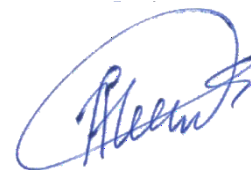


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДЕПАРТАМЕНТ МЕЛИОРАЦИИ, ЗЕМЕЛЬНОЙ  
ПОЛИТИКИ И ГОССОБСТВЕННОСТИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «РОССИЙСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕЛИОРАЦИИ»  
(ФГБНУ «РОСНИИПМ»)

На правах рукописи



ГАРБУЗ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА  
БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ  
КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

06.01.02 – Мелиорация, рекультивация и охрана земель

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
О. А. Баев

Новочеркасск 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	с.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Виды полимерных композиционных материалов для ремонта бетонных сооружений мелиоративных систем и облицовок каналов... 10	10
1.2 Существующие способы и технологии ремонта бетонных сооружений мелиоративных систем жидкими полимерными композициями.....	20
1.3 Зарубежный и отечественный опыт применения рулонных и жидких полимерных композиций для ремонта облицовок мелиоративных каналов .....	26
1.4 Обзор исследований надежности, водопроницаемости и эффективности защитных покрытий из композиционных материалов для мелиоративных каналов.....	30
Выводы по главе 1 .....	32
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОБЛИЦОВОК С ТРЕЩИНАМИ .....</b>	<b>33</b>
2.1 Решение задачи водопроницаемости трещин бетонной облицовки при истечении в атмосферу .....	33
2.2 Гидравлическая модель водопроницаемости облицовки канала при наличии трещин и разрушенных швов .....	39
2.3 Решение общей задачи потерь воды через облицовку с полимерной мембраной и защитным покрытием из бетона при длительной эксплуатации мелиоративных каналов.....	55
2.4 Особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами с учетом проницаемости основания .....	71
Выводы по главе 2.....	82
<b>ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И НАТУРНЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЛИЦОВОК ПРИ НАЛИЧИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ .....</b>	<b>84</b>
3.1 Описание лабораторной установки.....	84
3.2 Моделирование повреждения в виде шероховатых трещин на бетонной облицовке мелиоративного канала .....	85

3.3 Результаты экспериментальных исследований водопроницаемости трещин бетонной облицовки канала .....	88
3.4 Результаты экспериментальных исследований водопроницаемости закольматированных трещин бетонной облицовки канала .....	96
3.5 Натурные обследования состояния облицовок мелиоративных каналов .....	105
3.5.1 Результаты натурных обследований каналов Азовской, Багаевской и Нижне-Донской оросительных систем .....	107
3.5.2 Оценка технического состояния бетонной облицовки на участке Багаевского распределительного канала .....	115
Выводы по главе 3 .....	123
<b>ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ</b> .....	125
4.1 Новый способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок мелиоративных каналов .....	125
4.2 Технология и способ ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов полимерным композиционным материалом жидкая резина .....	128
4.3 Способ ремонта бетонных облицовок мелиоративных каналов наплавленными геомембранами .....	133
4.4 Продление срока службы бетонной облицовки канала путем нанесения жидкой резины .....	136
4.5 Экономическая эффективность ремонта повреждений бетонных облицовок каналов композитными материалами .....	138
Выводы по главе 4 .....	142
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	144
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	146
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	161
Приложение А Копии патентов на изобретение РФ и программ для ЭВМ .....	162
Приложение Б Акты внедрения результатов НИР .....	167

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В Российской Федерации сеть каналов межбассейнового и внутрибассейнового перераспределения стока (общей протяженностью более 3 тыс. км) осуществляют переброску стока в объеме до  $17 \text{ км}^3/\text{год}$ , что гарантирует надежное обеспечение потребностей различных регионов страны в водных ресурсах. Мелиоративные каналы оросительных систем различного порядка имеют протяженность более 23 тыс. км, а использование воды при орошении составляет порядка  $8,5 \text{ км}^3/\text{год}$ , при этом потери –  $2,6 \text{ км}^3/\text{год}$  или более 30 % от объема воды, подаваемой на орошение.

В целях сокращения значительных потерь воды на фильтрацию при ее транспортировании от водоисточника до орошаемого поля необходимо обеспечить надежную работу бетонных облицовок каналов, общая протяженность которых достигает 20 %, при планах по реконструкции оросительных сетей (в том числе восстановлению и ремонту) до 45 % от всей протяженности каналов.

Согласно «Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации на 2022–2031 годы» планируется строительство, модернизация, реконструкция и техническое перевооружение мелиоративных систем, в том числе оросительных и магистральных каналов с применением современных материалов и усовершенствованных технологий, для предотвращения выбытия из оборота земель сельскохозяйственного назначения до 2956,3 тыс. га.

Для уменьшения потерь воды из каналов, увеличения срока службы бетонных облицовок мелиоративных систем, целесообразно применение современных защитных покрытий из полимерных композиционных материалов. Такие облицовки уже получили широкое распространение в США, Германии, Франции и ряде других стран в качестве эффективного средства, направленного на уменьшение фильтрационных потерь, при ремонте и реконструкции бетонных элементов, заделке деформационных швов облицовок и др.



**Степень разработанности темы исследований.** Изучением защитных покрытий из полимерных материалов на оросительных системах занимались многие ученые: А.Г. Алимов, О.А. Баев, М.А. Бандурин, В.А. Белов, Р.М. Горбачев, И.М. Елшин, А.В. Ищенко, Ю.М. Косиченко, А.А. Миронов, В.Б. Резник, В.М. Рубин, С.В. Сольский, Н.В. Ханов, В.Н. Щедрин и др.

Технологии, способы ремонта и восстановления оросительных систем изучены в работах: Ф.К. Абдразакова, В.М. Давиденко В.И. Ольгаренко, А.А. Созаева, Н.Ф. Чередниченко, И.А. Чуприна и др.

За рубежом в середине XX века стали проводиться натурные эксперименты по использованию покрытий из полимерных композиционных материалов различной толщины при строительстве и реконструкции оросительных каналов и плотин, такими учеными как: D. Cazzuffi, A. Matsuoka, T. Nishiba, T. Ono, D. Papadopoulos, M. Rogers, J. Winfield и др. В России такие покрытия стали разрабатываться и применяться с середины 1990-х годов, однако исследования по применению жидких полимерных композиционных материалов для ремонта бетонных облицовок каналов практически не проводились.

**Цель работы** заключается в научном обосновании конструктивно-технических решений и технологий для ремонта бетонных облицовок оросительных каналов жидкими полимерными композиционными материалами, создании моделей водопроницаемости облицовок при наличии трещин.

**Задачи исследований:**

- изучить отечественный и зарубежный опыт применения полимерных композиционных материалов для ремонта облицовок мелиоративных каналов;
- разработать гидравлическую модель водопроницаемости бетонной облицовки при длительной эксплуатации оросительного канала;
- разработать теоретическую модель водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закоматированными швами с учетом и без учета их проницаемости при длительной эксплуатации каналов мелиоративных систем;

- провести лабораторные исследования процесса водопроницаемости поврежденных участков бетонной облицовки канала в виде трещин различной ширины и длины;

- дать оценку водопроницаемости реконструируемого участка оросительного канала с облицовкой из композиционных материалов;

- разработать технологии ремонта повреждений бетонных облицовок каналов мелиоративных систем;

- выполнить оценку эффективности ремонта мелиоративных каналов с использованием новых способов и технологий.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана гидравлическая модель и методика расчета водопроницаемости бетонной облицовки канала с различной шириной раскрытия трещин, а также полностью или частично разрушенными деформационными швами;

- получены новые зависимости для определения удельного расхода через трещины бетонной облицовки оросительного канала при истечении в атмосферу и грунт основания, а также расчетные формулы для определения удельного расхода через закольматированные швы;

- выполнены лабораторные исследования водопроницаемости трещин бетонных облицовок каналов, по результатам которых получены графические и эмпирические зависимости;

- представлены результаты натурных исследований ремонта облицовок мелиоративных каналов жидкими полимерными композициями (заделки швов и трещин) различных повреждений;

- разработан новый способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов, на который получен патент на изобретение РФ;

- разработана технология ремонта бетонных облицовок каналов жидкой резиной, позволяющая осуществлять ремонт поверхностных повреждений бетона облицовки (большой и малой площади, а также разрушенных швов и трещин), на которую получен патент на изобретение РФ;

– разработана методика расчета водопроницаемости бетонной облицовки канала с закольматированными швами, которая зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ;

– разработана методика и программа гидравлического расчета основных параметров водопроницаемости бетонной облицовки каналов.

**Теоретическую и практическую значимость** работы составляют:

– методики расчета и номограммы для определения основных параметров водопроницаемости трещин бетонных облицовок мелиоративных каналов;

– теоретические и эмпирические зависимости для определения водопроницаемости бетонных облицовок каналов;

– новые способы, технологии ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок мелиоративных каналов, защищенные патентами РФ;

– методика гидравлического расчета основных параметров каналов, зарегистрированная в качестве программы для ЭВМ.

**Методология и методы диссертационного исследования.**

Методология исследований состоит в разработке методов расчета и конструктивно-технологических решений для ремонта бетонных облицовок каналов с целью снижения потерь воды на фильтрацию из мелиоративных систем при подаче воды на орошение, и продления срока службы. При проведении исследований использовались теоретические, лабораторные и натурные методы. Теоретические исследования проводились методами теории фильтрации (метод конформных отображений), уравнения Бернулли и надежности (метод Аррениуса). Лабораторные исследования осуществлялись на модели бетонной облицовки (фильтрационной колонке). Натурные наблюдения выполнялись на действующих каналах мелиоративных систем (Багаевских распределительных каналах: Бг-Р-7, Бг-Р-6, Бг-Р-5).

**Объектом исследования** являются оросительные каналы мелиоративных систем.

**Предмет исследования** – конструктивно-технические решения ремонта облицовок оросительных каналов полимерными композициями.

**Положения, выносимые на защиту:**

- гидравлическая модель водопроницаемости бетонной облицовки канала через трещины и швы (полностью или частично разрушенные);
- теоретические и эмпирические зависимости для расчета удельного расхода через трещины бетонных облицовок при истечении в атмосферу и грунт основания, а также расчетные формулы для определения водопроницаемости через закольматированные швы бетонных облицовок;
- результаты лабораторных исследований водопроницаемости трещин бетонных облицовок на фильтрационной колонке;
- данные оценки участков бетонных облицовок каналов до и после ремонта жидкими полимерными композитами;
- новый способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок мелиоративных каналов;
- новая технология и способ ремонта бетонных облицовок длительно-работающих каналов полимерным композиционным материалом жидкая резина.

**Степень достоверности** подтверждается значительным объемом проведенных исследований и обработкой полученных данных с применением ПЭВМ, сравнением результатов экспериментальных исследований на фильтрационной колонке, данными натурных наблюдений с расчетами по полученным теоретическим зависимостям и формулами других авторов.

**Внедрение результатов.** Способы ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок оросительных каналов по патентам на изобретения № 2669302 и № 2732588 внедрены в ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз» при проведении реконструкции Нижне-Манычской оросительной системы с ожидаемым экономическим эффектом 1,7 и 2,12 млн руб. Методики гидравлических и оптимизационных расчетов магистрального и распределительного каналов различного порядка по программе для ЭВМ № 2014619417 «RasChet.canal» апробированы в Сальском филиале «Управление «Ростовмелиоводхоз» при проведении гидравлических расчетов основных параметров каналов оросительной системы и

выполнении оптимизационных расчетов с ожидаемым экономическим эффектом 262,55 тыс. руб.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации», г. Новочеркасск, 15 сентября 2017 г.; VII международной научной конференции «Технические науки в России и за рубежом», г. Москва, Ноябрь 2017; XII Международной научно-практической конференции «Техновод-2019» 22–23 октября 2019 г., г. Москва; Научно-практической конференции «Повышение надежности противofильтрационных облицовок каналов и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений», г. Новочеркасск, 20 мая 2016 г.; Научно-практической конференции «Техническое состояние и безопасность мелиоративных систем» 25 апреля 2018 г.; Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации» 28 августа 2020 г.; Научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» 30 октября 2020 г.; Научно-практической конференции «Техническое состояние и безопасность мелиоративных систем» 19 февраля 2021 г. и других.

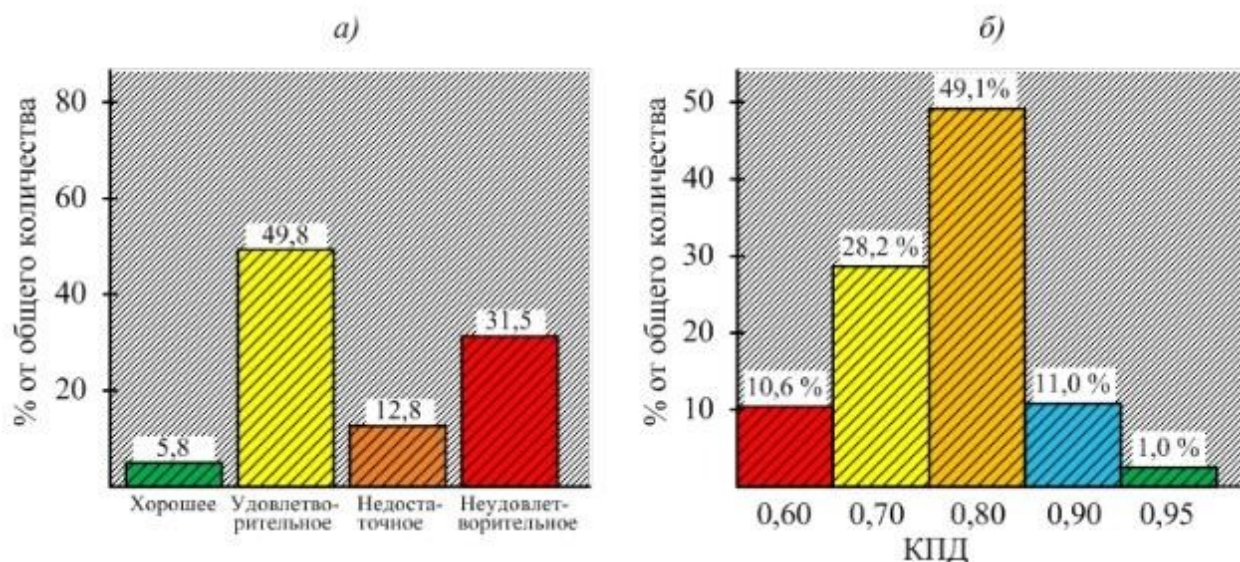
**Публикации.** Научные результаты изложены в 19 публикациях, из которых 5 статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в «Scopus», 3 патента на изобретения РФ и 2 программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 176 страниц машинописного текста, включая 62 рисунка, 32 таблицы, списка литературы из 132 наименований, в том числе 14 иностранных источников.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ

### 1.1 Виды полимерных композиционных материалов для ремонта бетонных сооружений мелиоративных систем и облицовок каналов

Из-за значительного срока эксплуатации оросительных каналов мелиоративных систем, составляющего 40–60 лет, около 45 % их имеют неудовлетворительное и недостаточное техническое состояние, которое характеризуется коэффициентом полезного действия сооружения (рисунок 1.1, а), из-за чего дальнейшая эксплуатация является малоэффективной и, соответственно, требуется проведение ремонта или реконструкции объекта [41].



а – техническое состояние оросительных каналов;

б – график распределения КУД магистральных и распределительных каналов

Рисунок 1.1 – Техническое состояние и КУД каналов мелиоративных систем Юга России

Комплексным показателем технического состояния каналов оросительных систем служит коэффициент полезного действия (КУД). Большинство каналов имеет низкий КУД от 0,60 до 0,80 – 88 %, а КУД каналов от 0,90 и более – всего 12 % (рисунок 1.1, б) [41, 55]. Вместе с тем, согласно действующих норм (СП 81.13330.2016) [101] КУД должно составлять не менее 0,90–0,93, что регламентировано Государственной программой РФ [24].

Исходя из представленных данных, можно сделать вывод о низком техническом состоянии оросительных каналов, объясняя тем, что наиболее протяженные участки мелиоративных каналов – 80 % выполнены в земляном русле и только 20 % из них выполнены в бетонной облицовке, что способствует значительным потерям транспортируемой воды и недополива сельскохозяйственных культур [18, 20].

Как известно, для бетонных облицовок каналов [98] при длительной эксплуатации наблюдается образование повреждений в виде трещин и разрушение швов, коррозии арматуры, которая приводит к изменению прочностных свойств всей конструкции. Наряду с этим, не менее важным фактором, оказывающим влияние на свойства бетона, является действие низких климатических температур, а именно циклическое попеременное замораживание-оттаивание, при котором происходит накопление внутренних дефектов, которые приводят к снижению прочности и увеличению деформативности [1]. Длина и ширина трещин в бетонном покрытии (возникших в основном, в ходе строительства) после 100 циклов замораживания-оттаивания возрастают в 2–5 и 10–30 раз соответственно [12]. На рисунке 1.2 приведена классификация причин, вызывающих повреждения бетонных (железобетонных) конструкций мелиоративных сооружений [38].

Применение цементно-песчаных растворов для ремонта повреждений бетонных облицовок каналов и их швов [43] недостаточно эффективно из-за низкого значения водонепроницаемости используемых материалов; деформативные показатели растворов различаются по сравнению с характеристиками бетона в конструкции, эти растворы отличаются длительными сроками твердения. К числу недостатков следует отнести более сложный процесс ремонтно-восстановительных работ при отрицательных температурах, повышенное трещинообразование и другие [79].

Для защитных бетонных покрытий конструкций мелиоративных каналов применяют полимерные композитные системы, геосинтетические материалы, герметики, рулонные и другие материалы (рисунок 1.3) [57], которые могут применяться для ремонта [14] бетонных поверхностей оросительных каналов.

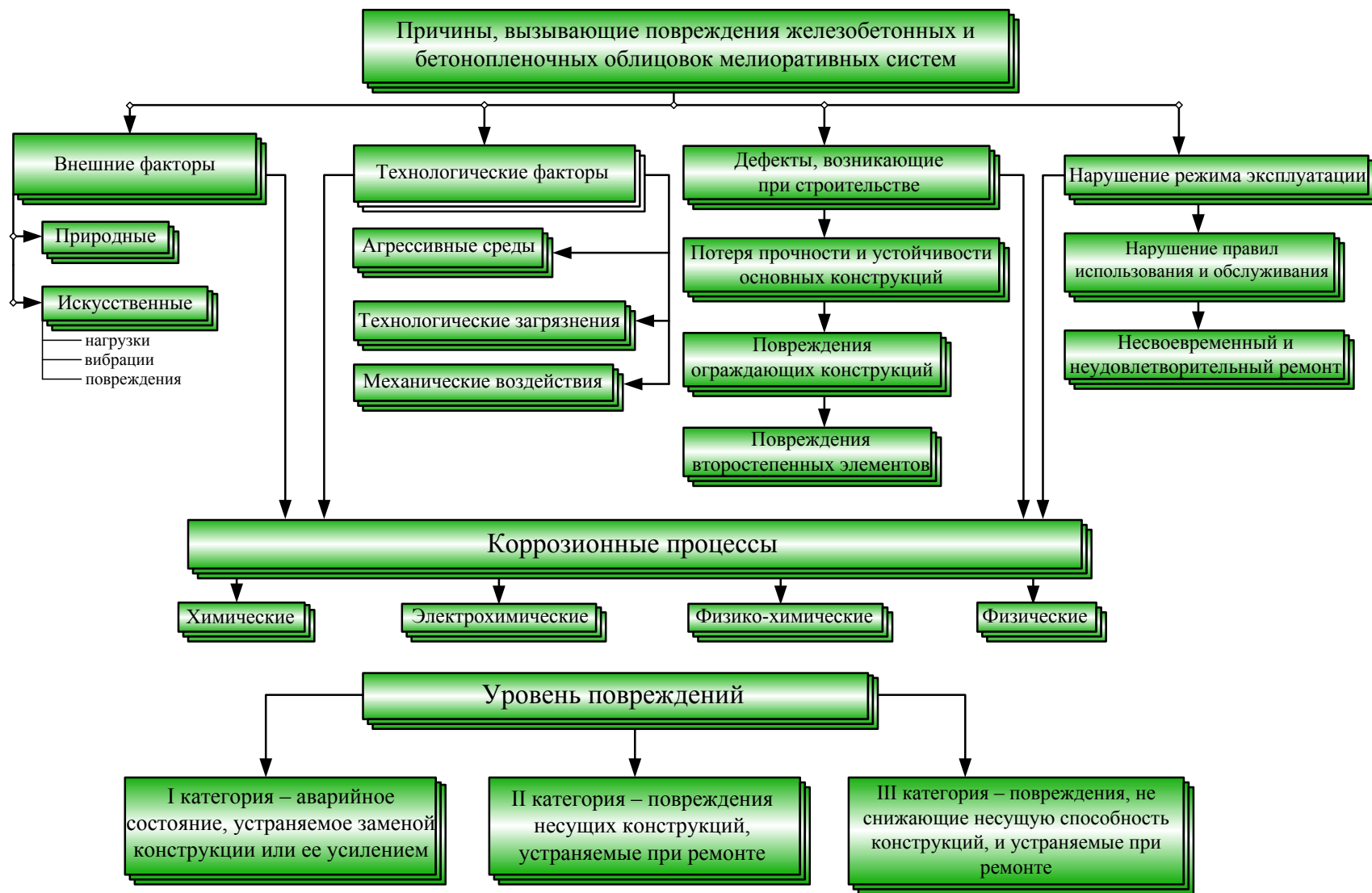


Рисунок 1.2 – Причины, вызывающие повреждение бетонных и железобетонных конструкций облицовок мелиоративных систем



Для создания надежной противофильтрационной защиты и ремонта облицовок каналов мелиоративных систем более широкое применение находят рулонные геосинтетические и геокомпозитные материалы [37, 46], которые, не всегда применимы при проведении работ, связанных с ремонтом малых повреждений бетонных облицовок и мероприятий, направленных на продление срока их службы [19]. В связи с этим актуальным становится вопрос применения жидких, обмазочных, напыляемых и наплавливаемых полимерных композиций, которые по своим техническим показателям не уступают геосинтетическим и могут применяться в различных условиях эксплуатируемого сооружения [27, 28, 30, 31].

