, Ю.М. Рекомендации по применению геосинтетических материалов для противofiltrационных экранов каналов, водоемов и накопителей / Ю.М. Косиченко, О.А. Баев. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. - 64 с.

75. Кочетков, А.В. Применение геосинтетики в транспортном строительстве и ландшафтном сервисе / А. В. Кочетков, Н. Е. Кокодеева, Ш. Н. Валиев // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015 №3 (11) – С. 16-23.

76. Кривицкий, С. В. Экобионика: биоинженерная защита берега водоема / Кривицкий С. В., Федотова О. А., Якубовская И. О. // Фундаментальные исследования основных направлений технических и физико-математических наук: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Челябинск, 19 ноября 2017). – Стерлитамак: АМИ. – 2017. – С. 68-73.

77. Курбанов, С.О. Проблемы и пути решения вопросов инженерной защиты и восстановления прибрежных нарушенных земель городских территорий / С.О. Курбанов, Н.В. Ханов, О.Н. Черных // Природообустройство. – 2023. – № 1. – С. 38-46.

78. Леви, И.И. Динамика русловых потоков / И.И. Леви. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.

79. Мирцхулава, Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости / Ц.Е. Мирцхулава. – М.: «Колос», 1967. – 179 с.

80. Методические указания по оценке местной устойчивости откосов и выбору способов их укрепления в различных природных условиях. – М.: ЦНИИС, 1970. – 60 с.

81. Мельникова, Е.П. Повышение устойчивости грунтовых сооружений путем армирования геосинтетическими материалами / Е.П. Мельникова, Ю.В. Нужненко, Т.В. Скрыпник // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. – 2016. – № 1. – С. 29-34.

82. Нгуен, Тай. Исследование гидравлических сопротивлений заросших русел / Тай Нгуен – «Сб.труд. МИСИ», М. – 1972. – № 89 – С. 65-72.

83. Невский, В.В. Гидравлика. Гидрология. Гидрометрия / В.В. Невский, Л.Н. Копац, Ю.С. Смирнов. – М.: Транспорт, 1988. – 231 с.

84. Новиков, В.Ю. Аспекты берегозащиты / В.Ю. Новиков. – Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2009. – 160 с.

85. Овсепья, В.С. Биологический способ защиты берегов рек от размыва / В.С. Овсепьян, Е.Ф. Чебанова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. ст. по материалам IX Всерос. конф. молодых ученых, посвящ. 75-летию В. М. Шевцова. – Краснодар: КубГАУ. – 2016. – С. 843-844.

86. ОДМ 218.2.049-2015 Рекомендации по проектированию и строительству габионных конструкций на автомобильных дорогах / М.: РОСАВТОДОР, 2015. – 107 с.

87. ОДМ 218.2.078-2016 Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования / М.: РОСАВТОДОР, 2016. – 246 с.

88. ОДМ 218.2.064-2015. «Методы укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог засевом трав в различных климатических зонах» / М.: РОСАВТОДОР, 2015. -69 с.

89. ОДМ 218.5.005-2010 Классификация, термины, определения геосинтетических материалов применительно к дорожному хозяйству / М.: РОСАВТОДОР, 2010. – 16 с.

90. Павловский, Н.Н. Гидравлический справочник. / Н.Н. Павловский. – М. –Л. Главная редакция энергетической литературы, 1937. – 905 с.

91.Перевозников, Б.Ф. Автомобильные дорожно откосно-прибрежные укрепления автомобильных дорог / Б.Ф. Перевозников. –М.: Информавтодор, 1993. – 176 с.

92. Прокопов, А. Ю. Выбор и обоснование методов берегоукрепления (на примере р. Кубань в г. Краснодаре) / А.Ю. Прокопов, В.А. Лебидко // Известия Ростовского государственного строительного университета. – 2015. – Т. 2. – № 20. – С. 41-48.

93.Пономарев, А.Б. Анализ и проблемы исследований геосинтетических материалов в России / А.Б. Пономарев, В.Г. Офрихтер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 68-73.

94. Рассказов, Л.Н. Гидротехнические сооружения Часть 1 / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов, Н.А. Анискин, В.В. Малаханов, А.С. Бестужева, М.П. Саинов, П.В. Солдатов, В.В. Толстиков. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 576 с.