Такие материалы находят все большее применение при гидроизоляции бетонных поверхностей и сооружений [69, 96]. В связи с отсутствием единой классификации по применению композитных материалов, автором предлагается классифицировать их на следующие группы: жидкие, упругие, рулонные и пластично-вязкие (рисунок 1.3). Каждый из видов композитных материалов может применяться при проведении работ, связанных с ремонтом и реконструкцией длительно эксплуатируемых сооружений (в т. ч. бетонных облицовок каналов) [111].



Рисунок 1.3 – Классификация полимерных композитных материалов, применительно к мелиоративным объектам

Для ремонта небольших повреждений в виде трещин (в т. ч. волосяных) могут использоваться жидкие и пластично-вязкие (напыляемые, обмазочные) полимерные

композиции, которые наносятся вручную или при помощи специального оборудования на подготовленную бетонную поверхность, а для заделки деформационных швов облицовок [98] и заполнения подплитного пространства рекомендуются к применению инъекционные композиции, подаваемые (нагнетаемые) под давлением через заранее подготовленную систему трубок в пустоты. Рулонные полимерные материалы с армирующей и без армирующей основы в виде битумно-полимерных мембран и композитов (геомембрана и геотекстиль; геомембрана и геосетка, а также другие виды комбинированных материалов) применяют для ремонта мелиоративных каналов [80, 107, 108, 113, 125]. Для продления срока службы бетонных облицовок также рекомендуется применение пропиточных полимеров, которые в значительной мере придают прочность бетону и повышенную водонепроницаемость [31].

Для уплотнения шпоночных соединений бетонных облицовок и обеспечения водонепроницаемости швов на оросительных каналах применяются герметизирующие элементы в виде полимерных жгутов на основе бентонита, которые при взаимодействии с водой увеличиваются в пространстве, тем самым заполняя и герметизируя деформационные швы и повреждения [15].

Композитные материалы состоят из полимерных связующих, наполнителей и сбалансированной смеси химически активных компонентов, которые в совокупности образуют эффективные строительные и ремонтные материалы. Описать все существующие на данный момент защитные и ремонтные материалы не представляется возможным: только в Европе, по данным представленным в [46], их насчитывается более 2500 видов, и с каждым годом это число только увеличивается.

Технические характеристики полимерных геомембран отечественного производства марки «Техполимер» приведены в таблице 1.1 [53].

Таблица 1.1 – Технические характеристики полимерной геомембраны марки «Техполимер»

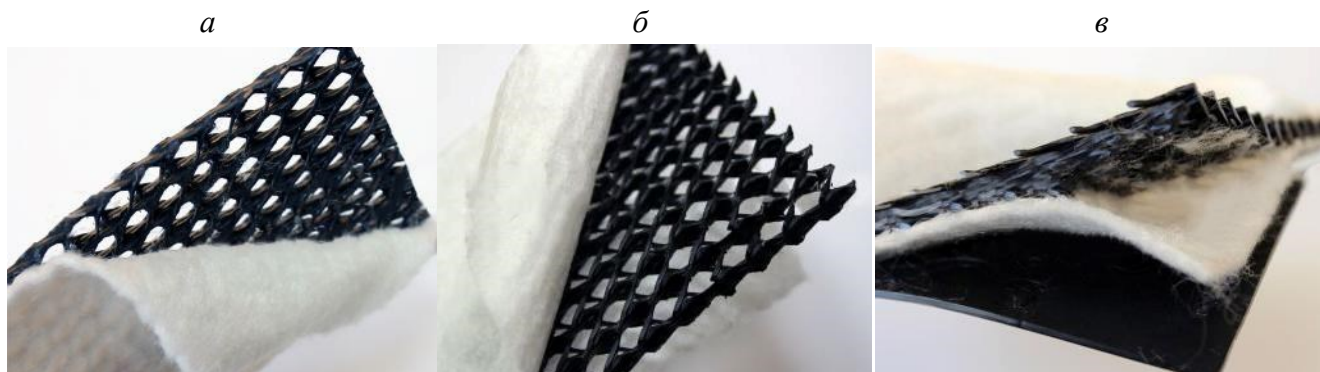
Показатель	HDPE				LLDPE				Метод испытания
	1,0	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	3,0	
Номинальная толщина, мм	1,0	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	3,0	ASTM D5199
Прочность при разрыве, не менее, кН/м	27	40	54	85	25	37	50	77	ASTM D6693 ГОСТ 11262

## Продолжение таблицы 1.1

Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	700				1000				ASTM D6693 ГОСТ 11262
	Соппротивление разрыву, Н	150	220	275	410	120	175	235	335
Прочность на прокол (сопротивление динамическому продавливанию), Н	410	560	725	1150	280	410	530	800	ASTM D4833
Водопроницаемость	0				0				ГОСТ 2678-94
Паропроницаемость	0				0				ГОСТ 21472-81
Устойчивость к низкой температуре, °С	-70				-70				ГОСТ 2678-94 ASTM D746
Коэффициент трения к суглинку	0,35				0,35				ASTM D5321 ISO 12957-1:2005
Прочность при растяжении, МПа, (до 30 МПа), не менее	27								–
Угол трения между геомембраной и песком, град	15								–
Прочность на продавливание, не менее, Н	560				–				–
Стойкость к циклическим нагрузкам, не менее, %	80								–
Стойкость к многократному замораживанию и оттаиванию, (морозостойкости), не менее, %	80								–
Размер рулона, м: – ширина – длина	5 50								ТУ 2246-001-56910145-20014

Геокомпозитные материалы – это комбинированные многокомпонентные составные материалы, выполненные из двух и более геосинтетических [103] материалов (например, геомембраны и геотекстиля; геомембраны, георешетки и геотекстиля) с различными заранее заданными свойствами [53]. Составляющие геокомпозитов могут быть как ткаными, так и неткаными. Данные материалы обладают повышенными гидроизоляционными свойствами и используются при строительстве, для защиты от фильтрации и эрозии, создании дренажей, защиты от подтопления, армирования грунта и ускорения отвода грунтовых вод. Геокомпозитные материалы, как правило, применяются на объектах, строящихся в слож-

ных инженерных условиях. Примеры геокомпозитных материалов приведены на рисунке 1.4.



*a* – геотекстиль и георешетка (гт и гр); *б* – два слоя геотекстиля и георешетка (2гт и гр);  
*в* – георешетка, геотекстиль и геомембрана (гр, гт и гм)

Рисунок 1.4 – Примеры композитных материалов для ремонта и восстановления элементов мелиоративных систем

Технические характеристики геокомпозитных материалов отечественного производства представлены в таблице 1.2 [53].

Таблица 1.2 – Технические характеристики геокомпозитных материалов

Геокомпозитный мат				
Показатель	Тип материала			Метод испытания
	гт и гр	2гт и гр	гр, гт и гм	
1	2	3	4	5
Толщина при нагрузке, мм, не менее				ГОСТ Р 50276
– 2 кПа	9	10	11	
– 20 кПа	8	9	10	
– 200 кПа	7	8	9	
Разрывная нагрузка, кН/м, не менее	15	20	25	ГОСТ Р 50276
Относительное удлинение при разрыве, %, не более	120	120	120	ГОСТ Р 50276
Сопrotивление сжатию, кПа	1250	1600	2000	ASTM 1621
Водопрopusкная способность, л/м <sup>2</sup> ·с				ISO 12958
– 20 кПа	1,30	1,50	1,50	
– 200 кПа	0,95	1,20	1,20	
Геосетка				
Сырьевой материал	ПЭНД			
Длительное сжатие (1000 ч, 200 кПа), %	3	3	3	ISO 1897-01
	Фильтрующий геотекстиль	Геомембрана		–
Сырьевой материал	Полипропилен (ПП)		ПЭНД	–
Размер пор, мм	0,08	0,08	–	ISO 12956
Водопроницаемость (верт.), л/м <sup>2</sup> ·с	100	100	0	ГОСТ 29104.16
Размер рулона				СТО 56910145-005-2011
ширина, м	–	4 (2,5)	–	
длина, м	–	50	–	

Кроме традиционных рулонных материалов может применяться и наплавляемая гидроизоляция для защиты бетонных поверхностей от разрушительного воздействия поверхностных грунтовых вод и предотвращения проникновения капиллярной влаги. Данный материал применяется на горизонтальных и вертикальных поверхностях мелиоративных сооружений, обладает высокими прочностными характеристиками, повышенной адгезией и устойчивостью к воздействию ультрафиолета. Материал состоит из битума или битумно-полимерного связующего, который отличается эластичностью и долговечностью.

Технические характеристики представленной наплавляемой мембраны приведены в таблице 1.3 [28].

Таблица 1.3 – Технические характеристики наплавляемой гидроизоляции

Наименование (тип материала)	Сырье	ЭПП	ХПП	ЭКП	ТКП
Толщина, мм	–	4,0	3,0	4,2	4,2
Масса 1 м <sup>2</sup> , кг	–	4,95	3,88	5,25	5,32
Разрывная сила в продольном / поперечном направлении, Н	полиэфир	600/400	–	600/400	–
	стеклоткань	–	–	–	800/900
	стеклохолст	–	300/–	–	–
Теплостойкость, °С	–	100			
Длина/ширина, м	–	10x1			
Масса вяжущего с наплавляемой стороны, кг/кв.м., не менее	–	2	2,0	2	2
Водопоглощение в течение 24 ч, %	–	1			
Водонепроницаемость при давлении не менее 0,2 МПа	–	абсолютная		–	–
Примечание: Э – полиэстер; Х – стеклохолст; Т – стеклоткань; П – полимерная пленка; К – крупнозернистый наполнитель					

Пример использования рулонной наплавляемой полимерной гидроизоляции приведен на рисунке 1.5. Данным материал состоит из защитного слоя, двух слоев битумно-полимерного вяжущего, основы и нижнего слоя из полиэтиленовой пленки, которая используется в качестве защитного покрытия при транспортировке и удаляется перед наплавлением нижнего битумно-полимерного слоя, который разогревается специальной горелкой и уплотняется при достижении рабочей температуры металлическими валиками, для более лучшей адгезии к ремонтируемой конструкции [32].

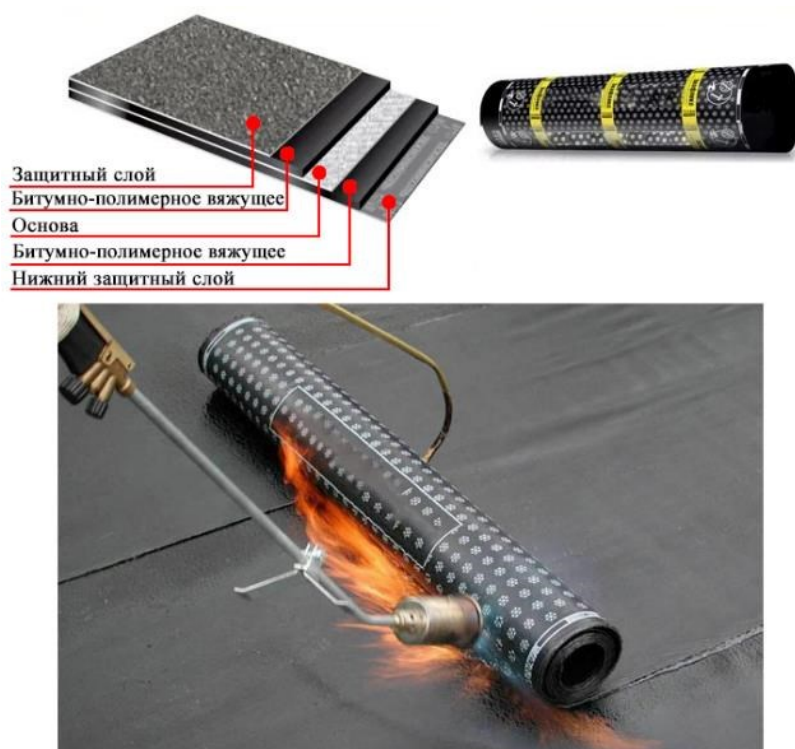


Рисунок 1.5 – Наплавляемая гидроизоляция бетонных покрытий

Обмазочная гидроизоляция представляет собой многослойное покрытие, толщина которого варьируется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Такой материал после нанесения образует высокоплотное монолитное бесшовное покрытие, которое обеспечивает полную водонепроницаемость, заделку малых повреждений и продление срока службы бетонных облицовок, пример данного материала представлен на рисунке 1.6 [27].



Рисунок 1.6 – Обмазочная гидроизоляция, наносимая вручную на участке канала

Основные технические характеристики применяемой обмазочной гидроизоляции на участке мелиоративного канала представлены в таблице 1.4 [31].

Таблица 1.4 – Технические характеристики обмазочной гидроизоляции

Технические характеристики	Показатель
Условная прочность при разрыве, МПа	2,9
Относительное удлинение при разрыве, %	1500
Прочность сцепления, МПа	
– с бетоном	0,4
– с металлом	1,0
Гибкость без образования трещин при t, °С	– 42
Теплостойкость, °С	110
Водонепроницаемость при давлении 0,01 МПа через 24 часа	Отсутствие мокрого пятна
Эксплуатация обработанной поверхности в условиях агрессивных сред, рН	2 – 12
Температура применения нанесения окружающей среды, °С	–10 до +50

Жидкая резина – однокомпонентная (пастообразная) и двухкомпонентная мастика холодного нанесения и мгновенного отверждения, на основе полимерно-битумной водной эмульсии [46]. После нанесения материала он образует на поверхности единую бесшовную полимеризованную мембрану с исключительно высокой адгезией. Данная мембрана характеризуется водонепроницаемостью, устойчивостью к ультрафиолетовому излучению и агрессивным химическим воздействиям. Материал отличается малым весом, который в четыре раза легче рулонных материалов, срок службы по данным компаний производителей в пять раз больше. Мембрана наносится на все материалы, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении из-за механического способа ее нанесения. Для ее нанесения необходима минимальная подготовка обрабатываемых поверхностей. При этом, поверхность должна быть чистой, не влажной и не иметь инородных включений, которые приводят к снижению адгезии. Данный материал характеризуется повышенной эластичностью и может восстанавливать первоначальную форму до 95 % после растяжения более чем на 1000 %, сохраняет свои свойства в диапазоне от минус 55 до плюс 95 °С, выдерживает высокую температуру, агрессивные среды, воздействие ультрафиолетовых лучей, способствующих старению материала в течение более чем 30 лет [46].

Технические характеристики однокомпонентной и двухкомпонентной жидкой резины отечественного производства представлены в таблице 1.5 [31].

Таблица 1.5 – Технические характеристики жидкой резины

Технические характеристики	Показатели	
	Однокомпонентная	Двухкомпонентная
Расход компонента (мастики) для создания слоя толщиной 1 мм в сухом остатке, кг/м <sup>2</sup>	1,39	1,61
Условная прочность при разрыве, МПа	2,9	0,5
Относительное удлинение при разрыве, %	1500	
Прочность сцепления с бетоном, МПа	0,4	1,0
Прочность сцепления с металлом, МПа	1,0	1,7
Водопоглощение за 24 ч, %	0,4	0,5
Гибкость без образования трещин на брусе радиусом 5 мм при температуре, °С	–42	–25
Температура хрупкости по Фраасу, °С	–60	–65
Теплостойкость, °С	110	
Водонепроницаемость при давлении 0,03 МПа	Отсутствие мокрого пятна	
Температура нанесения, °С	–10...+ 50	+ 5...+ 50
Коррозионная стойкость, рН	2...12	

## 1.2 Существующие способы и технологии ремонта бетонных сооружений мелиоративных систем жидкими полимерными композициями

В последние годы многие мелиоративные сооружения находятся в ограниченно-работоспособном состоянии вследствие их длительной эксплуатации (более 40–50 лет) [49], а некоторые из них полностью исчерпали весь свой эксплуатационный ресурс и достигли предельного состояния. Поэтому актуальным становится вопрос продления срока их службы [22]. В связи с этим необходимо проведение текущего или же капитального ремонта дефектов бетонных поверхностей мелиоративных сооружений, обусловленные эксплуатационными факторами:

- разрушение бетона в зонах переменного уровня воды вследствие воздействия пониженных температур;
- коррозия арматуры, проявляющая себя в результате существенной глубины карбонизации бетона;
- длительная эксплуатация в условиях постоянного контакта с водой;
- допущенные дефекты в бетоне при строительстве;



– воздействие значительных механических нагрузок, превышающих предел прочности бетона;

– высокая степень разрушения защитного слоя бетона вследствие коррозии арматуры и трещинообразования.

Реализация решений вышеуказанных задач может находить применение при выполнении ремонта полимерцементными составами, усиленными фиброй [32]. При использовании материалов для конструкционного ремонта бетона следует применять соответствующие технологии и проводить оценку качества выполненных ремонтных работ.

В этом случае рассмотрены основные технологические операции:

– укладка в основании бетона до получения требуемых значений прочности (на отрыв и шероховатость);

– зачистка оголенной арматуры до требуемой степени чистоты;

– нанесение ремонтного состава на разрушенную поверхность конструкции ручным или механизированным способом;

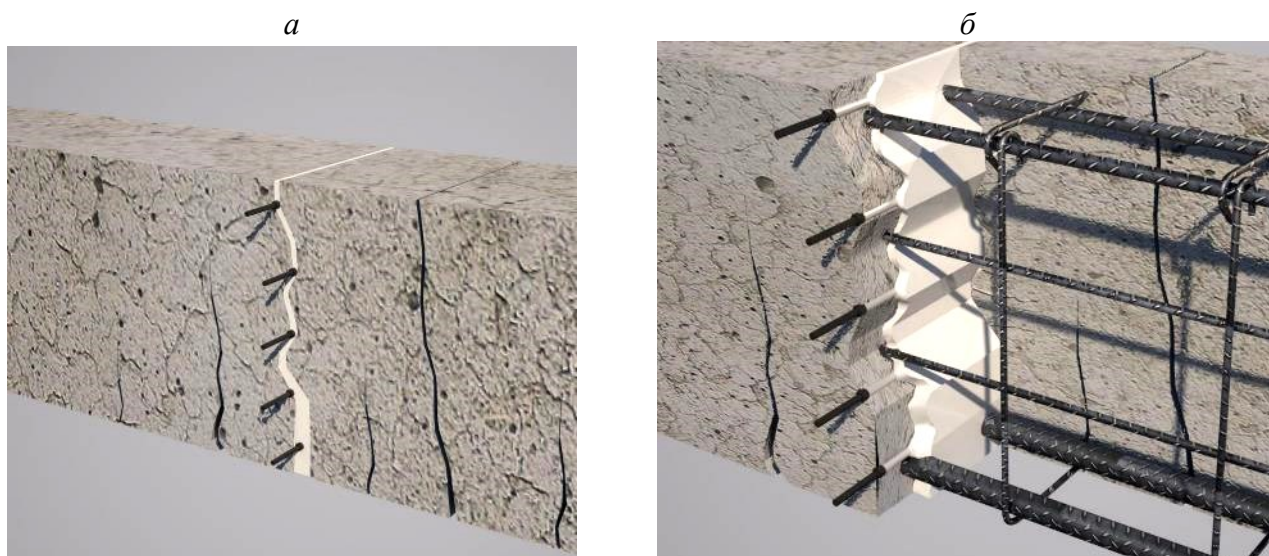
– контроль и уход за свежеложенным полимерным материалом.

Наряду с этим необходимо обратить внимание на новые технологии, позволяющие проводить реконструкцию или ремонт сооружений не останавливая (или частично выводя) их из эксплуатации.

Одним из высокоэффективных методов ремонта и восстановления бетонных поверхностей мелиоративных объектов (оросительных каналов) является технология инъектирования [30]. Данная технология позволяет восстановить бетонные поверхности: устранение утечек через трещины вследствие фильтрации, гидроизоляцию «холодных» швов, устройство противофильтрационных завес и другое. Преимуществом технологий инъектирования является возможность изменения физико-механических характеристик бетонной поверхности, в том числе показателей внутренней структуры бетонной конструкции.

На рисунке 1.7 приведена технология реконструкции, восстановления и ремонта бетонных конструкций с помощью нагнетания полимерных инъекционных

материалов в трещины, швы и пустоты под давлением, через предварительно установленные инъекторы [41, 70].



*а* – общий вид нагнетаемого ремонтного материала через установленные инъекторы;

*б* – заполнение повреждения ремонтным составом через инъекторы в разрезе

Рисунок 1.7 – Нагнетание полимерных инъекционных материалов в трещину железобетонной конструкции облицовки канала

Применение способа инъектирования в трещину или повреждение полимерных материалов не только восстанавливают целостность конструкции, но и «соединяют» ее части. Проникая в тело бетона, жидкие полимеры способствуют повышению надежности бетонной конструкции, прочно скрепляя и герметизируя даже самые малые трещины и дефекты [31, 70].

Представленная технология уже широко применяется за рубежом в странах Европы, как новый эффективный метод восстановления эксплуатационных характеристик бетонных конструкций, обеспечения водонепроницаемости и ремонта различных видов повреждений. Для выбора материала и технологии инъектирования необходимо учитывать технические и эксплуатационные характеристики для конкретного объекта. Выбранные материалы для инъектирования и технологии их нанесения, позволяют значительно увеличить долговечность и надежность конструкции, а также снизить затраты при выполнении текущего и капитального ремонта [124–128].

Наряду с технологией инъектирования распространенным способом ремонта бетонных конструкций является нанесение бесшовной жидкой резины, которая

отличается от рулонных материалов высокой эластичностью, гибкостью, повышенной прочностью, и значительным относительным удлинением, что предотвращает ее отслаивание от поверхности вследствие неблагоприятных воздействий, циклических изменений температуры, резких ударов и вибрации [46]. Этот материал считается бесшовной полимерной мембраной, которая после нанесения плотно прилегает по всей площади к поверхности бетона и обеспечивают полную водонепроницаемость благодаря высокой адгезии.

Жидкая резина выпускается трех видов [30]:

- наливная (обмазочная), которая изготавливается на месте укладки;
- окрасочная, которая наносится в виде пленкообразующей и пастообразной смеси;
- напыляемая, наносимая на поверхность при помощи специального механического оборудования.

Технические характеристики жидкой резины различаются в зависимости от марки [46]. В таблице 1.6 приведены основные технические характеристики данного полимерного материала, как зарубежных, так и отечественных производителей (по данным [30]).

Таблица 1.6 – Сравнительные характеристики жидкой резины

	«Технопрок» (Россия)	«Vodipren» (Италия)	«Профикс КР» (Россия)	«Liquid Rubber» (Канада)	«Flexigum» (Израиль)
Прочность сцепления с бетоном, МПа	0,99	0,90	0,90	0,75	0,83
Прочность сцепления с металлом, МПа	0,60	0,70	0,70	0,70	0,40
Относительное удлинение при разрыве, %	1097	1300	1000	850	1000
Условная прочность при разрыве, МПа	0,45	0,48	0,35	0,87	0,91
Водонепроницаемость при давлении 0,01 МПа за 24 ч	Отсутствие мокрого пятна	То же	То же	То же	То же
Устойчивость к ультрафиолету	Необходима защита	45 лет без повреждений	Устойчив	То же	То же

Данные полимерные композитные материалы наносятся (напыляются) на бетонную поверхность мелиоративных систем тонким слоем, с использованием специального механизированного оборудования (рисунок 1.8).



*а* – напыление жидкой резины на оросительном канале;  
*б* – отечественное оборудование для нанесения жидкой резины

Рисунок 1.8 – Механизированное нанесение на бетонную поверхность мелиоративного канала жидкой резины

Как и другие материалы, жидкая резина имеет определенные преимущества и недостатки, которые приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Преимущества и недостатки использования жидкой резины

Преимущества	Недостатки
1 Наносится на поверхность бетонной облицовки, а также на другие материалы любой формы	Для напыления жидкой резины требуется специальное оборудование
2 Так как жидкая резина наносится по бесшовной технологии, то работы по гидроизоляции выполняются в кратчайшие сроки, при высоком качестве	Имеет высокую стоимость по сравнению с другими материалами
3 Жидкая резина имеет высокое относительное удлинение, что позволяет применение данного материала на просадочных грунтах	Наносится на подготовленную сухую обеспыленную поверхность
4 Устойчивость к атмосферным воздействиям (к ультрафиолетовому излучению, щелочным и кислотным средам, резким перепадам температур)	При нанесении жидкой резины температура воздуха должна быть не ниже + 5°C
5 Обладает хорошей адгезией с материалами основания (бетон, полимерные и другие материалы)	При наличии ранее покрытой рулонной гидроизоляции необходим частичный или полный демонтаж
6 Жидкая резина экологически безопасна, не содержит растворителей и не издает резких запахов	При нанесении материала работы проводятся после опорожнения канала
7 Имеет повышенные гидроизоляционные свойства	
8 Срок эксплуатации (или долговечность) составляет не менее 25 лет.	

Применение композитных материалов в виде жидкой резины обеспечивает водонепроницаемость бетонных облицовок на оросительных каналах, а также снижает шероховатость их поверхности, что позволит увеличить пропускную способность всей системы. Такие материалы могут применяться в качестве закре-



пителей грунтовых поверхностей оросительных каналов, водоемов и водохранилищ мелиоративного назначения [55].

Для ремонта бетонных конструкций мелиоративных систем находит применение материал в виде гибкой полимерцементной мембраны, которая служит для ремонта частично разрушенных бетонных конструкций и защищает арматуру от воздействия воды, и может использоваться при реконструкции бетонных поверхностей облицовок на мелиоративных объектах (рисунок 1.9) [28].



1 – бетонная поверхность до ремонта;

2 – бетонная поверхность после проведения ремонтных работ

Рисунок 1.9 – Защитное покрытие гибкой полимерцементной мембраной

Данный материал служит эластичным гидроизоляционным ремонтным материалом и используется для повышения водонепроницаемости бетонных элементов, швов и примыканий бетонных и железобетонных конструкций, которые должны выдерживать значительные деформации основания. Гибкая цементная мембрана может быть армирована сеткой, которую применяют в зоне швов и в местах сопряжения вертикальных и горизонтальных поверхностей. Этот материал

используется для гидроизоляции конструкций, эксплуатируемых при температурах от минус 40 °С до плюс 70 °С. Основные технические характеристики гибкой полимерцементной мембраны приведены в таблице 1.8 [28, 30].

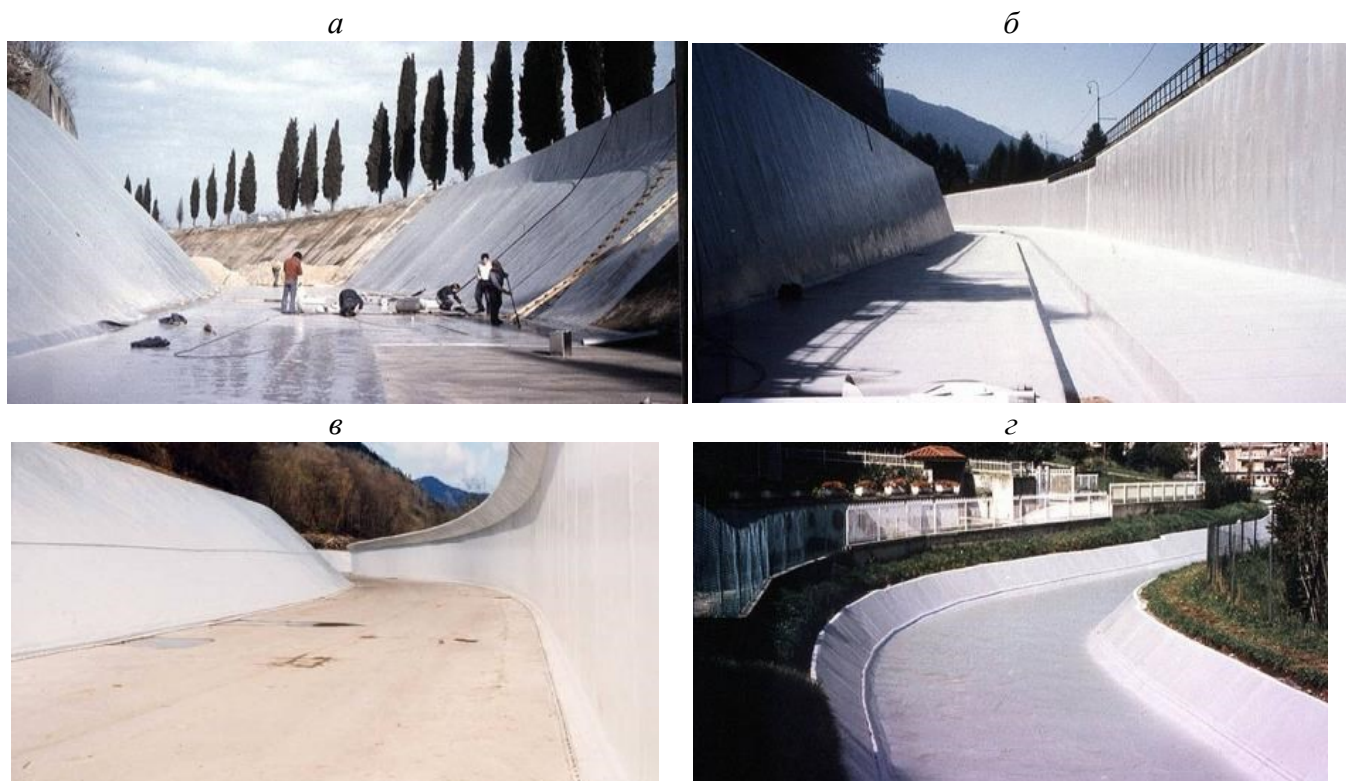
Таблица 1.8 – Технические характеристики гибкой полимерцементной мембраны

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
Объемная плотность материала	кг/л	1,55±0,05
Расход на 1 м <sup>2</sup> поверхности при толщине мембраны 2–3 мм	кг/м <sup>2</sup>	3,2–4,8
Давление, при котором материал сохраняет водонепроницаемость, не менее: – положительное – отрицательное	МПа МПа	0,3 0,07
Адгезия, не менее, при температуре: – 0 °С – 20 °С	МПа МПа	0,58 2,5
Сопротивление растяжению, не менее	МПа	0,3
Относительное удлинение	%	100

### 1.3 Зарубежный и отечественный опыт применения рулонных и жидких полимерных композиций для ремонта облицовок мелиоративных каналов

Для противофильтрационной защиты мелиоративных каналов [120, 121] нашли широкое применение рулонные геомембраны, а в последнее время стали использоваться для этой цели и жидкие композиции [53], которые отличаются от традиционных покрытий высокой надежностью и значительно большей долговечностью.

Наиболее широкий опыт применения геомембран при реконструкции мелиоративных каналов имеется у Швейцарской фирмы «Carpі» [85], которая запатентовала конструкцию открытой дренированной натяжной геомембраны и успешно применяет ее на практике. На рисунке 1.10 приведены мелиоративные каналы, на которых производился ремонт бетонных элементов дренированной мембраной, для снижения потерь воды и увеличения пропускной способности сооружений [85].



а – Alla Bussolengo, Германия; б – Gaggio, Италия;  
в – Laufnitzdorf, Австрия; г – Zogno, Италия;

Рисунок 1.10 – Реконструируемые облицовки мелиоративных каналов «Cagri»

Наряду с использованием рулонных материалов [122, 129], применение нашли напыляемые под воздействием высокого давления полимерные композиции «AquaLastic» и наносимые вручную их обмазочные аналоги, которые используются для ремонта повреждений и продления срока службы мелиоративных объектов. Примеры использования данных материалов для ремонта на действующих мелиоративных объектах представлены на рисунке 1.11 [119, 132].



а – протяженный участок до ремонта; б – отремонтированный участок облицовки канала

Рисунок 1.11 – Ремонтимруемый участок канала «The Voise canal» в штате Айдахо (США)



Вторым видом «AquaLastic» является напыляемое бесшовное монолитное покрытие, которое наносится при помощи специального оборудования, под высоким давлением на подготовленную поверхность [130]. Данный материал применяется как на локальных повреждениях в виде разрушенных швов, сколов и трещин, также и по всей поверхности сооружения, рисунок 1.12.



Рисунок 1.12 – Реконструируемый ирригационный канал в районе города «Kennewick», штата Вашингтон, США

Наряду с этим открытые мембраны, применяемые на каналах, легко ремонтируются, а их стоимость и время укладки уменьшается. Они выдерживают значительные колебания температуры и большое количество циклов замораживания-оттаивания, снижающих прочность бетона и вызывающих трещины в облицовке. Проведенные натурные и лабораторные исследования таких покрытий показали, что срок службы открытых геомембран составляет более 50 лет [123].

Значительный опыт устройства противofильтрационной и инженерной защиты накоплен отечественной фирмой «Техполимер», которая применяет рулонные геомембраны различного типа на мелиоративных объектах [131].

Одним из таких объектов, на котором производилось устройство инженерной защиты из геомембраны для предотвращения потерь воды на фильтрацию, а также разрушения сечения канала от размывов и заболачивания приканальных территорий является оросительный комплекс на 1650 га орошаемых земель в Самарской области [78, 94, 114]. Общая протяженность реконструкции мелиоративного канала составляет 27 км с заложением откосов 1:1,5. Реконструкция проводи-



лась в два этапа. На первом этапе проводилась очистка ложа от донных отложений и формирование сечения канала, после чего укладывался защитный слой из нетканого геотекстиля плотностью 200 г/м<sup>2</sup>. Общая площадь защитного покрытия из геотекстиля составила 175500 м<sup>2</sup> на участке канала в 27 км, рисунок 1.13.



а – подготовительные работы; б – уложенный противofильтрационный элемент

Рисунок 1.13 – Устройство противofильтрационного экрана из нетканого геотекстиля и геомембраны

На втором этапе выполнялась укладка гидроизоляционного слоя из геомембраны поверх защитного слоя, площадь которого составила 201150 м<sup>2</sup>. Реконструкция оросительного канала [81] позволила повысить урожайность сельскохозяйственных угодий за счет уменьшения мутности и потерь воды [112], заболачивания приканальных территорий и наиболее эффективному использованию орошаемых земель, рисунок 1.14 [76].



Рисунок 1.14 – Облицованный мелиоративный канал на оросительной системе в Самарской области

#### **1.4 Обзор исследований надежности, водопроницаемости и эффективности защитных покрытий из композиционных материалов для мелиоративных каналов**

Для борьбы с фильтрационными потерями на мелиоративных сооружениях и оросительных каналах с 1960 г. использовались полимерные пленки, которые изготавливались из полиэтилена низкой плотности (ПНП) и поливинилхлорида (ПВХ). Одним из первых ВНИИГиМ [72] выполнил исследования по использованию пленок для противофильтрационных экранов на каналах [39].

Противофильтрационные экраны из полиэтиленовой пленки применяли открытыми, без защитного грунтового основания, а затем стали выполнять непосредственно с ним, бетонными плитами или монолитным бетоном. В результате такая полиэтиленовая пленка толщиной 0,1–0,2 мм легко повреждалась строительными механизмами и водной растительностью (камышом, тростником). Вследствие этого возникла необходимость изучения оценки водопроницаемости таких экранов.

Изучением потерь на фильтрацию через различные повреждения пленочных экранов проводились В. Д. Глебовым [35, 36], Недригой [75], В. П. Лысенко [69], А. В. Ищенко [63], Ю. М. Косиченко [12, 62, 64], А. А. Мироновым [72] которые провели ряд натурных и теоретических исследований.

Так, в работе Ю. М. Косиченко [12] получены теоретические зависимости для определения фильтрационных утечек воды через грунтопленочные и бетонпленочные облицовки мелиоративных каналов, которые могут применяться на практике для оценки фильтрационных потерь.

А. А. Мироновым [72] и Р. А. Алаведрянном проведены лабораторные исследования водопроницаемости потерь через малые отверстия в экране. Однако они выполнены для ограниченного числа схем и повреждений в пленке, которые встречаются в натуре.

В. Н. Жиленковым проведены фильтрационные исследования пленочных экранов которые подтвердили высокую эффективность их комбинирования из слоя глинистого грунта в подстилающем основании и полиэтиленовой пленки.

На основании проведенных исследований по использованию пленок на оросительных каналах можно сделать вывод, что их применение для противофльтрационных экранов способно повысить эффективность облицовки до 10 раз и более, снизить сроки строительства, но из-за незначительной толщины они подвержены механическим воздействиям вследствие чего, повреждаются в процессе устройства защитного покрытия.

Спустя некоторое время за рубежом широкое применение получили новые полимерные материалы толщиной от 1,0 до 3,0 мм, которые стали называться геомембранами. В отличие от пленочных экранов они оказались более эффективными в 100–1000 раз, а срок службы их составляет от 50–75 лет.

Однако, ранее полученные зависимости для расчета водопроницаемости пленочных экранов относятся в основном для больших размеров дефектов в виде щелей и прорывов пленки, площадью до 1,0 м<sup>2</sup> и более. Для экранов из геомембран размеры повреждений в виде малых повреждений, проколов и составляют диаметром всего 1–3 мм.

А. Г. Алимовым [7–10] на основе новых технических решений предложены различные варианты ремонта облицовок мелиоративных сооружений, варианты соединения пленочных экранов, а также различные составы и способы герметизации деформационных швов облицовок.

Кроме того, во ВНИИГ им Б. Е. Веденеева, и в частности В. М. Давиденко [38], проведен анализ причин возникновения дефектов разрушения различных сооружений, выполнен обзор и обобщен перечень полимерных композиционных материалов, применяемых для ремонта и гидроизоляции каналов. Предложена универсальная концепция последовательных технологических операций по ремонту бетонных и железобетонных сооружений.

Таким образом, выполненные ранее исследования и разработки по применению полимерных противофльтрационных экранов в мелиоративном строительстве (в период с 1960 по 2010 гг.) устарели, в связи с производством и использованием новых видов материалов, которые нуждаются в изучении их применения на мелиоративных объектах.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Проведенный обзор передового зарубежного и отечественного опыта применения полимерных композитных материалов для ремонта бетонных элементов показал, что материалы на основе полимеров могут успешно применяться в мелиоративном строительстве при проведении текущего или капитального ремонта бетонных поверхностей мелиоративных сооружений (в том числе, оросительных каналов).

2. Рассмотрены и проанализированы существующие полимерные композиции применительно к противofильтрационным устройствам каналов и водоемов мелиоративного назначения. Представлен обзор существующих способов и технологий ремонта и продления срока службы бетонных облицовок мелиоративных каналов полимерными композициями. Выявлены основные недостатки, заключающиеся в применении устаревших материалов и технологий восстановления бетонных покрытий с использованием дорогостоящих герметиков, смол.

3. Выполнен анализ известных исследований в области водопроницаемости и долговечности защитных покрытий оросительных каналов, который свидетельствует о недостаточной изученности вопросов фильтрации в трещинах бетонных покрытий. В связи с этим необходима разработка новых конструктивно-технологических решений из полимерных композитных материалов для ремонта бетонных и железобетонных облицовок мелиоративных каналов, и исследование их эффективности в натурных и лабораторных условиях.

4 Критический обзор исследований в области применения защитных и противofильтрационных устройств на сооружениях мелиоративного назначения, а также анализ их надежности, водопроницаемости и долговечности показал, что вопросы ремонта бетонных облицовок мелиоративных каналов жидкими композиционными материалами практически не изучены, а используемые в настоящее время рулонные геосинтетические покрытия не всегда применимы при восстановлении длительно эксплуатируемых бетонных облицовок.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОБЛИЦОВОК С ТРЕЩИНАМИ

### 2.1 Решение задачи водопроницаемости трещин бетонной облицовки при истечении в атмосферу

Находящиеся при длительной эксплуатации (при сроке более 30 лет) облицовки каналов и лотки получают существенные дефекты и повреждения вследствие атмосферных факторов. При этом облицовки каналов [97] испытывают многократное замораживание-оттаивание и значительные деформации грунта в основании. Указанные факторы приводят к образованию трещин в бетоне облицовок. Обследованиями установлено, что размеры малых трещин после 100 циклов попеременного воздействия температуры увеличиваются по длине в 2–5 раз, а по ширине в 10–30 [61]. Наиболее часто разрушаются деформационные швы, через 10–15 лет.

Нарушение стыков особенно характерно для лотков, где вследствие воздействия атмосферных осадков образуются волосяные трещины, которые при продолжительной эксплуатации увеличиваются в размерах [25, 100]. Осенью они заполняются дождевой водой, а с наступлением заморозков превращается в ледяной покров. С течением времени трещины в бетоне [99] постепенно расширяются и становятся сквозными, через которые проходят утечки воды и нарушается герметичность облицовки канала или лотка (рисунок 2.1).



а – оросительного канала в облицовке; б – лоткового канала со сборными секциями  
Рисунок 2.1 – Техническое состояние каналов и лотков при длительной  
эксплуатации (более 30 лет)

Трещины также образуются в бетонных конструкциях акведуков, быстротоков и перепадов, где плиты уложены на опоры балок или непосредственно на грунт основания [25, 29, 47].

Целью исследований является вывод теоретических задач при определении расчетных зависимостей для оценки водопроницаемости бетонных облицовок мелиоративных каналов с учетом в них трещин и применения гидравлических методов. Определение удельного расхода производим через сквозную бетонную трещину с применением уравнения Бернулли [17, 31].

Рассмотрим истечение в открытую атмосферу через облицовку лоткового мелиоративного канала, выполненного на опорах [54]. Расчетная схема водопроницаемости облицовки канала при истечении в атмосферу дана на рисунке 2.2.

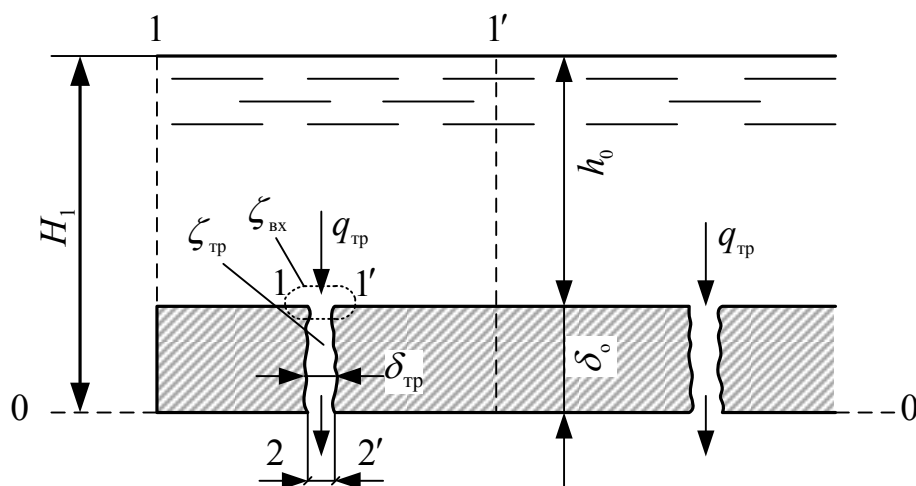


Рисунок 2.2 – Расчетная схема водопроницаемости трещин лоткового мелиоративного канала

При получении расчетных зависимостей водопроницаемости единичной трещины шириной  $\delta_{тр}$  для выделенного фрагмента 1–1'–2–2' [70, 77], приняты следующие допущения:

- поток воды в трещине примем установившимся и равномерным;
- стенки трещины считаем параллельными, а ее длина значительной;
- истечение потока воды через трещину будет происходить в атмосферу;

– режим движения в трещине принимается ламинарным (при  $Re < Re_{кр}$ ), где  $Re$  – число Рейнольдса при движении потока в трещине;  $Re_{кр}$  – критическое число Рейнольдса.