95. Румянцев, И.С. Использование методов инженерной биологии в практике гидротехнического и природоохранного строительства/ И.С. Румянцев, Р.К. Кромер. Под ред. И.С. Румянцева. – М.: МГУП, 2001. – 287 с.

96. Самойленко, А.В. Гидравлическое сопротивление и шероховатость трапецеидальных русел с учетом тормозящего влияния откосов: дис. канд.

техн. наук: 01.02.05 / Самоиленко Александр Владимирович. – Казань, 2014. – 143 с.

97. Соколов, Ю.Н. Морфологические показатели растительности в связи с исследованием гидравлического сопротивления поймы /Ю.Н. Соколов. – Вопр. водного хозяйства. – Минск. –1976. – Вып.2. – С. 97-105.

98. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. – М.: Госстрой России, 2013. – 99 с.

99. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. – 2013.

100. СТО 5017094408-003-2012 «ЕНКАМАТ»

101. Тимофеева, Л.М. О проблемах применения геосинтетических материалов в современном транспортном строительстве / Л.М. Тимофеева, Л.С. Шепетева // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. – 2012. – № 3. – С. 221-224.

102. Федоренко, Е.В. Геотехника и геосинтетика в вопросах и ответах. Справочное пособие / Е.В. Федоренко. – СПб.: WWW.DARIKNIGI.RU, – 2016. – 198 с.

103. Халиулина, Л.Э. Применение биоматов в районах крайнего севера / Л.Э. Халиулина // Наука, образование и культура. – 2018. – № 10 (34). – С. 14-15.

104. 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.

105. Ханов, Н.В. Обзор применения современных геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве / Н.В. Ханов, А.В. Еремеев // В сборнике: Международная научная конференция молодых ученых и

специалистов, посвященная 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева  
Сборник статей. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2015. – С. 336-339.

106. Ханов, Н. В. Перспективы использования объёмных полимерных георешёток в области природоохранного обустройства откосов водных объектов/ Н. В. Ханов, А. П. Гурьев, Е.В. Баранов // Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 287. Том II. Часть I. — М.: Грин Эра 2: ООО «Сам полиграфист». – 2015. – С. 413-417.

107. Чалов, Р.С. Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 11. / Р.С. Чалов – М.: изд-во Моск. ун-та., 1997. – 260 с.

108.Черных, О.Н. Пути решения проблем комплексной экологической реабилитации и природоприближенного восстановления малых рек русских усадеб Москвы / О.Н. Черных, Н.В. Ханов, А.В. Бурлаченко // Природообустройство, 2019. – №1. С.47-55.

109.Черных, О.Н. Берегоукрепительные конструкции водных объектов часть 1 / О.Н. Черных, Н.В. Ханов, А.В. Бурлаченко // М.: РГАУ МСХА, 2019. — 145 с.

110. Черных, О.Н. Берегоукрепительные конструкции водных объектов часть 2 / О.Н. Черных, Н.В. Ханов, А.В. Бурлаченко // М.: РГАУ МСХА, 2020. — 185 с.

111. Чугаев, Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 672 с.

112. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов. /Пер. с англ. / М., Стройиздат, 1969, – 464 с.

113.Шнип, С.А. Роль трав в предотвращении водной эрозии откосов / С.А. Шнип // Труды. Белорус. НИИ мелиорации и водного хозяйства. – М.,1979. – т.27. – С.153–156.

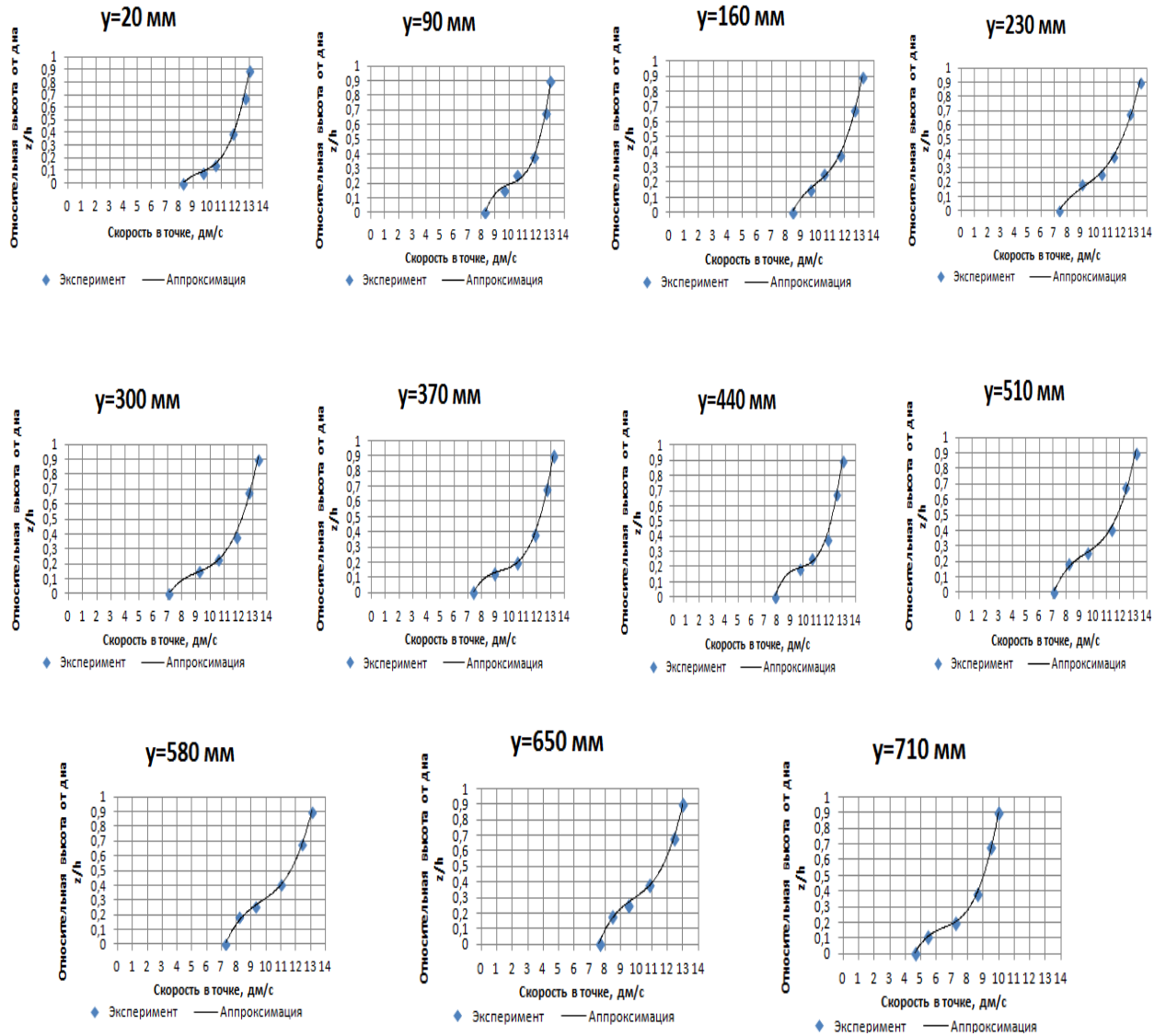
114. Шнайдер, В.А. Определение коэффициента шероховатости геоматов / В.А. Шнайдер, В.В. Сиротюк, Т.П. Троян, Е.Ю. Мосур // Вестник СибАДИ. – 2015. – № 1. – С. 73–79.

115. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник / Д.В. Штеренлихт. – 5-е изд. – СПб. : Лань, 2015. – 656 с.
116. Шапов, Н.М. Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин: теоретическое и практическое руководство / Н.М. Шапов. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 237 с.
117. Щеглов, Д.И. Эрозия и охрана почв. Учебно-методическое пособие / Д.И. Щеглов, Н.С. Горбунова. – Воронеж.: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011. – 34 с.
118. Abbott, M.B. Elements of the theory of free surface flows / M.B. Abbott. – Pitman Publishing LTD, London, 1980. – 273.
119. Bartolome, J.M. Changes in vegetation. Resource bull / B.N. Aleen, H.F. Heady – U.S. Forest service, 1998., T.PNW –157.,p 36–53.
120. Khatsuria, R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators / R.M. Khatsuria –New York.: Marcel Dekker, 2005. – 649 p.
121. Zhukova, T.Y. Study of possibility application of anti-erosion coating – geomate with ground and sowing of permanent grasses / T.Y. Zhukova, A.V. Eremeev, N.V. Khanov, B. Shodiev // E3S Web Conferences. 2023. – Vol. 365. 04034.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