Используя уравнение Бернулли [66], запишем его применительно к расчетной схеме и сечениях 1–1' и 2–2' и плоскости 0–0 (рисунок 2.2):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w, \quad (2.1)$$

где  $Z_1, Z_2$  – геометрическая высота положения сечений;

$P_1, P_2$  – пьезометрическое давление в сечениях 1–1' и 2–2';

$\frac{\alpha v_1^2}{2g}, \frac{\alpha v_2^2}{2g}$  – скоростной напор;

$h_w$  – потери напора на трение, м.

Учитывая в уравнении (2.1) согласно рисунка 2.2:  $Z_1 = \delta_0, \frac{P_1}{\rho g} = h_0, Z_2 = 0,$

$\frac{P_2}{\rho g} = 0, v_1 = v_2$ , получаем:

$$\delta_0 + h_0 = h_w, \quad (2.2)$$

где  $\delta_0$  – толщина облицовки, м;

$h_0$  – глубина над облицовкой, м;

$h_w$  – общие потери напора, которые определяются по формуле:

$$h_w = h_m + h_{тр} = h_{вх} + h_{тр} + h_{вых} = \zeta_{вх} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{тр} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{вых} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (2.3)$$

где  $h_m$  – местные потери напора, м;

$h_{вх}$  – потери напора на входе, м;

$h_{тр}$  – потери напора на трение по длине, м;

$h_{вых}$  – потери напора на выходе, м.

Записываем согласно [66]:



$$h_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{\delta_o}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g} = \zeta_{\text{тр}} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad \zeta_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{\delta_o}{4R}, \quad (2.4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент Дарси (сопротивления);

$R$  – гидравлический радиус, м;

$\zeta_{\text{вх}}$  – коэффициент сопротивления входа;

$\zeta_{\text{тр}}$  – коэффициент сопротивления трения;

$\zeta_{\text{вых}}$  – коэффициент сопротивления выхода.

Подставляя (2.3) и (2.4) в уравнение (2.2) и принимая по [13]  $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$ ,  $\zeta_{\text{вых}} = 0$ , получаем:

$$H_1 = h_0 + \delta_o = \zeta_{\text{вх}} \cdot \frac{v^2}{2g} + \lambda \cdot \frac{\delta_o}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2.5)$$

где  $H_1$  – напор на облицовке, м.

Гидравлический радиус вычислим по зависимости:

$$R = \omega / \chi = \delta_{\text{тр}} / 2 = 0,5 \cdot \delta_{\text{тр}}, \text{ м,}$$

где  $\omega$  – живое сечение трещины на 1,0 м длины м<sup>2</sup>;  $\chi$  – смоченный периметр, м.

Уравнение (2.5) перепишем в виде:

$$H_1 = h_0 + \delta_o = \left( \zeta_{\text{вх}} + \lambda \cdot \frac{\delta_o}{0,5 \cdot \delta_{\text{тр}}} \right) \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (2.6)$$

Учитывая выражение (2.6) найдем среднюю скорость в трещине:

$$v_{\text{сртр}} = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_0 + \delta_o)}{\zeta_{\text{вх}} + \lambda \cdot (\delta_o / 0,5 \cdot \delta_{\text{тр}})}}. \quad (2.6')$$

Коэффициент Дарси в протяженной трещине принимается для условий ламинарного режима с гладкими стенками по Г. М. Ломизе [68]:

$$\lambda = \frac{6}{\text{Re}}, \quad (2.7)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\text{Re} = \frac{v \cdot \delta_{\text{тр}}}{2\nu}$ ,  $\text{Re}_{\text{кр}} < 600$  – соответствует ламинарному движению [82, 90].

Удельный расход через трещину на 1 м ее длины, вычислим по формуле:



$$q_{\text{тр}} = v \cdot \omega = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_0 + \delta_0) \cdot \delta_{\text{тр}}^2}{\zeta_{\text{вх}} + \lambda \cdot (\delta_0 / 0,5 \cdot \delta_{\text{тр}})}}, \quad (2.8)$$

где  $\omega = \delta_{\text{тр}} \times 1 \text{ м}$  – площадь сечения трещины,  $\text{м}^2$ .

Рассмотрим теперь пример расчета водопроницаемости через трещину, исходные данные для расчетного случая истечения в атмосферу приняты следующими:  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ;  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  и  $\delta_{\text{тр}} = 0,005 \text{ м}$ .

Удельный расход через трещину определяем по зависимости:

$$q_{\text{тр}} = v \cdot \delta_{\text{тр}}, \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$$

1) Принимаем число Рейнольдса  $Re = 200$ ,  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{тр}} = 0,01 \text{ м}$ ;  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ .

Коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  находим по формуле:

$$\lambda = \frac{6}{Re} = \frac{6}{200} = 0,03;$$

$$v_{\text{сртр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (1 + 0,1)}{0,5 + 0,03 \cdot (0,1 / 0,5 \cdot 0,01)}} = \sqrt{19,62} = 4,43 \text{ м/с};$$

$$q_{\text{тр}} = v_{\text{сртр}} \cdot \delta_{\text{тр}} = 4,43 \cdot 0,01 = 0,0443 \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$$

2) Задаемся числом Рейнольдса  $Re = 200$ ,  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{тр}} = 0,005 \text{ м}$ ;  $\lambda = 0,03$ .

$$v_{\text{сртр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (1 + 0,1)}{0,5 + 0,03 \cdot (0,1 / 0,5 \cdot 0,005)}} = \sqrt{12,68} = 3,56 \text{ м/с};$$

$$q_{\text{тр}} = v_{\text{сртр}} \cdot \delta_{\text{тр}} = 3,56 \cdot 0,005 = 0,0178 \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$$

Сравниваем полученные результаты расчетов по формуле (2.8) с расчетами по формуле Г. М. Ломизе [68].

3) По формуле Г. М. Ломизе (для гладкой трещины)

Дано:  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ;  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{тр}} = 0,01 \text{ м}$ ;  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$ ;

$\mu = 0,134 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{с/см}^3$ .

Расход истечения через гладкую трещину определяем по формуле [63]:

$$q_{\text{тр,гн}} = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I,$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воды,  $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{см}^3$ ;  $I$  – градиент напора в трещине, м;

$$I = \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0} = \frac{1,0 + 0,10}{0,10} = 11,1;$$

$$q_{\text{тр.гн}} = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,134 \cdot 10^{-7}} \cdot 1,0^3 \cdot 11,1 = 0,069 \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$$

4) По формуле Г. М. Ломизе (для шероховатой трещины)

Дано:  $h_0 = 1,0$  м;  $\delta_0 = 0,10$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  м;  $e = 0,002$  м;  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3}$   $\text{кг}/\text{см}^3$ ;

$\mu = 0,134 \cdot 10^{-7}$   $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

$$q_{\text{тр.шп}} = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I \cdot \frac{1}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{тр}}}\right)^{1,5}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,134 \cdot 10^{-7}} \cdot 1,0^3 \cdot 11,1 \cdot \frac{1}{1 + 6 \cdot \left(\frac{0,002}{0,01}\right)^{1,5}} =$$

$= 0,0450 \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$

5) Сравним данные расчета при истечении через малое прямоугольное отверстие [13]:

$$q_{\text{пр.отв}} = \mu_0 \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH}, \quad (2.9)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент расхода малого отверстия по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\mu_0 = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{\text{Re}_H}} = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{46400}} = 0,619,$$

где  $\text{Re}_H = 46400$ , определяется по формуле  $\text{Re}_H = \frac{v \cdot \delta_{\text{тр}}}{2\nu}$ ;

$$\omega = l_{\text{тр}} \cdot \delta_{\text{тр}} = 1,0 \cdot 0,01 = 0,01 \text{ м}^2;$$

$$q_{\text{пр.отв}} = 0,619 \cdot 0,01 \cdot \sqrt{19,62 \cdot (1 + 0,1)} = 0,0287 \text{ м}^3/\text{с на 1 п. м.}$$

Определяем расхождение с полученным расчетным значением по формуле (2.8) и формуле Г. М. Ломизе для шероховатых трещин:

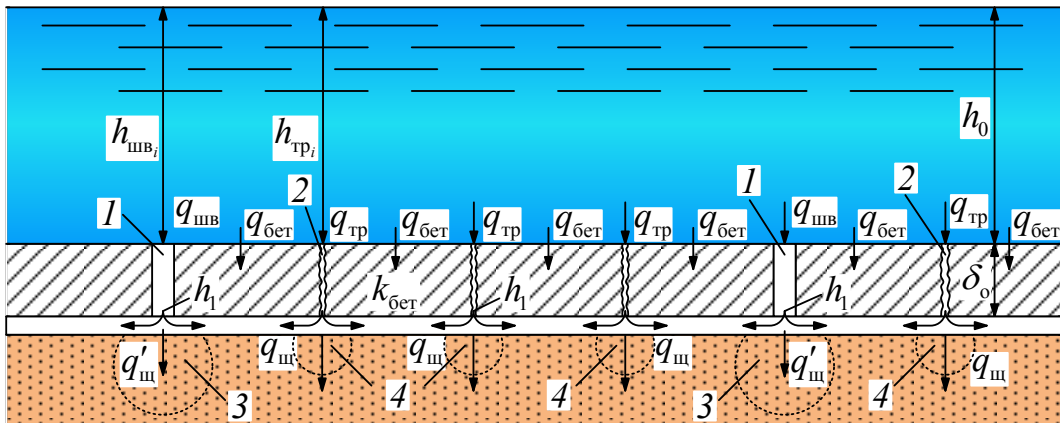
$$\varepsilon_{\%} = \frac{q_{\text{тр.шп}} - q_{\text{тр}}}{q_{\text{тр.шп}}} \cdot 100 \% = \frac{0,0450 - 0,0443}{0,0450} \cdot 100 = 1,5 \%$$

Тогда сравнительные результаты автора по формуле (3.8) близко совпадают с формулой Г. М. Ломизе в случае для шероховатой трещины, что подтверждает их справедливость.

## 2.2 Гидравлическая модель водопроницаемости облицовки канала при наличии трещин и разрушенных швов

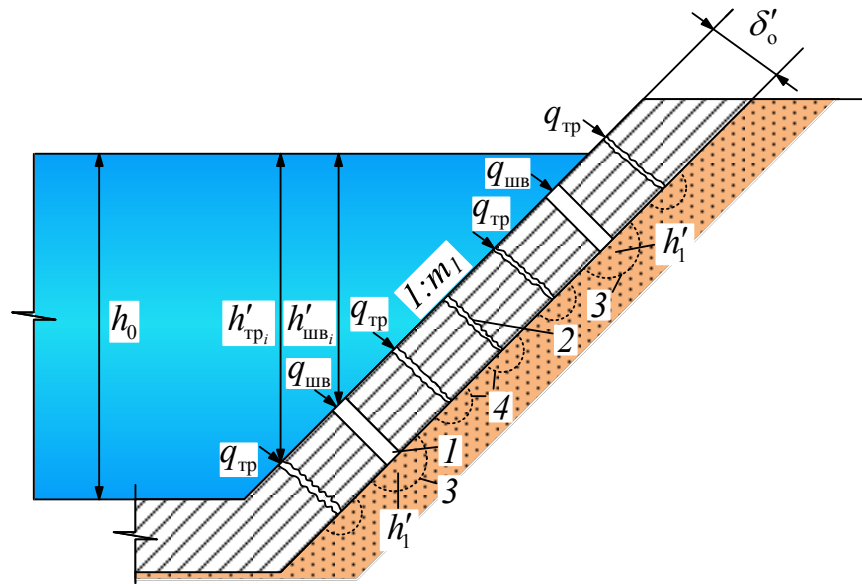
Под действием напора на облицовку  $H = h_0 + \delta_0$  (где  $h_0$  – нормальная глубина в канале, м) водопроницаемость потока через трещины и швы наблюдается с растеканием в основании и формированием контура промачивания. Движение потока через трещины и разрушенные швы, наблюдается как ламинарное. При таком режиме число Рейнольдса не будет превышать критическое значение  $Re < Re_{кр}$  (где  $Re_{кр} = 600$ ) [102]. Однако в некоторых случаях также возможен и турбулентный режим течения при  $Re > 600$ .

Для расчета водопроницаемости через трещины и разрушенные швы необходимо определить неизвестный параметр  $h_1$ , который характеризует напор по подошве облицовки [23, 57]. Для решения поставленной задачи приведены расчетные схемы, которые даны на рисунках 2.3 и 2.4.



- 1 – разрушенные швы; 2 – сквозные трещины; 3 – контур промачивания грунта под швами;  
4 – контур промачивания грунта под трещинами

Рисунок 2.3 – Схема для расчета водопроницаемости бетонной облицовки



- 1 – разрушенные швы; 2 – сквозные трещины; 3 – контур промачивания грунта под швами;  
4 – контур промачивания грунта под трещинами

Рисунок 2.4 – Расчетная схема водопроницаемости бетонной облицовки на откосе мелиоративного канала

Потери на фильтрацию через облицовку на откосах учитываются при напоре на откосах равным  $h_0/2$ .

Потери воды через бетонную облицовку определяются как для бетонопленочной [4, 6, 26]. Общий расход через облицовку определяем, как сумму локальных расходов через сквозные трещины по дну и на откосах канала, нарушенные швы и через бетон облицовки по дну и на откосах:

$$Q_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{n_1} q_{\text{тр}_i} + \sum_{i=1}^{n'_1} q'_{\text{тр}_i} + \sum_{i=1}^{n_2} q_{\text{шв}_i} + \sum_{i=1}^{n'_2} q'_{\text{шв}_i} + \sum_{i=1}^{n_3} q_{\text{бет}_i} \cdot f_{\text{обл}_i} + \sum_{i=1}^{n'_3} q'_{\text{бет}_i} \cdot f'_{\text{обл}_i}, \quad (2.10)$$

где  $Q_{\text{общ}}$  – общий расход водопроницаемости бетонной облицовки на площади  $F_{\text{обл}}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q_{\text{тр}_i}$ ,  $q'_{\text{тр}_i}$  – локальные расходы через отдельные трещины в облицовке по дну и на откосах канала,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q_{\text{шв}_i}$ ,  $q'_{\text{шв}_i}$  – локальные расходы через швы облицовки соответственно по дну и на откосах,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q_{\text{бет}_i}$ ,  $q'_{\text{бет}_i}$  – локальные расходы через бетон облицовки соответственно по дну и на откосах,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$f_{\text{обл}}$ ,  $f'_{\text{обл}}$  – площади отдельных элементов бетона облицовки соответственно по дну и на откосах, м<sup>2</sup>;

$n_1$ ,  $n'_1$ ,  $n_2$ ,  $n'_2$ ,  $n_3$ ,  $n'_3$  – соответственно, общее число трещин, швов и бетона по дну и на откосах облицовки, шт.

Приведенные формулы для определения единичных расходов через трещины в соответствие с общим уравнением (2.10), были получены Г. М. Ломизе [68]:

– для ламинарного режима в трещинах с гладкими стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I_0 \cdot l_{\text{тр}}, \quad (2.11)$$

– для ламинарного режима в трещинах с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{\text{тр}}}{1 + 6 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{тр}}} \right)^{1,5}}, \quad (2.12)$$

– для турбулентного режима в трещинах с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ ):

$$q_{\text{тр}} = \delta_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{\text{тр}} \cdot I} \cdot \left( 2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{\text{тр}}}{2 \cdot e} \right), \quad (2.13)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta_{\text{тр}}$ ,  $l_{\text{тр}}$  – ширина и длина раскрытия трещины, м;

$I$ ,  $I_0$  – градиент напора в трещинах, соответственно, с гладкими и шероховатыми стенками, м;

$\mu$  – динамическая вязкость, кг/(м<sup>2</sup> · с);

$e$  – высота выступа шероховатости стенок трещины, м.

Градиент напора в трещинах с гладкими стенками в случае истечения в атмосферу определяем по следующей формуле:

$$I_0 = \frac{h + \delta_0}{\delta_0}. \quad (2.14)$$

С учетом влияния напора по подошве облицовки  $h_1$ , когда она опирается на грунт основания, градиент напора определяется по формуле:

$$I_o = \frac{h + \delta_o - h_1}{\delta_o}, \quad (2.15)$$

где  $h$  – расчетная глубина в канале, соответствующая, нормальной глубине до дна  $h_0$ , а для откосов  $h'_{тр}$  – с учетом заглубления трещины относительно расчетного уровня воды, м (см. рис. 2.5);

$h_1$  – неизвестный параметр по подошве облицовки, м (пьезометрический напор).

Параметр по подошве облицовки  $h_1$  вычисляется по формуле, полученной из уравнения неразрывности:

– для трещины:

$$h_1 = \frac{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot H_1 \cdot \delta_{тр}^3 \cdot l_{тр} \cdot Arch(2l_p/\pi \cdot \delta_{тр})}{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot \delta_{тр}^3 \cdot l_{тр} \cdot Arch(2l_p/\pi \cdot \delta_{тр}) + \pi \cdot k_{тр} \cdot \delta_o}, \text{ м}; \quad (2.16)$$

– для полностью разрушенного шва:

$$h_1 = \frac{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot H_1 \cdot \delta_{шв}^3 \cdot l_{шв} \cdot Arch(2l'_p/\pi \cdot \delta_{шв})}{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot \delta_{шв}^3 \cdot l_{шв} \cdot Arch(2l'_p/\pi \cdot \delta_{шв}) + \pi \cdot k_{тр} \cdot \delta_o}, \text{ м}; \quad (2.17)$$

– для частично разрушенного шва:

$$h_1 = \frac{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot H_1 \cdot \delta_{швн}^3 \cdot l_{шв} \cdot Arch(2l_p/\pi \cdot \delta_{швн})}{(\rho/12 \cdot \mu) \cdot \delta_{швн}^3 \cdot l_{шв} \cdot Arch(2l'_p/\pi \cdot \delta_{швн}) + \pi \cdot k_{тр} \cdot \delta_o}, \text{ м}; \quad (2.18)$$

где  $l_p$  – ширина растекания потока в основании под трещиной (швом), м, которая определяется по следующим зависимостям:

$$l_p = \delta_{тр} + 2(h_o + \delta_o); \quad (2.19)$$

$$l'_p = \delta_{швн} + 2(h_o + \delta_o), \quad (2.20)$$

где  $\delta_{швн}$  – ширина шва при частичном его разрушении, ( $\delta_{швн} = \lambda_1 \cdot \delta_{шв}$ ), м;

$\lambda_1$  – степень разрушенности шва (принимается  $\lambda_1 = 1,0 \div 0,1$ );

$H_1$  – напор по подошве облицовки в трещине (шве), м.

Градиент напора в трещинах с шероховатыми стенками находят по зависимости [68]:

$$I = I_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi_1 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{тр}}} \right)}, \quad (2.21)$$

где  $\varphi_1 \cdot (e/\delta_{\text{тр}})$  – параметр, учитывающий удлинение струек.

Динамическая вязкость воды определяется по формуле [68]:

$$\mu = \frac{0,178 \cdot \rho}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \quad (2.22)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$t$  – температура в °С.

При вычислении удельного расхода через швы облицовки применяем следующие расчетные формулы.

а) Случай с разрушенными швами:

– для ламинарного режима в швах с гладкими стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I_0 \cdot l_{\text{шв}};$$

– для ламинарного режима в швах с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ ):

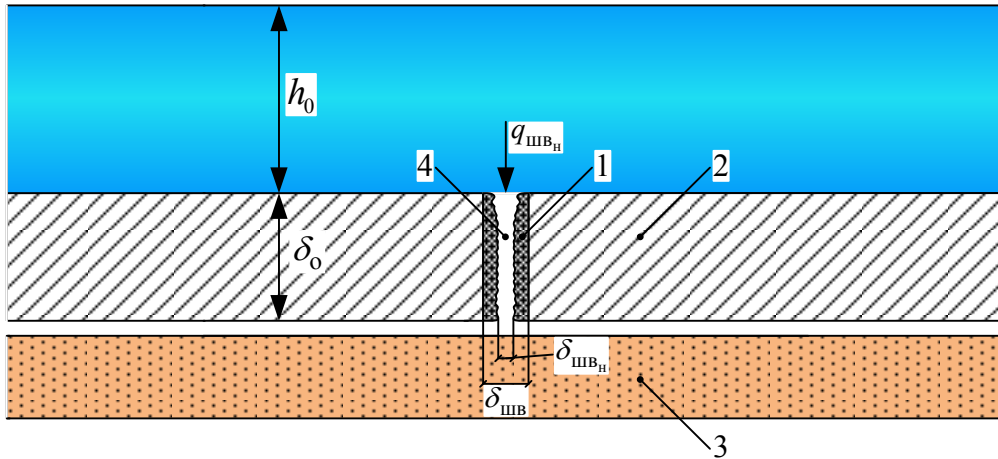
$$q_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{\text{шв}}}{1 + 6 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{шв}}} \right)^{1,5}};$$

– для турбулентного режима в швах с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ ):

$$q_{\text{шв}} = \delta_{\text{шв}} \cdot l_{\text{шв}} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{\text{шв}} \cdot I} \cdot \left( 2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{\text{шв}}}{2 \cdot e} \right),$$

где  $I_0 = \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}$ ;  $I = I_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi_1 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{шв}}} \right)}$ .

б) Случай при частично разрушенных швах (рис. 2.5).