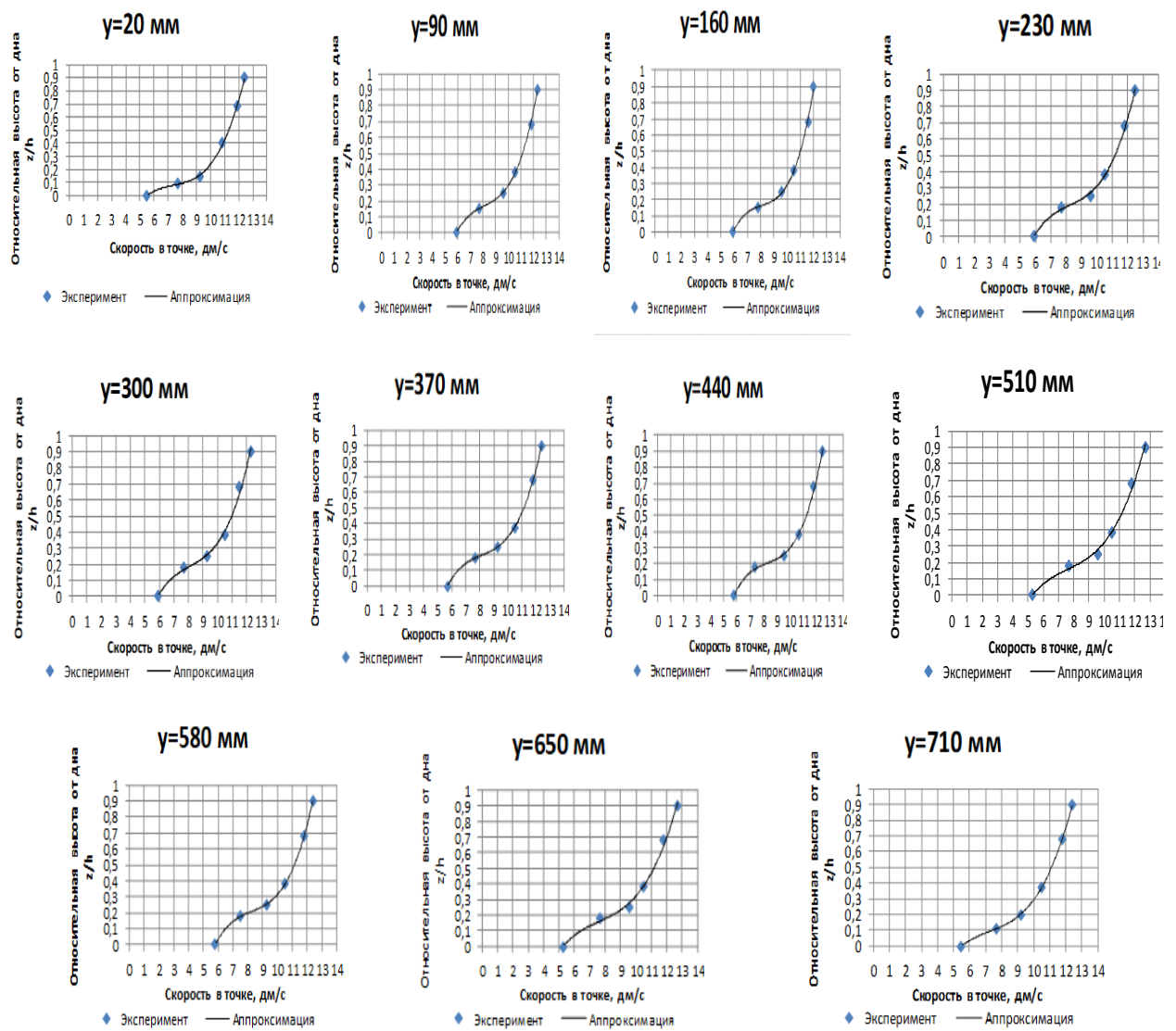
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты измерения скоростей потока представлены в виде эпюр для противэрозионных покрытий, состоящих из геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс

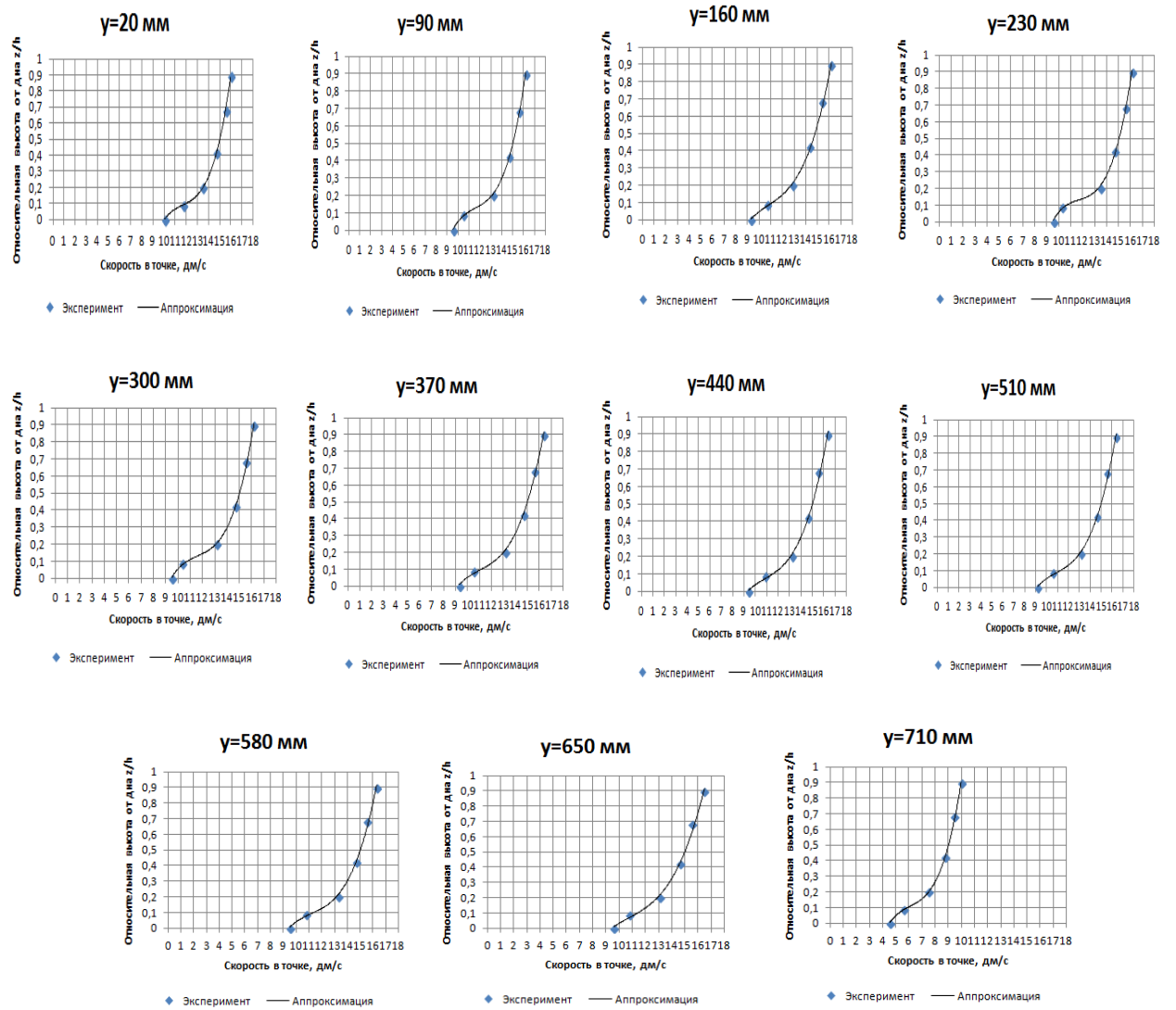


Эпюры скоростей потока на мерных вертикалях в створе 4 при расходе

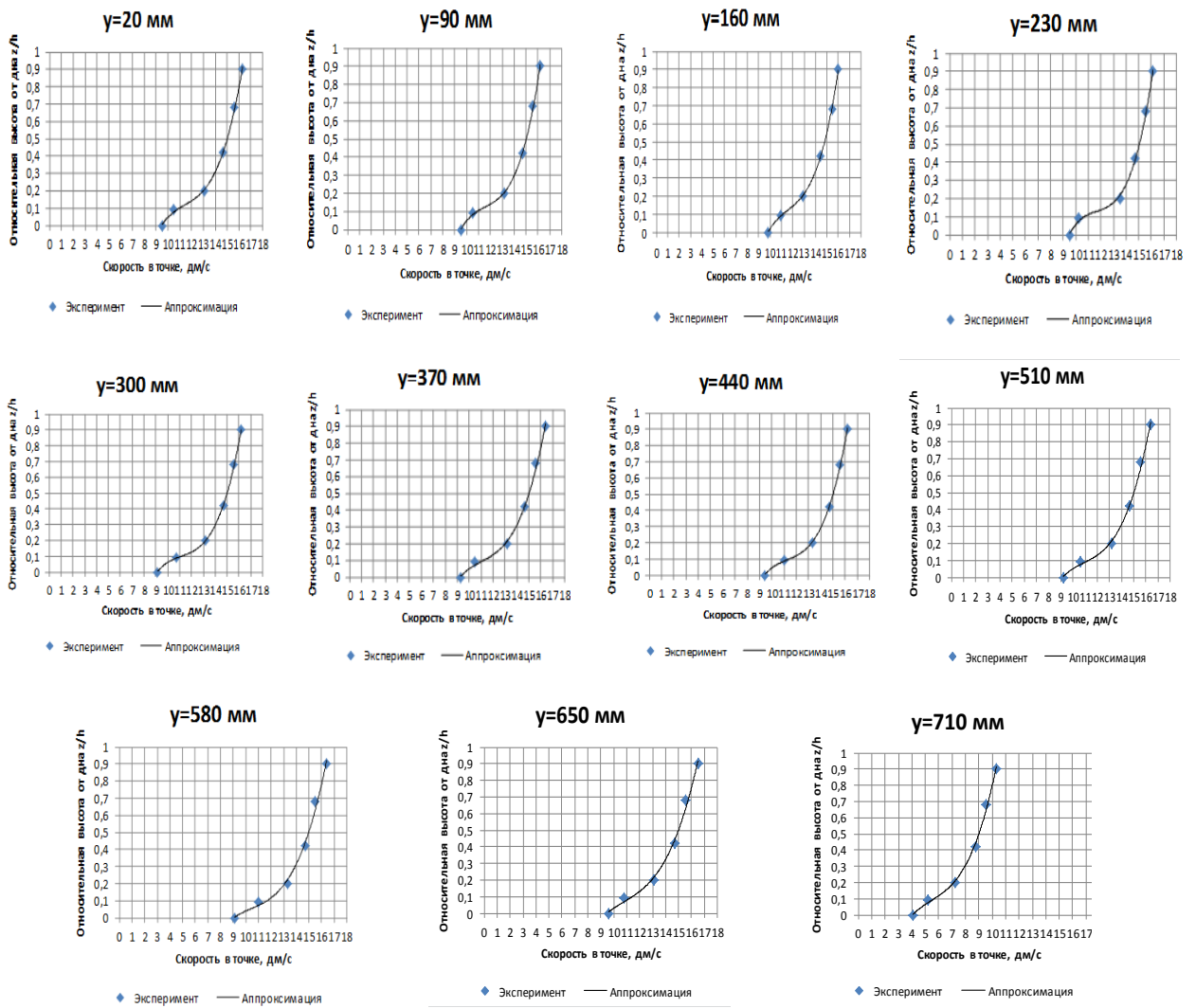
$$Q = 84,33 \text{ л/с, при уклоне водотока } i = 0,010$$



Эпюры скоростей потока на мерных вертикалях в створе 4 при расходе  $Q = 43,7 \text{ л/с}$ , при уклоне водотока  $i = 0,017$



Эпюры скоростей потока на мерных вертикалях в створе 4 при расходе  $Q=128,03$  л/с, высота травы  $h_{расч}=150$  мм при уклоне водотока  $i=0,010$