1 – неразрушенные элементы шва; 2 – бетонные плиты; 3 – грунтовое основание;  
4 – трещина в частично разрушенном шве

Рисунок 2.5 – Схема к расчету (частично) нарушенного шва

– в случае ламинарного режима в частично нарушенном шве с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{швн} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{швн}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{швн}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{швн}}\right)^{1,5}};$$

– в случае турбулентного режима в частично нарушенном шве с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ ):

$$q_{швн} = \delta_{швн} \cdot l_{швн} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{швн}} \cdot I \cdot \left(2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{швн}}{2 \cdot e}\right),$$

где  $\delta_{швн}$ ,  $l_{швн}$  – ширина раскрытия и длина не полностью разрушенного шва, м;  
 $\delta_{швн} = k_p \cdot \delta_{шв}$ ,  $k_p$  – коэффициент разрушения шва (принимается по натурным данным);

$$I = I_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi \cdot \left(\frac{e}{\delta_{швн}}\right)}; I_0 = \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}.$$

Удельный расход через единичный элемент бетонной облицовки площадью  $1 \text{ м}^2$  вычисляется по зависимости:

$$q_{бет} = k_{бет} \cdot \left(\frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}\right) \cdot f_{обл}, \quad (2.23)$$



где  $k_{\text{бет}}$  – коэффициент водопроницаемости бетона облицовки без учета трещин, который задается по нормативной и справочной литературе в зависимости от марки бетона;

$f_{\text{обл}}$  – площадь облицовки ( $1 \text{ м}^2$ ) гидравлического градиента.

При расчете глубины  $h_1'$  на откосах канала в формуле (2.14) необходимо вместо нормальной глубины  $h_0$  учитывать среднюю  $h_{\text{ср}}$ :  $h_{\text{ср}} = h_0/2$ .

После достижения потоком воды через трещины и нарушенные швы грунта основания происходит его инфильтрация вертикально вниз. Здесь поток становится фильтрационным, а для определения его значения применяется ранее полученная формула удельного расхода через грунт в пределах зоны растекания фильтрации [53].

На основании вышеперечисленного выполняется расчет фильтрационных расходов через трещины и швы бетонной облицовки мелиоративного канала. Схема расчета фильтрации через трещину облицовки приведена на рисунке 2.6.

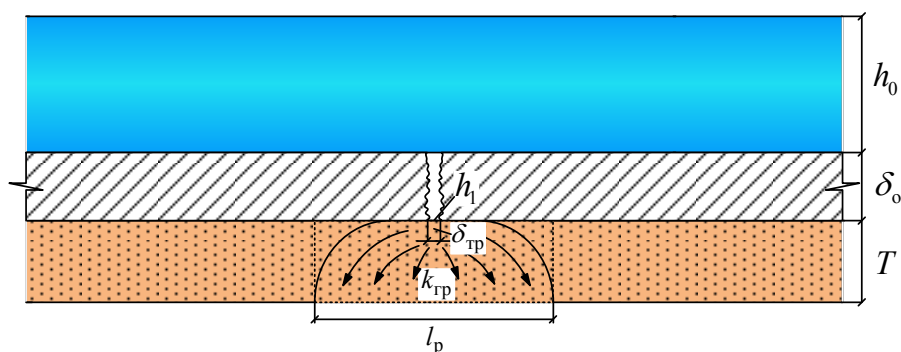


Рисунок 2.6 – Схема к расчету фильтрации через единичную трещину в грунт основания

С учетом расчетной схемы фильтрации через трещину в грунт основания (рис. 2.6) считаем растекание потока под облицовкой равной  $l_p$ , а напор под трещиной  $h_1$  будет составлять величину полного напора  $h_1 \approx h_0 + \delta_0$ , а ширину растекания примем, как [45]  $l_p = \beta \cdot (h_0 + \delta_0)$ , где  $\beta$  – коэффициент растекания потока в пределах  $\beta = 0,1 - 1,5$ .

Расчет общих потерь воды (или расхода водопроницаемости) через бетонную облицовку при  $L_{\text{к}} = 10000 \text{ м}$ .

– для гладких трещин и швов:

$$\begin{aligned} Q_{обл} &= n_1 \cdot q_{тр} + n'_1 \cdot q'_{тр} + n_2 \cdot q_{шв} + n'_2 \cdot q'_{шв} + n_3 \cdot q_{бет} + n'_3 \cdot q'_{бет} = \\ &= 100 \cdot 0,8106 \cdot 10^{-5} + 250 \cdot 0,4421 \cdot 10^{-5} + 10 \cdot 0,7879 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 5 \cdot 0,4297 \cdot 10^{-5} + 50 \cdot 0,77 \cdot 10^{-9} + 200 \cdot 0,42 \cdot 10^{-9} = 0,2035 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} \end{aligned}$$

– для шероховатых трещин и швов:

$$\begin{aligned} Q_{обл} &= n_1 \cdot q_{тр} + n'_1 \cdot q'_{тр} + n_2 \cdot q_{шв} + n'_2 \cdot q'_{шв} + n_3 \cdot q_{бет} + n'_3 \cdot q'_{бет} = \\ &= 100 \cdot 0,3401 \cdot 10^{-5} + 250 \cdot 0,1855 \cdot 10^{-5} + 10 \cdot 0,2813 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 5 \cdot 0,1855 \cdot 10^{-5} + 50 \cdot 0,77 \cdot 10^{-9} + 200 \cdot 0,42 \cdot 10^{-9} = 0,8669 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Как показали результаты расчета для каналов с бетонной облицовкой, потери воды при водопроницаемости через трещины и разрушенные швы составляют следующие значения: при гладких трещинах и швах –  $0,2035 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ; при шероховатых –  $0,8669 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . В целом для оросительного канала с бетонной облицовкой потери воды через трещины и швы с выступами шероховатости уменьшаются по сравнению с гладкими стенками в 2,34 раза, а потери через бетон без учета трещин и швов составляют малую долю, которыми можно пренебречь.

Сводные результаты расчетов потерь воды через гладкие трещины, трещины и швы с выступами шероховатости по дну и откосах канала приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов потерь воды через трещины и швы (при  $\delta_{тр}=0,001; 0,0025; 0,005; 0,0075; 0,01 \text{ м}$ ,  $l_{тр}=0,10 \text{ м}$ ,  $\delta_{шв}=0,05; 0,10 \text{ м}$ ,  $l_{шв}=0,10 \text{ м}$ )

Гидравлические расчеты расходов через трещину и шов в бетонной облицовке по дну канала при толщине облицовки $\delta_0=0,10 \text{ м}$					
	При ширине раскрытия трещин $\delta_{тр}, \text{ м}$				
	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,0025$	$\delta_{тр}=0,005$	$\delta_{тр}=0,0075$	$\delta_{тр}=0,01$
Для гладкой трещины, $q_{тр.гл}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,5125 \cdot 10^{-5}$	$0,6294 \cdot 10^{-5}$	$0,7104 \cdot 10^{-5}$	$0,7659 \cdot 10^{-5}$	$0,8106 \cdot 10^{-5}$
Для шероховатой трещины, $q_{тр.шр}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,1327 \cdot 10^{-6}$	$0,5902 \cdot 10^{-6}$	$0,1563 \cdot 10^{-5}$	$0,2535 \cdot 10^{-5}$	$0,3401 \cdot 10^{-5}$
	При ширине шва $\delta_{шв}, \text{ м}$				
	$\delta_{шв}=0,05$	$\delta_{шв}=0,10$			
Для гладкой стенки шва, $q_{шв.гл}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,7879 \cdot 10^{-5}$	$0,9356 \cdot 10^{-5}$			
Для шероховатой стенки шва, $q_{шв.шр}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,2813 \cdot 10^{-5}$	$0,4936 \cdot 10^{-5}$			

## Продолжение таблицы 2.1

Гидравлические расчеты расходов через трещину и шов в бетонной облицовке на откосе канала при толщине облицовки $\delta_0=0,10$ м					
	При ширине раскрытия трещин $\delta_{тр}$ , м				
	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,001$
Для гладкой трещины, $q_{тр.гл}$ , $M^3/c$	$0,2795 \cdot 10^{-5}$	$0,3433 \cdot 10^{-5}$	$0,3875 \cdot 10^{-5}$	$0,4177 \cdot 10^{-5}$	$0,4421 \cdot 10^{-5}$
Для шероховатой трещины, $q_{тр.шр}$ , $M^3/c$	$0,724 \cdot 10^{-7}$	$0,3219 \cdot 10^{-6}$	$0,8523 \cdot 10^{-6}$	$0,1383 \cdot 10^{-5}$	$0,1855 \cdot 10^{-5}$
	При ширине шва $\delta_{шв}$ , м				
	$\delta_{шв}=0,05$		$\delta_{шв}=0,05$		
Для гладкой стенки шва, $q_{шв.гл}$ , $M^3/c$	$0,4297 \cdot 10^{-5}$		$0,5103 \cdot 10^{-5}$		
Для шероховатой стенки шва, $q_{шв.шр}$ , $M^3/c$	$0,1534 \cdot 10^{-5}$		$0,2692 \cdot 10^{-5}$		
Общий расход водопроницаемости трещин и швов бетонной облицовки на канале, $M^3/c$					
	При ширине шва $\delta_{шв}=0,05$ м				
	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,0025$	$\delta_{тр}=0,005$	$\delta_{тр}=0,0075$	$\delta_{тр}=0,01$
Для гладких трещин и швов, $Q_{обл.гл}$ , $M^3/c$	$0,1312 \cdot 10^{-2}$	$0,1588 \cdot 10^{-2}$	$0,1779 \cdot 10^{-2}$	$0,1911 \cdot 10^{-2}$	$0,2016 \cdot 10^{-2}$
Для шероховатых трещин и швов, $Q_{обл.шр}$ , $M^3/c$	$0,6729 \cdot 10^{-4}$	$0,1754 \cdot 10^{-3}$	$0,4052 \cdot 10^{-3}$	$0,635 \cdot 10^{-3}$	$0,8399 \cdot 10^{-3}$
	При ширине шва $\delta_{шв}=0,10$ м				
	$\delta_{тр}=0,001$	$\delta_{тр}=0,0025$	$\delta_{тр}=0,005$	$\delta_{тр}=0,0075$	$\delta_{тр}=0,01$
Для гладких трещин и швов, $Q_{обл.гл}$ , $M^3/c$	$0,1331 \cdot 10^{-2}$	$0,1607 \cdot 10^{-2}$	$0,1798 \cdot 10^{-2}$	$0,1929 \cdot 10^{-2}$	$0,2035 \cdot 10^{-2}$
Для шероховатых трещин и швов, $Q_{обл.шр}$ , $M^3/c$	$0,9432 \cdot 10^{-4}$	$0,2025 \cdot 10^{-3}$	$0,4323 \cdot 10^{-3}$	$0,6621 \cdot 10^{-3}$	$0,8669 \cdot 10^{-3}$

Для практического использования были проведены шесть серий расчетов удельного расхода водопроницаемости трещин в бетонной облицовке при  $\delta_{тр} = 0,001 - 0,01$  м и  $h_0 = 1,0 - 5,0$  м по дну и на откосах канала на 1 п. м. длины трещины с гладкими и шероховатыми стенками и построены универсальные графики (рисунок 2.7 и 2.8), а также удельного расхода водопроницаемости швов облицовки при;  $\delta_{шв} = 0,05; 0,10$  и  $h_0 = 1,0 - 5,0$  м по дну и на откосах канала на 1 п. м. длины швов с гладкими и шероховатыми швами (рисунок 2.9–2.12). Расчеты производились в программе MathCad при  $k_{гр} = 1,0$  м/сут  $= 1,16 \cdot 10^{-5}$  м/сут. Для получения полного расхода водопроницаемости трещин и швов при любых типах

грунтов основания облицовки необходимо использовать следующие переходные формулы:

– для трещин бетонной облицовки:

$$q_{\text{тр}} = \frac{q_{\text{тр.уд}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot k_{\text{гр}}}{\bar{k}_{\text{гр}}}, \text{ м}^3/\text{с};$$

– для швов бетонной облицовки:

$$q_{\text{шв}} = \frac{q_{\text{шв.уд}} \cdot l_{\text{шв}} \cdot k_{\text{гр}}}{\bar{k}_{\text{гр}}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $q_{\text{тр.уд}}$ ,  $q_{\text{шв.уд}}$  – удельные расходы водопроницаемости соответственно трещин и швов облицовки на 1 п. м. их длины,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$l_{\text{тр}}$ ,  $l_{\text{шв}}$  – фактическая длина трещин и швов по данным замеров, м;

$k_{\text{гр}}$  – фактический коэффициент фильтрации грунта основания по данным гидрогеологических изысканий, м/с;

$\bar{k}_{\text{гр}}$  – расчетный коэффициент фильтрации грунта ( $\bar{k}_{\text{гр}} = 1,16 \cdot 10^{-5}$  м/с).

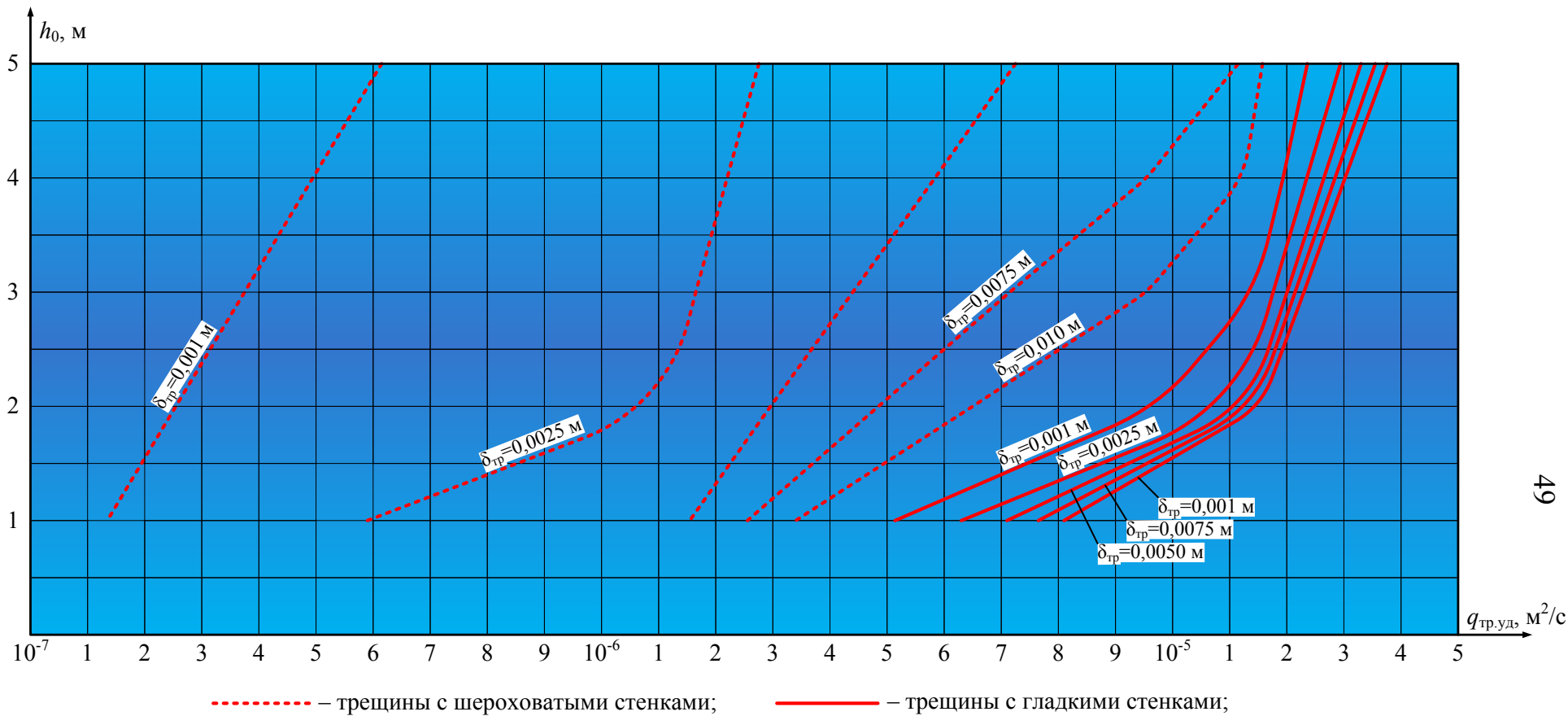


Рисунок 2.7 – График  $q_{тр.уд} = f(\delta_{тр}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины трещин с гладкими и шероховатыми стенками по дну оросительного канала

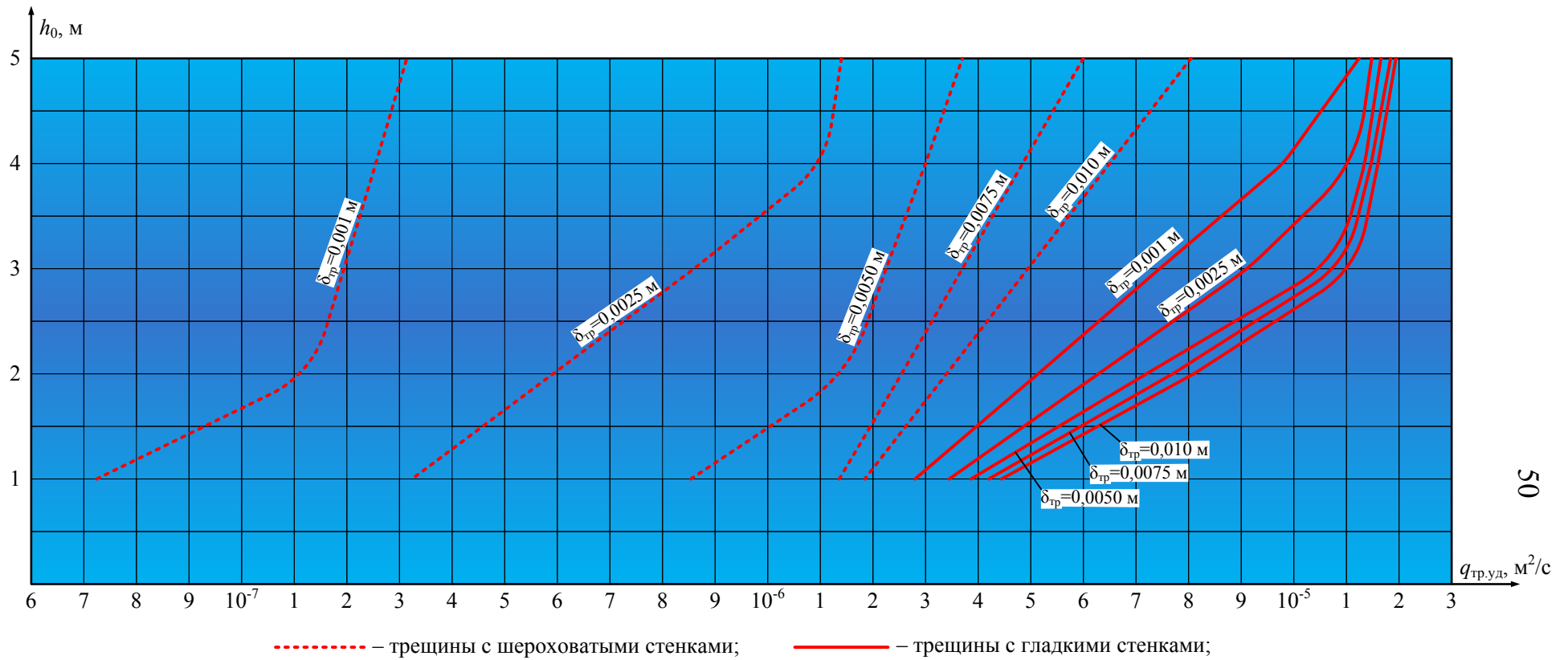
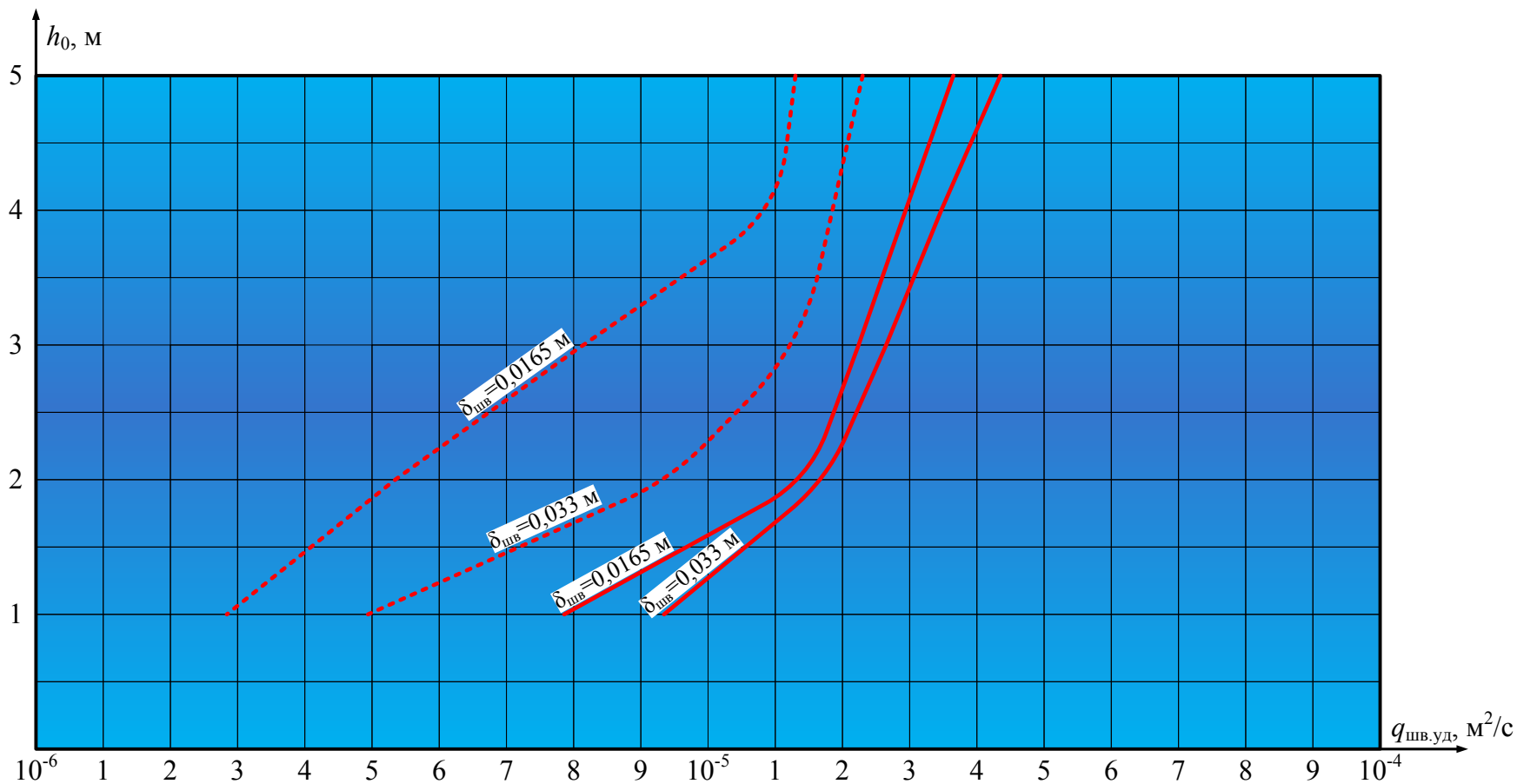
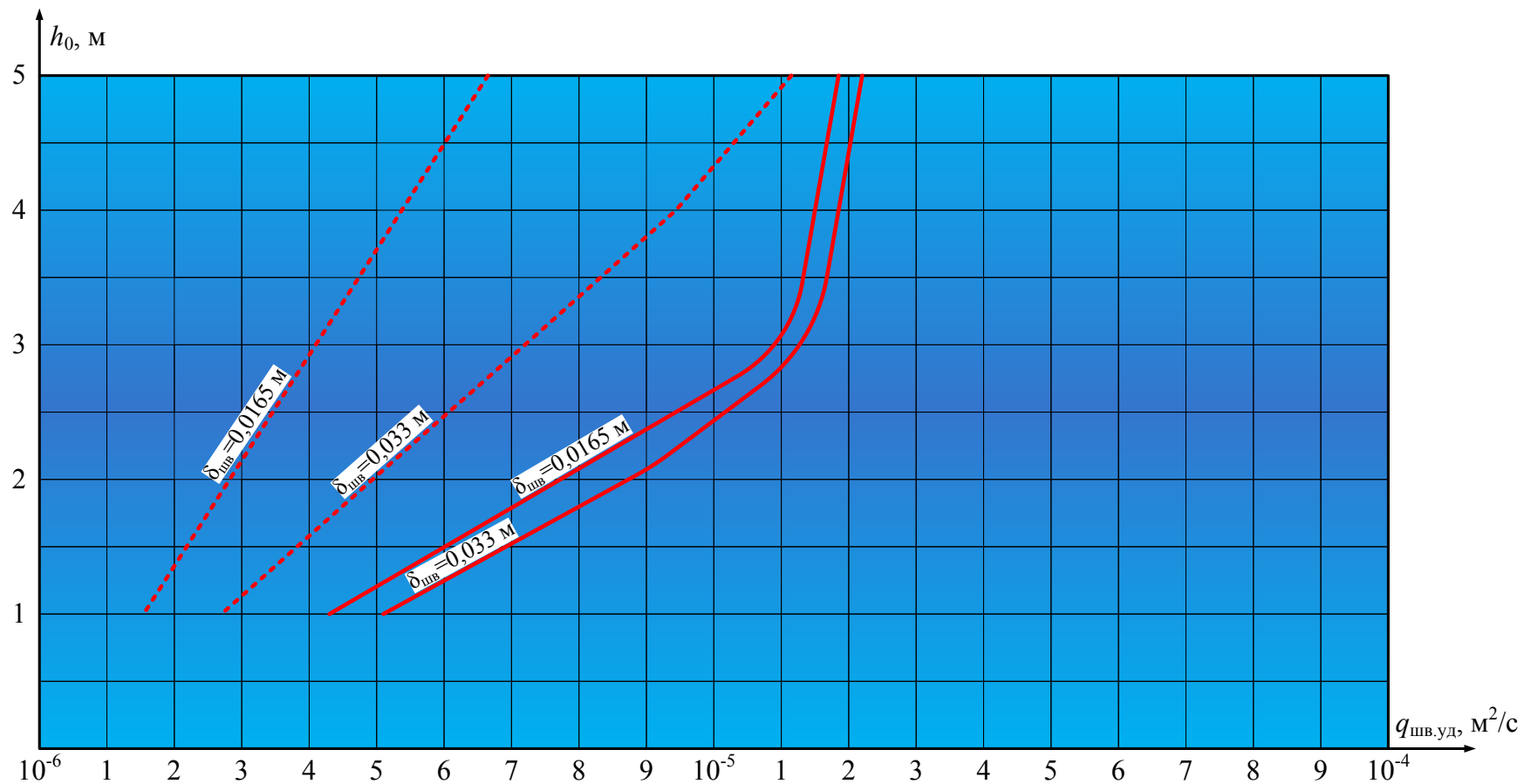