Эпюры скоростей потока на мерных вертикалях в створе 4 при расходе  $Q=84,33$  л/с, высота травы  $h_{расч}=100$  мм при уклоне водотока  $i=0,030$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

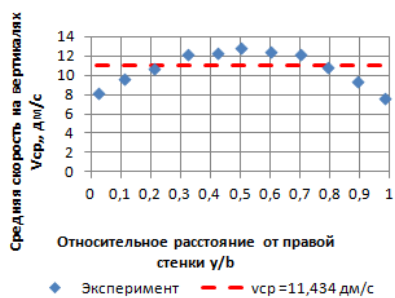
Результаты обработки данных эксперимента для противоэрозионных покрытий, состоящих из геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс



а)



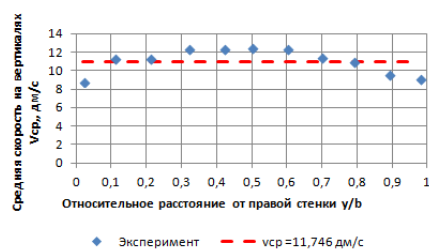
б)



в)



г)



д)

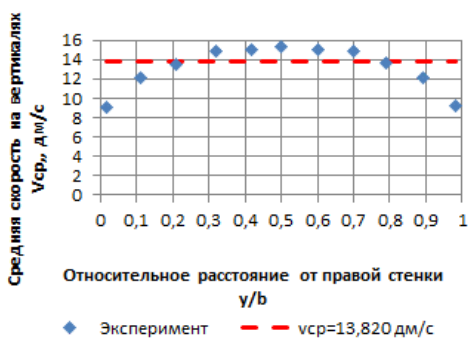
Распределение скоростей по ширине сечения в первом створе (а), во втором створе (б), в третьем створе (в), в четвёртом створе (г) и в пятом створе (д), при уклоне  $i = 0,0087$ , расходе  $Q = 128,03$  л/с



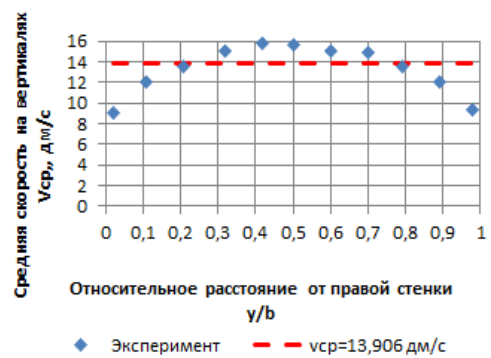
а)



б)



в)



г)

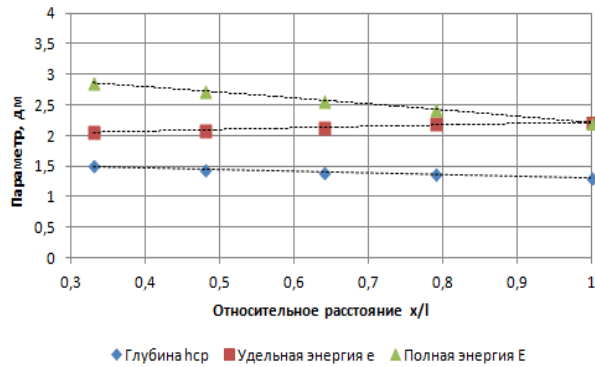


д)

Распределение скоростей по ширине сечения в первом створе (а), во втором створе (б), в третьем створе (в), в четвёртом створе (г) и в пятом створе (д), при расходе  $Q=128,03 \text{ л/с}$ , высота травы  $h_{расч}=150 \text{ мм}$  при уклоне водотока  $i=0,017$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

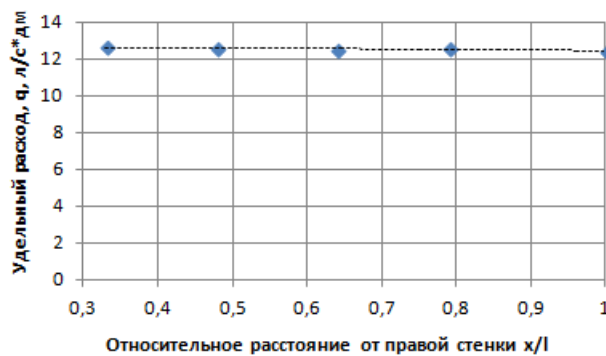
Графики изменения по длине лотка основных характеристик потока для противозерозионных покрытий, состоящих из геомата с заполнителем из щебня и геомата с заполнителем из щебня с посевом многолетних трав рода райграс