Рисунок 2.8 – График  $q_{тр,уд}=f(\delta_{тр}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины трещин с гладкими и шероховатыми стенками на откосе оросительного канала



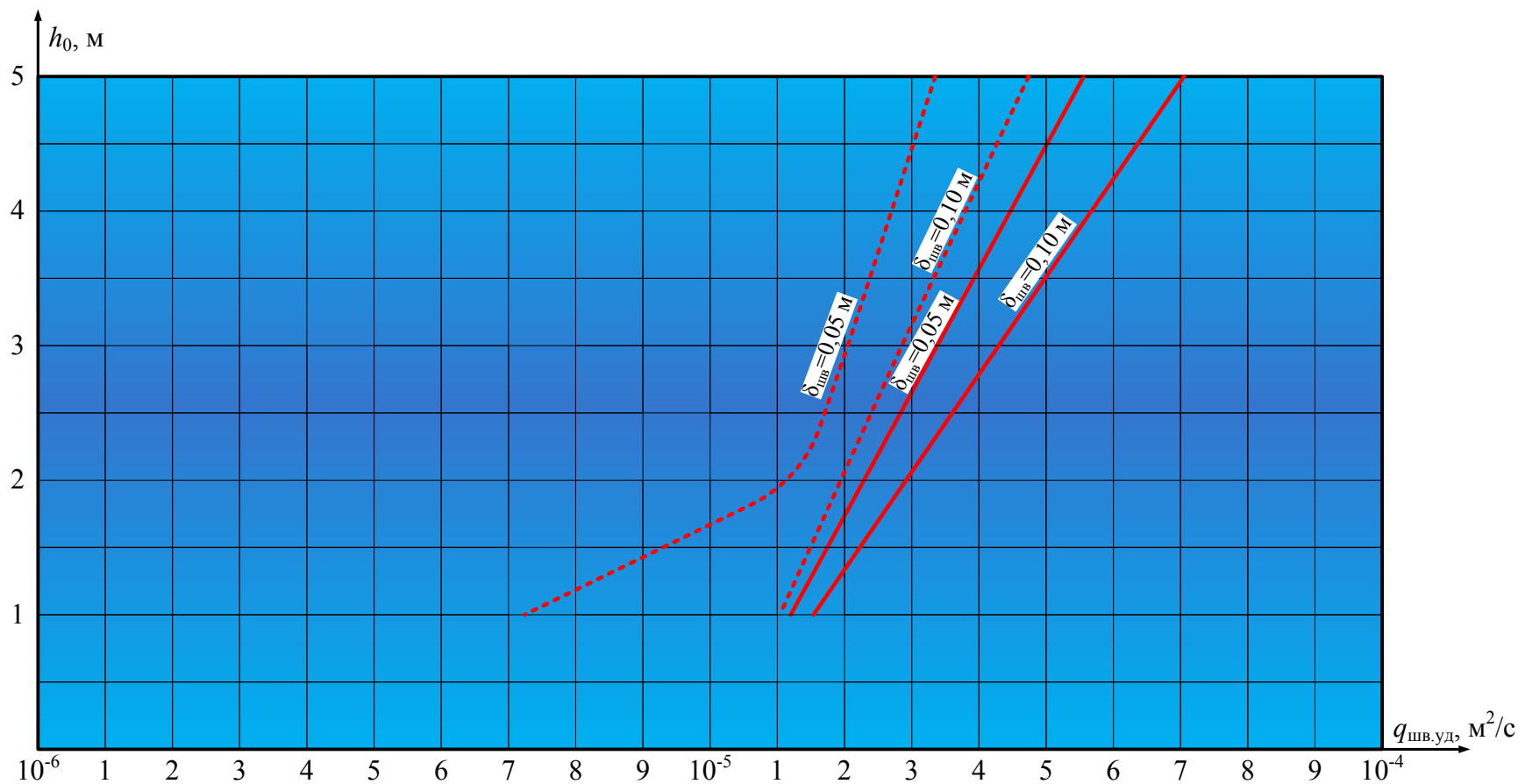
..... – частично разрушенные швы с шероховатыми стенками; ———— – частично разрушенные швы с гладкими стенками;  
 Рисунок 2.9 – График  $q_{шв.уд} = f(\delta_{шв}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины частично разрушенного шва с гладкими и шероховатыми стенками по дну оросительного канала



----- – частично разрушенные швы с шероховатыми стенками; ———— – частично разрушенные швы с гладкими стенками;

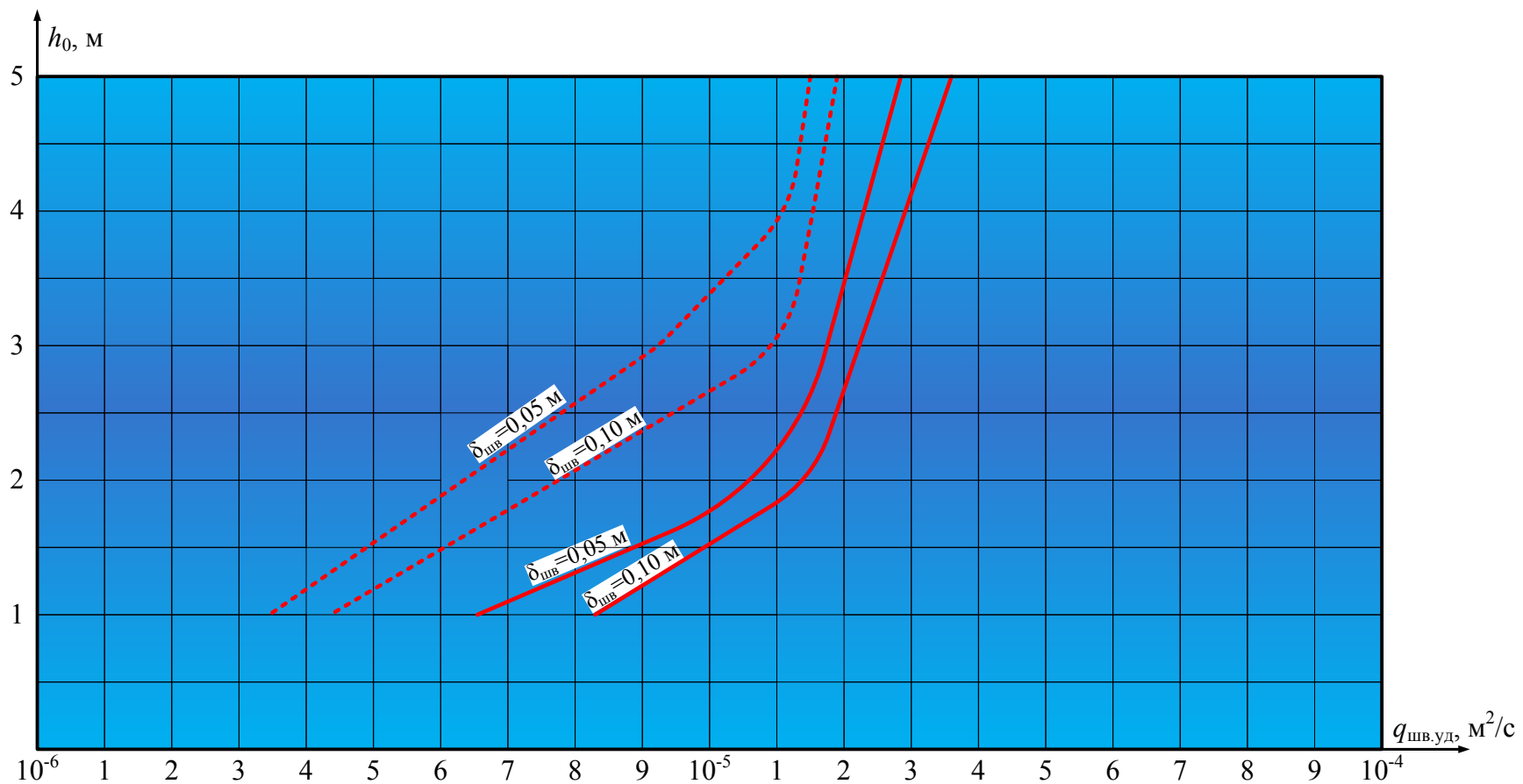
Рисунок 2.10 – График  $q_{шв.уд} = f(\delta_{шв}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины частично разрушенного шва с гладкими и шероховатыми стенками на откосе оросительного канала





..... – полностью разрушенные швы с шерховатыми стенками; ———— – полностью разрушенные швы с гладкими стенками;

Рисунок 2.11 – График  $q_{шв.уд} = f(\delta_{шв}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины полностью разрушенного шва с гладкими и шерховатыми стенками по дну оросительного канала



..... – полностью разрушенные швы с шероховатыми стенками; — полностью разрушенные швы с гладкими стенками;

Рисунок 2.12 – График  $q_{шв.уд} = f(\delta_{шв}, h_0)$  для определения удельного гидравлического расхода на 1 п. м длины полностью разрушенного шва с гладкими и шероховатыми стенками на откосе оросительного канала

### 2.3 Решение общей задачи потерь воды через облицовку с полимерной мембраной и защитным покрытием из бетона при длительной эксплуатации мелиоративных каналов

Действующие каналы на мелиоративных системах имеют низкий КПД, составляющий 0,75–0,80 [3, 43, 71, 73, 74, 105, 117], что значительно ниже норм СП 100.13330.2012 [101].

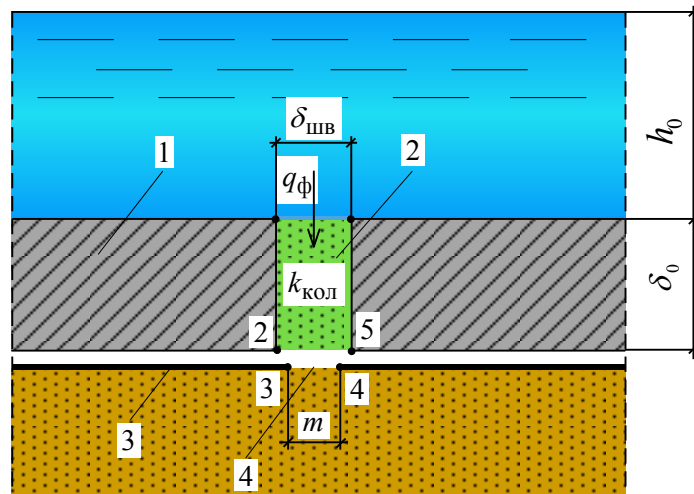
Для повышения КПД каналов оросительных систем предусматривается их реконструкция на площади 2,4 млн. га, что ведет к уменьшению потерь воды на фильтрацию. Для каналов в бетонной облицовке и особенно для каналов из сборных плит потери воды на фильтрацию происходят частично или полностью разрушенные швы и трещины бетонных облицовок и повреждения экрана из полиэтиленовых пленок [34, 40, 56, 89, 110, 116].

В связи с этим важной задачей является расчет потерь воды через трещины и швы для сборных и монолитных облицовок длительной их эксплуатации.

Для уменьшения потерь на фильтрацию через швы и трещины из каналов до минимума необходимо использовать высокоэффективные конструкции облицовок из геосинтетических материалов [2, 64, 75], позволяющих обеспечить потери из каналов до 4,0–3,0 % [52].

Рассмотрим теперь расчет потерь воды через облицовку с геокомпозитным и защитным покрытием из бетона с нарушенными швами, когда происходит их кольматация при длительной эксплуатации. Вначале рассмотрим случай, при котором грунтовое основание под облицовкой характеризуется большей водопроницаемостью, чем закольматированный шов. Согласно [51, 75] при соотношении коэффициентов фильтрации  $k_{гр}/k_{кол} \geq 10$  (где  $k_{гр}$  – коэффициент фильтрации грунта основания, м/сут;  $k_{кол}$  – коэффициент фильтрации закольматированного шва, м/сут), то влиянием грунтового основания можно пренебрегать.

Схема к расчету закольматированного шва с нарушением экрана в виде щели, которая может образовываться в местах стыков полотнищ экрана (рисунок 2.13)



1 – бетонное покрытие; 2 – заклепанный шов; 3 – полимерная геомембрана;  
4 – повреждение в виде щели

Рисунок 2.13 – Схема к расчету водопроницаемости через заклепанный шов облицовки канала при  $k_{гр}/k_{кол} \geq 10$

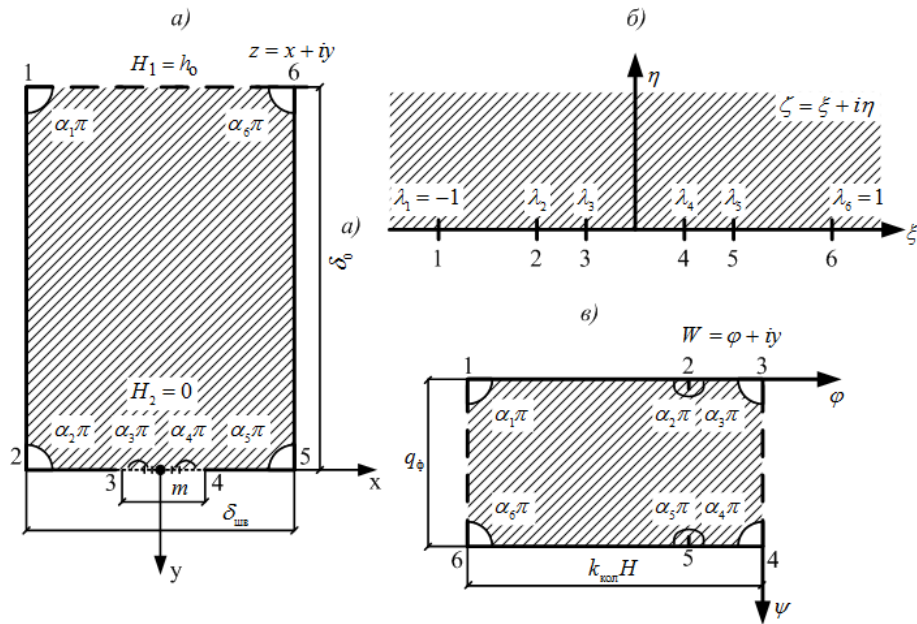
При решении данной задачи использован метод конформных отображений. Расчеты водопроницаемости облицовок с поврежденными швами основываются на методах теории фильтрации, которые представлены в широко известных работах [6, 9, 13, 59, 60, 63, 82, 106] и других [4, 5, 65, 90].

В этих задачах используются следующие допущения и предпосылки:

- движение фильтрационного потока принимается установившимся и подчиняющимся закону ламинарной фильтрации (при  $Re < Re_{кр}$ );
- водопроницаемостью покрытия из бетона пренебрегаем в виду ее малости по сравнению с заклепанным швом;
- полимерный экран считается гибким и плотно прилегающим к грунту;
- ширина шва облицовки превышает ширину повреждения полимерного экрана ( $\delta_{шв} > m$ ).

Сформулируем задачу водопроницаемости через заклепанный шов облицовки с повреждением полимерного экрана: под действием напора на облицовку  $H_1 = h_0 + \delta_0$ , через шов будет наблюдаться фильтрационный поток с расходом  $q_\phi$ . При этом напор в щели облицовки принимается равным  $H_2 = 0$ , тогда напор на облицовку составит:  $H = H_1 - H_2 = h_0 + \delta_0$ .

В методе конформных отображений [66, 67] имеется функция  $z = f(\zeta)$ , которая отображает верхнюю полуплоскость на многоугольник с углами в точках 1, 2, 5, 6 –  $\pi/2$  и точках 3, 4 –  $\pi$  (рисунок 2.14).



*a* – действительная область фильтрации  $Z$ ; *б* – верхняя полуплоскость  $\zeta$  ;  
*в* – область комплексного потенциала  $W$

Рисунок 2.14 – Схема к последовательному отображению областей на шестиугольник методом конформных отображений

Задача о точном отображении физической области  $Z$  на полигональную область отображается с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [66].

Формула Кристоффеля-Шварца часто записывается в более общем виде:

$$z = A \int_0^{\zeta} (\zeta - \lambda_1)^{\alpha_1-1} \cdot (\zeta - \lambda_2)^{\alpha_2-1} \dots (\zeta - \lambda_n)^{\alpha_n-1} d\zeta + B, \tag{2.24}$$

где  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$  – точки верхней полуплоскости  $\zeta \geq 0$ , относящиеся к угловым точкам многоугольника 1, 2...6;

$A$  и  $B$  – постоянные, которые находятся по координатам точек;

$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$  – числа, соответствующие углам многоугольника в точках 1, 2...6.

Последовательность конформных отображений показана на рисунке 2.14.

Используя формулу (2.24) с учетом углов в точках 1, 2...6, получим отображение верхней полуплоскости  $\zeta$  на прямоугольник при  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_5 = \alpha_6 = \frac{1}{2}$ ,

$\alpha_3 = \alpha_4 = 1$  (рис. 2.14, *a, б*):

$$z = A \int_0^{\zeta} (\zeta - \lambda_1)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - \lambda_2)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - \lambda_3)^{1-1} (\zeta - \lambda_4)^{1-1} (\zeta - \lambda_5)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - \lambda_6)^{\frac{1}{2}-1} d\zeta + B. \quad (2.25)$$

После соответствующих отображений и принимая согласно рисунка 2.10, б  $\lambda_1 = -1$ ,  $\lambda_6 = 1$ ,  $\lambda_2 = \lambda_5 = \lambda$ ,  $\lambda_3 = \lambda_4 = \lambda'$ , уравнение (2.25) получит вид:

$$\begin{aligned} z &= A \int_0^{\zeta} (\zeta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}} (\zeta - \lambda_2)^{-\frac{1}{2}} d\zeta + B = A \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{(\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - \lambda^2)} + B = \\ &= Ak \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{(1 - \zeta^2)(1 - k^2 \zeta^2)} + B \end{aligned}, \quad (2.26)$$

где  $k = \frac{1}{\lambda} > 1$ .

Полученная зависимость (2.26) является эллиптическим интегралом 1-го рода при модуле  $k$  [66].

Так как в зависимости (2.26) модуль  $k > 1$ , сделаем замену:

$$\zeta = \frac{t}{k}, \quad d\zeta = \frac{1}{k} dt.$$

Тогда выражение (2.26) запишем:

$$z = A \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{\left(1 - \frac{t^2}{k^2}\right) \cdot (1 - t^2)}} + B = AF(t, k_1) + B, \quad (2.27)$$

где  $k_1 = \frac{1}{k} < 1$  – модуль эллиптического интеграла;

$F(t, k_1)$  – эллиптический интеграл 1-го рода при модуле  $k_1$ .

Принимая значения точек 2 и 5, найдем постоянные  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{\delta_{шв}}{2K(k_1)}, \quad B = 0.$$

Откуда для координат точки 1 получим:  $A = \frac{\delta_0}{K'(k_1)} = \frac{\delta_{шв}}{2K(k_1)}$ ,

или

$$\frac{\delta_{шв}}{2\delta_0} = \frac{K(k_1)}{K'(k_1)}, \quad (2.28)$$

где  $K(k_1)$ ,  $K'(k_1)$  – полные эллиптические интегралы 1-го рода, при модулях  $k_1$  и  $k_1' = \sqrt{1-k_1^2}$ .

Модуль  $k_1$  перепишем из соотношения (2.28). Тогда, подставляя комплексные постоянные  $A$  и  $B$  в зависимость (2.27), найдем:

$$z = \frac{\delta_{\text{шв}}}{2K(k_1)} F(t, k_1), \quad (2.29)$$

или заменяя  $t = k\zeta$ ,

$$z = \frac{\delta_{\text{шв}}}{2K(k_1)} F(k\zeta, k_1), \quad (2.29')$$

откуда обратная функция будет записываться через эллиптический синус:

$$\zeta = k_1 \text{sn} \left( \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} z, k_1 \right). \quad (2.30)$$

Перепишав значения точки 4 на области  $z$  и  $\zeta$  из выражения (2.30) определим неизвестный параметр  $k_2$ :

$$k_2 = k_1 \text{sn} \left( \frac{mK(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1 \right). \quad (2.38)$$

Преобразуя полуплоскость  $\zeta$  на область комплексного потенциала  $\omega$  (рис. 2.10, б, в), находим:

$$\omega = C \int_0^{\zeta} (\zeta + 1)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - \lambda_2)^{-1} (\zeta - \lambda_3)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - 1)^{\frac{1}{2}-1} (\zeta - \lambda_5)^{-1} (\zeta - 1)^{\frac{1}{2}-1} d\zeta + D. \quad (2.32)$$

После отображения уравнение (2.32) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \omega &= C \int_0^{\zeta} (\zeta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}} (\zeta^2 - \lambda^2)^{-\frac{1}{2}} d\zeta + D = C \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - \lambda^2)}} + D = \\ &= \frac{C}{k_2} \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1 - \zeta^2)(1 - k_3^2 \zeta^2)}} + D. \end{aligned} \quad (2.33)$$

где  $k_3 = \frac{1}{k_2} > 1$ .

Так как  $k_3 > 1$  проведем замену:

$$\zeta = \frac{\tau}{k_3} = \tau k_2, \quad d\zeta = k_2 d\tau,$$

откуда:

$$W = C \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{(1-k_2^2\tau^2)(1-\tau^2)}} + D = CF(\tau, k_2) + D = CF\left(\frac{1}{k_2}\tau, k_2\right) + D. \quad (2.34)$$

Подставив значения точек 4 и 6, найдем постоянные С и D:

$$C = -i \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)}; \quad D = i \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot K(k_2) - k_{\text{кол}} \cdot H. \quad (2.35)$$

Тогда выражения (2.35), после подстановки их в уравнение (2.34), запишем его в виде:

$$W = -i \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot F(\tau, k_2) + i \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot K(k_2) - k_{\text{кол}} \cdot H. \quad (2.36)$$

Напор на граничных линиях 1–2–3 и 6–5–4 определим из (2.36), при  $\psi = 0$  и  $q_\phi$ , а  $\varphi = -k_{\text{кол}} \cdot H$  и  $\zeta = |\xi|$ . Здесь  $1 \leq \tau \leq \frac{1}{k_2}$ , следовательно, зависимость (2.34)

будет иметь вид:

$$F(\tau, k_2) = K(k_2) + i \int_1^{\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2-1)(1-k_2^2\tau^2)}} K(k_2) + i \cdot I. \quad (2.37)$$

Проведя замену переменных:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1-k_2'^2 \cdot \omega}}; \quad d\tau = \frac{(k_2'^2) \cdot \omega \cdot d\omega}{(1-k_2'^2 \cdot \omega^2) \sqrt{[1-(k_2')^2 \cdot \omega^2]}}$$

интеграл  $I$  в уравнении (2.44) получит вид:

$$I = \int_1^{\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2-1)(1-k_2^2\tau^2)}} = \int_0^{\omega} \frac{k_2'^2 d\omega}{\sqrt{(1-k_2'^2\omega^2)(1-k_2^2-k_2'^2\omega^2)}} = \int_0^{\omega} \frac{k_2'^2 d\omega}{\sqrt{(1-k_2^2)} \cdot \sqrt{(1-k_2'^2\omega^2)} \cdot \left(1 - \frac{k_2'^2\omega^2}{1-k_2^2}\right)}. \quad (2.38)$$

Учитывая, что  $k_2' = \sqrt{1-k_2^2}$ , имеем:



$$I = \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{\sqrt{(1-k_2'^2 \omega^2)(1-\omega^2)}} = F(\omega, k_2'). \quad (2.39)$$

Так как:

$$\omega = \frac{\sqrt{\tau^2 - 1}}{k_2' \cdot \tau} = \frac{\sqrt{\zeta^2 - k_2^2}}{k_2' \zeta},$$

равенство (2.39) запишем в виде:

$$I = F(\omega, k_2') = F\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - k_2^2}}{k_2' \zeta}, k_2'\right), \quad (2.40)$$

откуда:

$$F(\tau, k_2) = K(k_2) + F\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - k_2^2}}{k_2' \zeta}, k_2'\right). \quad (2.41)$$

Подставляя (2.41) в (2.36), получаем формулу для определения напора на участках 2–3 и 4–5:

$$h = H - \frac{H}{K'(k_2)} \cdot F\left(\frac{\sqrt{\xi^2 - k_2^2}}{k_2' \xi}, k_2'\right), \quad (2.42)$$

где  $\xi = k_1 \cdot sn(u_1, k_1)$  – на контурах 2–3 и 4–5;  $u_1 = \frac{2K(k_1)}{\delta_{шв}} \cdot |x| \cdot (m/2 \leq |x| \leq \delta_{шв}/2)$ .

Расход фильтрационного потока на участке 1–6 из (2.36) найдем, учитывая,  $\psi = q_\phi$ ,  $\zeta = \xi$ ,  $z = x$ , тогда:

$$q_\phi = \frac{k_{кол} \cdot H}{K'(k_2)} \{K(k_2) - F(\tau, k_2)\}. \quad (2.43)$$

где  $\tau = \frac{1}{k_2} \cdot \xi$ ,  $\xi = k_1 \cdot sn(u_1, k_1)$ .

Удельный расход фильтрации через шов облицовки находим из выражения (2.43):

$$\xi = -k_2, \quad q = q_\phi, \quad F(k_2, \tau) = F(-1, k_2) = -K(k_2),$$

$$q_\phi = \frac{2k_{кол} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot K(k_2), \quad (2.44)$$

или:

$$q_{\phi} = \frac{2k_{\text{кол}} \cdot H}{K(k_2')} \cdot K(k_2), \quad (2.45)$$

где  $k_2 = k_1 \cdot \operatorname{sn}\left(\frac{m \cdot K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1\right)$ ;  $\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} = \frac{\delta_{\text{шв}}}{2\delta_0} \rightarrow k_1$  по табл. 2 [54],  $H = h_0 + \delta_0$  – напор на облицовке;  $k_2' = \sqrt{1 - k_2^2}$  – дополнительный модуль эллиптического интеграла.

При ширине щели экрана из геомембраны  $m$ , близкой к нулю ( $m \rightarrow 0$ ), зависимость удельного расхода через шов или через щель экрана (2.45) с учетом [13]:

$K(k_2) \approx \frac{\pi}{2}$ ,  $K(k_2') \approx \ln \frac{4}{k_2}$  получит следующий вид:

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_0 + \delta_0)}{\ln(4/k_2)} \cdot K(k_2), \quad (2.46)$$

где  $k_2 = k_1 \cdot K(k_1) \cdot \frac{m}{\delta_{\text{шв}}}$  (при  $m < \delta_{\text{шв}}$ ).

При  $\delta_0/\delta_{\text{шв}} < 1,0$ , когда модуль эллиптического интеграла  $k_1 \rightarrow 1,0$ , можно записать:  $K(k_1) \approx \ln \frac{4}{k_1'}$ ,  $K(k_1') \approx \frac{\pi}{2}$ .

Тогда выражение для  $k_2$  (2.44) с учетом (2.43) и вырождения эллиптических функций в гиперболические [106, 118] получит вид:

$$k_2 = \operatorname{th}(\pi m / 4\delta_0). \quad (2.47)$$

Отсюда с учетом формул (2.51) и (2.50), получим зависимость расхода через закольматированный шов:

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_0 + \delta_0)}{\ln[4 \operatorname{cth}(\pi m / 4\delta_0)]}. \quad (2.48)$$

Данная зависимость соответствует  $m/\delta_{\text{шв}} \leq 0,01$ .

В случае, когда  $m/\delta_0 \leq 0,25$  выражение (2.48) упрощается:

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_0 + \delta_0)}{\ln(16\delta_0/\pi m)}. \quad (2.49)$$

Приравнивая  $m = \delta_{\text{шв}}$ , из выражений (2.28) и (2.31) получим модуль эллиптического интеграла  $k_2$ :

$$k_2 = k_1 \lim_{m \rightarrow \delta_{\text{шв}}} \operatorname{sn} \left\{ \frac{m \cdot K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1 \right\} = k_1 \operatorname{sn} \{K(k_1), k_1\} = k_1.$$

Откуда удельный фильтрационный расход через закольматированный шов облицовки из формулы (2.42) получит вид:

$$q_{\phi} = 2k_{\text{кол}} \cdot H \frac{K(k_1)}{K(k_1')}, \quad (2.50)$$

тогда согласно (2.28) найдем:  $q_{\phi} = k_{\text{кол}} \cdot \delta_{\text{шв}} \frac{H}{\delta_o}$ , что по виду аналогично формуле

Дарси при  $\omega_1 = \delta_{\text{шв}} \cdot 1$  и  $I = H/\delta_o$ .

Учитывая вышеизложенное, полученная формула удельного фильтрационного расхода через закольматированный шов (2.45) дает верные результаты, которая в предельном случае соответствует закону Дарси.

При  $\delta_o/\delta_{\text{шв}} > 1,0$ , когда модуль  $k_1 \rightarrow 0$ :

$$K(k_1) \approx \frac{\pi}{2}; \quad K(k_1') \approx \ln \frac{4}{k_1}.$$

С учетом этих соотношений после преобразований из (2.30) найдем:

$$k_2 = k_1 \cdot \sin \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}. \quad (2.51)$$

Модуль  $k_1$  из (2.28) будет равен:

$$k_1 = 4 \exp \left( -\frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} \right). \quad (2.52)$$

Отсюда зависимость для определения удельного фильтрационного расхода через закольматированный шов облицовки преобразуется к виду:

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_0 + \delta_o)}{\ln \left( \exp \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{\delta_{\text{шв}}} \right)}, \quad (2.53)$$

где  $k_{\text{кол}}$  – коэффициент фильтрации шва облицовки в кольматирующем слое, м/сут.

При больших значениях аргументов [118] для экспотенциальной функции, формула (2.53) получит вид:

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_0 + \delta_o)}{\text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}} \right)}. \quad (2.54)$$

Применяя формулу для  $k'_{\text{обл}}$ , найдем осредненный коэффициент фильтрации облицовки с учетом кольматации шва [61]:

$$k'_{\text{обл}} = \frac{Q_{\text{обл}} \cdot \delta_o}{(h_0 + \delta_o) \cdot F_o}, \quad (2.55)$$

где  $Q_{\text{обл}} = \sum_{i=1}^n q_{\phi} \cdot \bar{l}_{\text{шв}}$  – суммарный расход потерь воды через облицовку на площади  $F_o$ , м<sup>3</sup>/с.

Подставляя зависимость (2.45) в (2.55), найдем точную зависимость для расчета осредненного коэффициента фильтрации облицовки с закольматированными швами:

$$k'_{\text{обл}} = \frac{2k_{\text{кол}} \cdot \delta_o \cdot K(k_2) \cdot \bar{l}_{\text{шв}} \cdot n}{F_o \cdot K(k'_2)}, \quad (2.56)$$

где  $\bar{l}_{\text{шв}}$  – средняя длина шва (или экрана) облицовки, м;

$n$  – количество повреждений на участке облицовке мелиоративного канала.

Коэффициент фильтрации шва (при полном его кольматировании) определяем по зависимости:

$$k'_{\text{шв}} = \frac{q_{\text{шв}} \cdot \delta_o}{(h_0 + \delta_o) \cdot \delta_{\text{шв}}}. \quad (2.57)$$

Тогда учитывая зависимость (2.45) и подставляя ее в (2.57), получим расчетную зависимость коэффициента фильтрации шва в общем виде:

$$k'_{\text{шв}} = \frac{2k_{\text{кол}} \cdot \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k'_2)}, \quad (2.58)$$

$$\text{где } k_2 = \text{sn}\left(\frac{m \cdot K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1\right).$$

В случае малого раскрытия щели  $m$ , стремящейся к минимальному значению ( $m \rightarrow 0$ ), получим приближенные формулы [13]:

$$K(k_2) \approx \frac{\pi}{2}; \quad K(k'_2) \approx \ln \frac{4}{k_2}; \quad k_2 = k_1 \cdot \sin \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}} \approx k_1 \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}.$$

Модуль  $k_1$  находим из соотношения [66]:

$$\frac{\delta_{\text{шв}}}{2\delta_0} = \frac{K(k_1)}{K'(k_1)}. \quad (2.59)$$

Отсюда (2.58) записываем как:

$$k'_{\text{шв}} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot \delta_0}{\delta_{\text{шв}} \cdot \ln(4/k_2)}, \quad (2.60)$$

$$\text{где } k_2 = k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}.$$

Принимая зависимость для расхода фильтрации через шов (2.46), осредненный коэффициент фильтрации облицовки определяется по зависимости:

$$k'_{\text{обл}} = \pi k_{\text{кол}} \cdot \frac{\delta_0 \cdot \bar{l}_{\text{шв}} \cdot n}{F_0 \cdot \ln(16\delta_0/\pi m)}. \quad (2.61)$$

Применив производную от комплексного потенциала (2.33), можно найти скорости фильтрации и градиента напора:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dz} \cdot \nu_x - i\nu_y &= \frac{dW}{d\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dZ} = -i \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-k_2^2 \cdot \tau^2) \cdot (1-\tau^2)}} \cdot \frac{k_1}{k_2} \times \\ &\times \text{cn}\left\{\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} Z, k_1\right\} \cdot \text{dn}\left\{\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} Z, k_1\right\} \cdot \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Скорости фильтрации на границе 3–4 ( $z = x$ ) будут равны  $\nu_x = 0$ :

$$\nu_y = \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot \frac{k_1}{\sqrt{(1-k_2^2 \cdot \tau^2) \cdot (1-\tau^2)}} \cdot \text{cn}(u_1, k_1) \cdot \text{dn}(u_1, k_1) \cdot \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}. \quad (2.63)$$

$$\text{где } \tau = \frac{1}{k_2} \cdot \zeta, \quad \xi = k_1 \cdot \text{sn}(u_1, k_1), \quad u_1 = \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x.$$

Скорости фильтрации на границе 1–6 ( $z = x + i \cdot \delta_0$ );  $\nu_x = 0$ .

$$v_y = \frac{k_{\text{кол}} \cdot H}{K'(k_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{(k_2^2 \cdot \tau^2 - 1) \cdot (\tau^2 - 1)}} \cdot \frac{\text{dn}(u_1, k_1)}{\text{sn}^2(u_1, k_1)} \cdot \text{cn}(u_1, k_1) \cdot \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, \quad (2.64)$$

$$\text{где } \tau = \frac{1}{k_2} \cdot \zeta; \quad \xi = k_1 \cdot \frac{1}{\text{sn}(u_1, k_1)}; \quad u_1 = \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x.$$

Градиенты напора на границах 3–4 и 1–6 вычисляем по выражению (2.63) и (2.64), применяя зависимость вида:

$$I_y = \frac{v_y}{k_{\text{кол}}}. \quad (2.65)$$

Когда действительные градиенты напора будут больше допускаемых  $I_y > I_{\text{доп}}$  будут возникать фильтрационные деформации. Согласно З. Г. Тер-Мартirosяна допускаемые значения градиентов фильтрации изменяются в следующих пределах  $I_{\text{доп}} = 0,30 - 0,75$ .

Градиент напора на границе 3–4 (при  $z = x$ ) согласно (2.65) определяется по следующему выражению:

$$I_y = \frac{H}{K(k_2')} \cdot \frac{k_1}{\sqrt{(1 - k_2^2 \cdot \tau^2) \cdot (1 - \tau^2)}} \cdot \text{cn}(H_1, k_1) \cdot \text{dn}(H_1, k_1) \cdot \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}. \quad (2.66)$$

$$\text{где } \tau = \frac{1}{k_2} \cdot \zeta, \quad \xi = k_1 \cdot \text{sn}(u_1, k_1), \quad u_1 = \frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x, \quad u_2 = k_1 \cdot \text{sn}\left(\frac{m \cdot K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1\right).$$

Модуль  $k_1$  определяется из соотношения:  $\frac{K(k_1)}{K(k_1')} = \frac{\delta_{\text{шв}}}{2\delta_o}$ , с использованием справочных таблиц эллиптических интегралов при малых  $k_1$  [66].

При малом  $m$  модуль  $k_2$  вычисляется по формуле:

$$k_2 = k_1 \cdot K(k_1) \cdot \frac{m}{\delta_{\text{шв}}}, \quad (2.67)$$

при  $m < \delta_{\text{шв}}$ , модуль  $k_2'$  определяем по выражению:

$$k_2' = \sqrt{1 - k_2^2}.$$

При  $\delta_o / \delta_{\text{шв}} > 1,0$  модуль  $k_1$  стремится к нулю ( $k_1 \rightarrow 0$ ), тогда запишем [13]:

$$k_2 = k_1 \cdot \sin \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}} = k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}; \quad k_1 = 4 \exp\left(-\frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}}\right);$$

$$\zeta = k_1 \cdot \text{sn}(u_1, k_1) = k_1 \cdot \text{sn}\left(\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x, k_1\right) \approx k_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{\delta_{\text{шв}}}\right);$$

$$\text{cn}(u_1, k_1) = \text{cn}\left(\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x, k_1\right) \approx \cos\left(\frac{\pi}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x\right);$$

$$\text{dn}(u_1, k_1) = \text{dn}\left(\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x, k_1\right) \approx 1; \quad K(k_1) \approx \frac{\pi}{2}; \quad k_2 = k_1 \frac{\pi \cdot \delta_0}{2\delta_{\text{шв}}};$$

$$k_2' = \sqrt{1 - k_2^2} = \sqrt{1 - \left(k_1 \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)^2};$$

при  $k_2' \rightarrow 1$ ,  $K(k_2') \approx \ln(4/k_2) = \ln\left[4 / \left(k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)\right]$ .

При модуле  $k_1 \rightarrow 0$  зависимость для градиента напора (2.68) имеет вид:

$$I_y = \frac{H}{\ln\left[4 / \left(k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)\right]} \cdot \frac{k_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x\right) \cdot \frac{\pi}{\delta_{\text{шв}}}}{\sqrt{\left[1 - \left(k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\zeta}{k_2}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{\zeta}{k_2}\right)^2\right]}}, \quad (2.68)$$

где  $\zeta = k_1 \cdot \text{sn}(u_1, k_1) = k_1 \cdot \text{sn}\left[\frac{2K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}} \cdot x, k_1\right] \approx k_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{\delta_{\text{шв}}}\right) \approx k_1 \cdot \frac{\pi x}{\delta_{\text{шв}}}$ ;  $k_2 \approx k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}$ .

С учетом некоторых преобразований из выражения (2.68) получаем окончательную формулу для определения градиента напора  $I_y$ :

$$I_y = \frac{H}{\ln\left[4 / \left(k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)\right]} \cdot \frac{k_1 \cdot \cos\frac{\pi x}{\delta_{\text{шв}}} \cdot \frac{\pi}{\delta_{\text{шв}}}}{\sqrt{\left[1 - \left(k_1 \cdot \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{2x}{m}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{2x}{m}\right)^2\right]}}. \quad (2.69)$$

При отношении  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} < 10$ , следует учитывать водопроницаемость грунтового основания. Тогда напор в щели экрана из геомембраны будет равен  $H = H_1 - H_2 = h_0 + \delta_0 - h_1$ .



В этом случае схема к расчету водопроницаемости области фильтрации представляет две зоны (рис. 2.15): 1-я зона – область фильтрации с кольматацией шва [95], а 2-я зона – область свободного растекания фильтрационного потока в грунтовом основании.