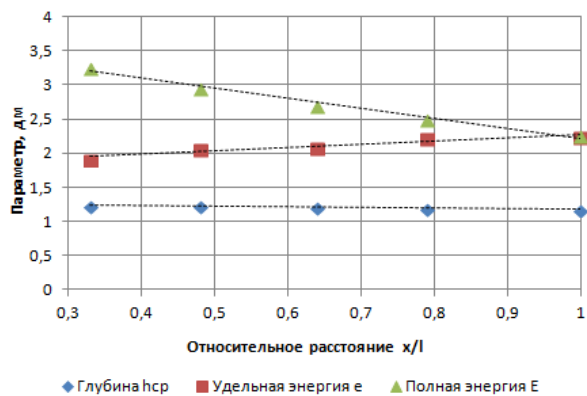
Распределение полной удельной энергии  $E$ , удельной энергии  $e$  и средних глубин  $h_{cp}$  по длине лотка при  $i=0,010$  и  $Q=84,33$  л/с



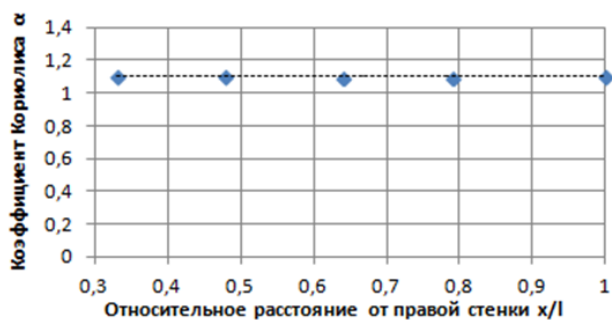
Распределение коэффициента Кориолиса  $\alpha$  по длине лотка при  $i=0,010$  и  $Q=84,33$  л/с



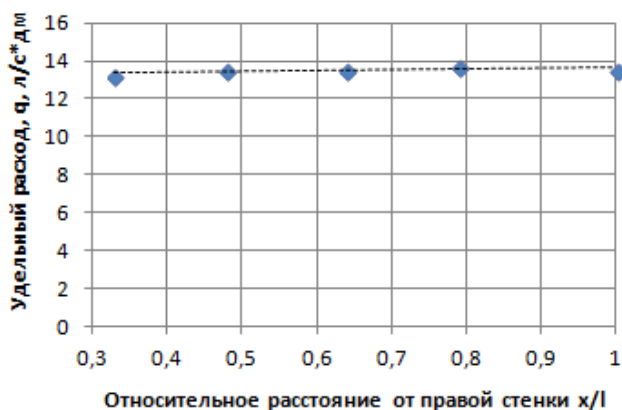
Изменение удельного расхода  $q$  вдоль протяженности рабочего участка при  $i=0,010$  и  $Q=84,33$  л/с



Распределение полной удельной энергии  $E$ , удельной энергии  $e$  и средних глубин  $h_{расч}=100$  мм по длине лотка при  $i=0,03$  и  $Q=84,33$  л/с



Распределение коэффициента Кориолиса  $\alpha$  по длине лотка  $h_{расч}=100$  мм при  $i=0,03$  и  $Q=84,33$  л/с



Изменение удельного расхода  $q$  вдоль протяженности рабочего участка  $h_{расч}=100$  мм при  $i=0,03$  и  $Q=84,33$  л/с

*Научное издание*

**Ханов Нартмир Владимирович**  
**Жукова Татьяна Юрьевна**  
**Фартуков Василий Александрович**  
**Еремеев Андрей Викторович**  
**Алексеев Даниил Андреевич**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГЕОМАТОВ С РАЗНЫМ  
ТИПОМ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ВОДНЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

Монография

**Под общей редакцией**  
**Н.В. Ханова**