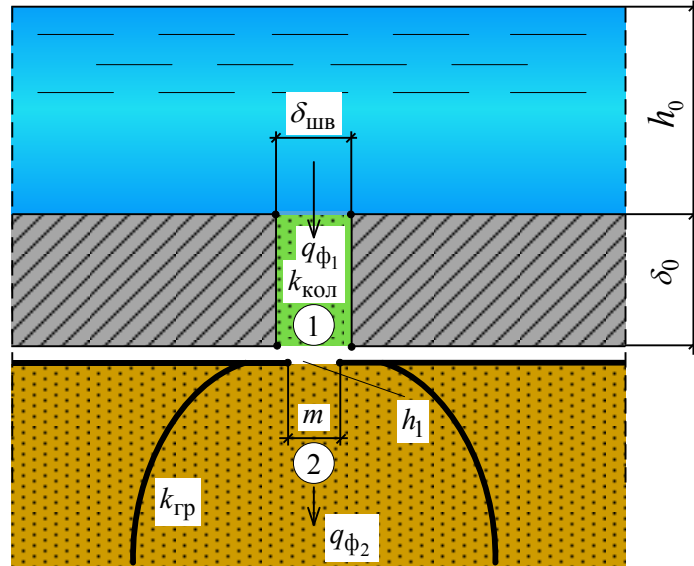


Рисунок 2.15 – Схема к расчету водопроницаемости закольматированного шва облицовки с защитным покрытием из бетона при  $k_{гр}/k_{кол} < 10$

Для 1-й зоны расчетные зависимости будут аналогичны ранее полученному решению с учетом пьезометрического напора в щели  $h_1$ .

Расчетные зависимости удельного расхода фильтрации через закольматированный шов будут равны:

– наиболее точная формула:

$$q_{\phi_1} = \frac{2k_{кол} \cdot (h_0 + \delta_0 - h_1)}{K(k_2)} \cdot K(k_2). \quad (2.70)$$

– приближенная формула (при  $m/\delta_0 \leq 0,25$ ):

$$q_{\phi_1} = \frac{\pi k_{кол} \cdot (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(16\delta_0/\pi m)}. \quad (2.71)$$

Пьезометрический напор в щели экрана  $h_1$  определяем по уравнению неразрывности потока, т.е. равенства фильтрационных расходов 1-й и 2-й зонах:

$$q_{\phi_1} = q_{\phi_2}. \quad (2.72)$$

Расход фильтрации для 1-й зоны находим по зависимостям (2.70) или (2.71), а для расхода 2-й зоны используем решением [61]:

$$q_{\Phi_2} = \frac{\pi k_{\text{кол}} \cdot (h_1 + H_k)}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})}, \quad (2.73)$$

где  $\alpha$  – параметр, вычисляемый из соотношения  $m/(h_1 + H_k) = F(\alpha)$ .

Функция  $F_1(\alpha)$  дана в табличном виде [53].

Приравнявая согласно равенства (2.72) выражения (2.70) и (2.73), откуда найдем:

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0) \cdot \beta + \pi \cdot \sigma \cdot H_k}{\beta + \pi \cdot \sigma}, \quad (2.74)$$

где  $\beta = 2 \frac{K(k_2)}{K(k_2')} \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})$ ;  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}}$ .

Используя равенства (2.72) приближенную зависимость (2.71), найдем другую зависимость для напора  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) - \sigma \cdot H_k \cdot \ln(16\delta_0/\pi m)}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) + \sigma \cdot \ln(16\delta_0/\pi m)}. \quad (2.75)$$

Для сравнения полученных результатов при  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} \geq 10$ , приведем пример расчета:  $h_0 = 3,0$  м,  $\delta_0 = 0,10$  м,  $\delta_{\text{шв}} = 0,05$  м,  $m = 0,005$  м,  $k_{\text{кол}} = 0,1$  м/сут,  $k_{\text{гр}} = 1,0$  м/сут.

Так как в формуле для фильтрационного расхода (2.45), полученной в точной постановке задачи, используются полные эллиптические интегралы, рассмотрим их определение.

Сначала находим модуль эллиптического интеграла  $k_1$  из выражения (2.28):

$\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} = \frac{\delta_{\text{шв}}}{2\delta_0}$ , которое после расчета с учетом исходных данных дает:

$\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} = \frac{0,05}{2 \cdot 0,10} = 0,25$ . Затем по справочной таблице [66] с помощью интерполяции

устанавливаем модуль  $k_1$ , который по таблице эллиптических интегралов будет равен  $k_1 = 0,010$ .

Далее вычисляем модуль  $k_2$  по выражению (2.31) с учетом преобразования его при малом значении  $k_1$ :

$$k_2 = k_1 \cdot \operatorname{sn}\left(\frac{mK(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1\right) = k_1 \cdot \sin \frac{\pi m}{2\delta_{\text{шв}}} = 0,10 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05} = 0,00157.$$

Тогда отношение эллиптических интегралов при модуле  $k_2 = 0,00157$  по таблице [66] составит:  $\frac{K(k_2)}{K'(k_2)} = 0,197$ .

Затем подставляя найденное отношение эллиптических интегралов в формулу расхода (2.49), получим:

$$q_{\text{ф}} = 2k_{\text{кол}} \cdot H \cdot \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} = 2 \cdot 0,10 \cdot (3 + 0,1) \cdot 0,197 = 0,122 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Теперь выполним расчеты по приближенным формулам расхода через закольматированный шов (2.45), (2.49), (2.53), (2.54).

Результаты даны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета удельных фильтрационных расходов закольматированного шва по полученным зависимостям в сравнении с другими авторами

Удельный фильтрационный расход через шов, м <sup>2</sup> /сут, по формулам					
Автора (2.45) – точной	Автора (2.46)	Автора (2.53)	Автора (2.54)	Автора (2.49)	Недриги В. П.
<u>0,122</u>	<u>0,124</u>	<u>0,119</u>	<u>0,120</u>	<u>0,211</u>	<u>0,145</u>
–	– 1,6	0,8	1,6	– 72,3	– 18,9
Примечание: в числителе приведены удельные расходы, м <sup>2</sup> /сут.; в знаменателе – отклонение значений от точной формулы авторов, %.					

На основании сравнения результатов определения удельных фильтрационных расходов через закольматированный шов можно отметить, что полученные приближенные формулы (2.46), (2.53) и (2.54) дают близкие значения с точной формулой (2.45). Однако другая формула (2.49) показывает значительное расхождение с точной. Расчет по формуле В. П. Недриги [75] дает расхождение до 19 %,

В таблице 2.3 приведено сравнение коэффициента водопроницаемости шва и градиентов напора в основании шва.

Таблица 2.3 – Результаты вычислений коэффициента водопроницаемости закольматированного шва и градиента напора в его основании

Коэффициент водопроницаемости закольматированного шва, см/с, по формулам			Градиент напора в основании шва при $k_{\text{кол}}/k_{\text{гр}}$		
Автора (2.58) при $\bar{l}_{\text{шв}} = 1,0$ м $L_{\text{шв}} = 2,0$ м	Автора (2.58) при $\bar{l}_{\text{шв}} = 5,0$ м $L_{\text{шв}} = 4,0$ м	Натурные данные ультразвуковых исследований А. Г. Алимова [10]	Автора (2.69) при $x = 0$	Автора (2.69) при $x = m/2$	Критический градиент $I_{\text{кр}}$ по СП 100.13330.2016 [101]
$1,14 \cdot 10^{-7}$	$\frac{2,85 \cdot 10^{-6}}{-}$	$\frac{2,97 \cdot 10^{-6}}{4,2 \%}$	$\frac{0,248}{0,0248}$	$\frac{0,249}{0,0249}$	0,320
Примечание: градиент напора в числителе получен при $k_{\text{кол}} = 0,1$ м/сут, а в знаменателе – при $k_{\text{гр}} = 1,0$ м/сут.					

Анализ результатов расчета показывает, что коэффициент водопроницаемости шва близко совпадает со средним значением по исследованиям А. Г. Алимова [10], проведенных на ультразвуковых приборах на магистральном канале Городищенской ОС Волгоградской области.

Значения градиентов напора в основании шва не превышают допускаемых критических значений для мелкого песка. Для случая при  $k_{\text{гр}} = 1,0$  м/сут для песчаных грунтов основания облицовки градиенты напора будут значительно меньше допускаемых критических практически больше чем на порядок, что гарантирует отсутствие в них неблагоприятных фильтрационных деформаций в виде суффозии [101].

#### 2.4 Особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами с учетом проницаемости основания

При длительном использовании каналов с облицовками наблюдается разрушение герметика швов на основе цементного и битумного вяжущего, что требует проведения естественной или искусственной кольматации, которые переносятся мелким потоком воды в каналах. Естественная кольматация происходит

длительное количество времени в зависимости от мутности воды, и может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет [11, 16]. При искусственной кольматации русел происходит более интенсивно в течение нескольких недель [44].

С целью повышения КПД каналов в бетонной облицовке, где наиболее слабым звеном являются швы с битумно-полимерным герметиком, которые часто разрушаются через 5–7 лет, предусматриваются периодически текущий и капитальный ремонт. Поэтому большой проблемой здесь являются разработка надежных герметиков швов, которые бы отличались высокой долговечностью и сравнительно небольшой стоимостью.

Применение бетонопленочных облицовок позволило создавать покрытия с пленочным полиэтиленовым экраном. За счет создания таких конструкций облицовок, удалось значительно снизить потери на фильтрацию.

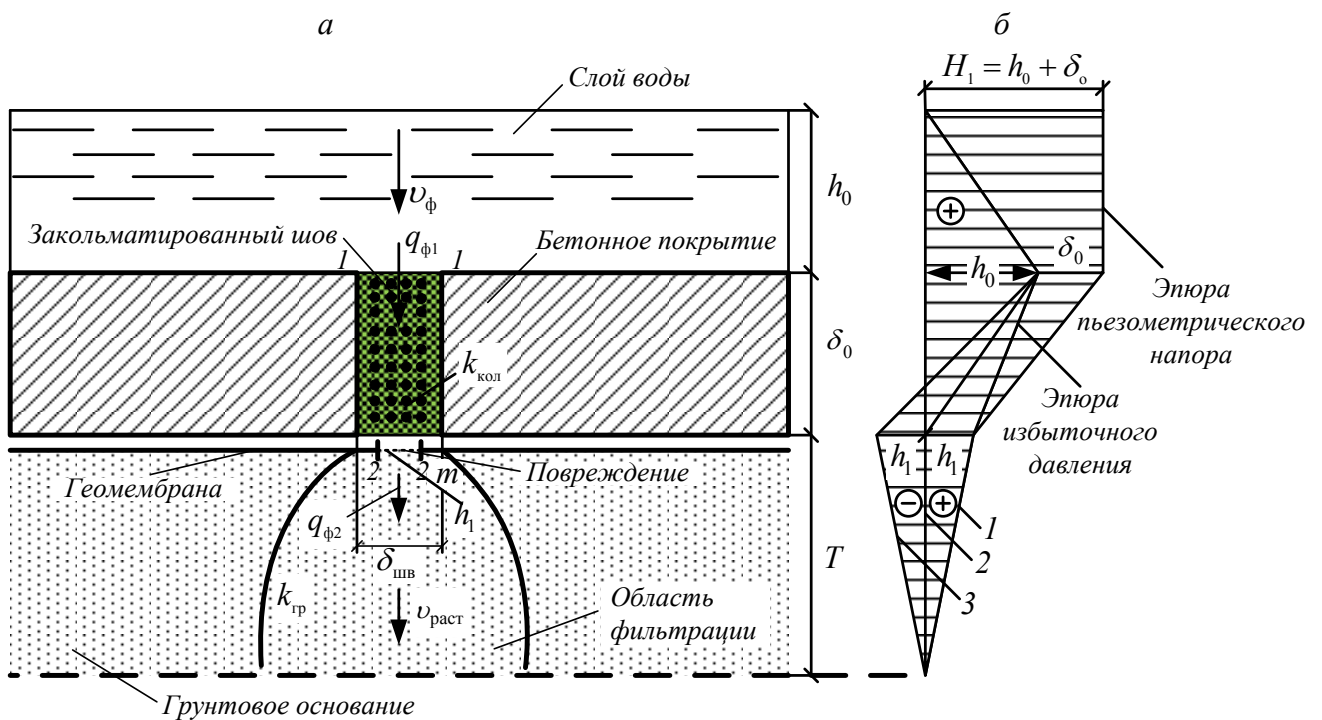
Тем не менее, недостатком бетонопленочных облицовок остается вероятность повреждений пленки, которая снижает противофильтрационный эффект бетонного покрытия.

Натурными обследованиями бетонопленочных облицовок занимались многие специалисты и ученые: А. Г. Алимов [7], Ю. М. Косиченко [50, 56, 61, 64], А. В. Ищенко [43], А. Р. Гвенетадзе [34], И. М. Елшин [40], В. А. Олехнович и А. Ф. Пузанов [77], В. Б. Резник [96], П. А. Сухоруков и С. Н. Ворошнов [26], Г. В. Абелишвили, М. В. Разумовская [4] и другие. Исследования водопроницаемости облицовок обычно осуществлялись на натуральных каналах методом точечных фильтромеров и изолированных отсеков или путем математических и эмпирических формул [12, 43].

Исследованиями Ф. И. Пикалова, Т. А. Неговской, М. Г. Калтаговой, Т. В. Бурчак [21], Я. А. Пустыльникова [93] было установлено, что для песчаных грунтов в процессе их естественной или искусственной кольматации образовывалась илистая пленка, которая способствовала появлению отрицательного избыточного давления (вакуума). Однако, дальнейшее изучение этих вопросов требует исследований особенностей фильтрации через бетонопленочные облицовки с учетом положительного и отрицательного давления при кольматировании швов.

Целью проведенных исследований является изучение особенностей фильтрации через закоматированный шов облицовки в двухслойной среде. Верхний слой включает грунтовый закоматированный экран, а нижний состоит из грунтового основания, в которых могут формироваться различные эпюры избыточного давления.

На рисунке 2.16 представлена расчетная модель водопроницаемости закоматированного шва облицовки, в том числе приведены эпюры пьезометрического напора и избыточного давления, которые образуются в закоматированном шве и основании облицовки.



*a* – схема облицовки; *б* – эпюры пьезометрического и избыточного давления;  
 1 – эпюра избыточного давления с положительным знаком и полным насыщением пор водой при  $\sigma < \sigma_{гр}$ ; 2 – эпюра избыточного давления переходная при  $\sigma = \sigma_{гр}$ ; 3 – эпюра избыточного давления с отрицательным знаком и неполным насыщением пор при  $\sigma > \sigma_{гр}$

Рисунок 2.16 – Фильтрационная модель водопроницаемости закоматированного шва облицовки мелиоративного канала

Так, на модели водопроницаемости швов имеют место три различных эпюры: с положительным, нулевым и отрицательным знаком избыточного давления.

Особенность фильтрации через закоматированный шов бетонопленочной облицовки обусловлена ее конструкцией. Гидроизоляция деформационных швов осуществляется только для закрытия шва наиболее дешевым цементно-песчаным

составом, который через 5–10 лет разрушается. Вследствие этого происходит оголение противofильтрационного экрана. Поэтому возможны механические повреждения экрана.

Фильтрация через бетоноплочную облицовку может происходить локально только в местах разрушенных и закольматированных швов (рисунок 2.16,а) через область закольматированного слоя с коэффициентом фильтрации ( $k_{\text{кол}}$ ). Далее фильтрационный поток движется к повреждению экрана и через него поступает в грунт основания с коэффициентом ( $k_{\text{гр}}$ ), где образуется область безнапорной фильтрации с формированием купола депрессии.

С целью изучения особенностей фильтрации [59] в закольматированном шве облицовки используем аналитический метод, который основывается на ранее полученном решении.

Последовательность исследований на фильтрационной модели закольматированного шва при  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} \geq \sigma_{\text{гр}}$  и  $h_1 \geq 0$  следующая:  $\sigma < \sigma_{\text{гр}}$  ( $h_1 > 0$ ) – эпюра 1;  $\sigma = \sigma_{\text{гр}}$  ( $h_1 = 0$ ) – эпюра 2;  $\sigma > \sigma_{\text{гр}}$  ( $h_1 < 0$ ) – эпюра 3.

Исходя из полученной зависимости (2.75), вычисляется пьезометрический напор на границе закольматированного слоя в шве и основании  $h_1$ . Затем рассчитываем расход фильтрации через закольматированный шов  $q_{\text{ф}}$  по приближенной формуле (2.71). Определяем скорость фильтрации через закольматированный шов  $v_{\text{шв}}$  по формуле (2.63). Находим среднюю скорость растекания фильтрационного потока в грунте основания  $v_{\text{раст}}$  по формуле (2.90).

По результатам проведенных вычислений сравниваются значения скорости растекания  $v_{\text{раст}}$  и коэффициента фильтрации грунта  $k_{\text{гр}}$ , а также пьезометрического напора в шве  $h_1$  и делаются выводы (при  $k_{\text{гр}} > v_{\text{раст}}$  и  $h_1 > 0$  – наблюдается фильтрация через шов с полным насыщением пор; при  $k_{\text{гр}} = v_{\text{раст}}$  и  $h_1 = 0$  – наблюдается граница перехода от полного насыщения к неполному; при  $k_{\text{гр}} < v_{\text{раст}}$  и  $h_1 < 0$  – неполное насыщение грунта основания).

Анализ исследований двухслойной толщи, проведенных П. Я. Полубариновой-Кочиной [90], Т. В. Бурчак [21], Я. А. Пустыльниковым [93] показал, что когда верхний слой малопроницаемый, а нижний более проницаемый с  $k_{\text{кол}} < k_{\text{гр}}$ , устанавливаются три типа эпюр избыточного давления (см. рис. 2.16, б) в зависимости от соотношения коэффициента фильтрации грунта основания ( $k_{\text{гр}}$ ) и коэффициента фильтрации в закольматированном слое ( $k_{\text{кол}}$ ), т. е.  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} : 1$  – при  $\sigma < \sigma_{\text{гр}}$ , где  $h_1 > 0$ ; 2 – при  $\sigma = \sigma_{\text{гр}}$ , где  $h_1 = 0$ ; 3 – при  $\sigma > \sigma_{\text{гр}}$ , где  $h_1 < 0$  (здесь  $\sigma_{\text{гр}}$  – граничное значение отношений коэффициентов фильтрации при переходе от полного насыщения пор грунта водой к неполному).

При  $\sigma < \sigma_{\text{гр}}$  избыточное давление положительно, в основании будет наблюдаться полное насыщение пор водой, а при равенстве  $\sigma = \sigma_{\text{гр}}$  – эпюра избыточного давления в основании падает до нуля. При  $\sigma > \sigma_{\text{гр}}$  при наличии малопроницаемого закольматированного слоя в шве облицовки будет наблюдаться эпюра с отрицательным избыточным давлением (вакуумом), где движение фильтрационного потока будет с неполным заполнением пор.

В соответствии с фильтрационной моделью (см. рисунок 2.16) приведем расчетные зависимости удельного расхода через закольматированный шов для 1-й зоны, а в подстилающем основании – для 2-й зоны.

Фильтрационный расход для 1-й зоны вычисляем по зависимости [61]:

$$q_{\text{ф1}} = \frac{2k_{\text{кол}}(h_0 + \delta_0 - h_1)}{K'(k_2)} \cdot K(k_2) \cdot l_{\text{шв}}, \quad (2.76)$$

где  $k_{\text{кол}}$  – коэффициент фильтрации при кольматации шва, м/сут;

$h_0$  – глубина воды, м;

$\delta_0$  – толщина облицовки, м;

$h_1$  – напор на границе зоны кольматации в шве и основании 2–2, м;

$K(k_2)$ ,  $K'(k_2)$  – полные эллиптические интегралы 1-го рода;

$l_{\text{шв}}$  – длина шва, м.



Расчетная схема для вычисления напора в щели экрана из геомембраны при  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} \leq 10$  представлена на рисунке 2.16.

Для случая, когда  $T > h_0 + \delta_0$ , считаем, что  $T \rightarrow \infty$ .

Для 2-й зоны расход находим по зависимости Ю. М. Косиченко [63]:

$$q_{\Phi_2} = \frac{\pi k_{\text{гр}} (h_1 + H_{\text{к}}) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1})}. \quad (2.77)$$

Заменим формулу (2.76) на приближенные зависимости [61]:

$$q_{\Phi_1} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_0 - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\ln(4/k_2)}, \quad (2.78)$$

где  $k_2 = k_1 \cdot \text{sn}\left(\frac{m \cdot K(k_1)}{\delta_{\text{шв}}}, k_1\right)$ ;  $k_2, k_1$  – модули эллиптических интегралов;

$\text{sn}(z)$  – эллиптический синус;

$\delta_{\text{шв}}$  – ширина шва, м.

При  $k_1 \rightarrow \infty$  формула для модуля эллиптического интеграла  $k_2$  упрощается и записывается, как:

$$k_2 = k_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right). \quad (2.79)$$

Модуль  $k_1$  находим из равенства:

$$\frac{\delta_{\text{шв}}}{2 \cdot \delta_0} = \frac{K(k_1)}{K'(k_1)}. \quad (2.80)$$

Тогда формула (2.78) приобретает вид [61]:

$$q_{\Phi_1} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_0 - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\ln\left[4 / k_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)\right]}. \quad (2.81)$$

При малых значениях ширины щели  $m \rightarrow 0$ :

$$q_{\Phi_1} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln\left[4 / k_1 \cdot \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right]}. \quad (2.82)$$

При  $\delta_0/\delta_{\text{шв}} > 1,0$  формулу (2.82) заменяем на приближенную зависимость:

$$q_{\phi_1} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\ln \left[ \exp \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \left( \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right) \right]}. \quad (2.83)$$

Учитывая обратные представления экспоненциальной и логарифмической функции для больших аргументов формула (2.83) получит вид:

$$q_{\phi_1} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left[ \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \left( \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right) \right]}. \quad (2.84)$$

Далее, используем равенство уравнений (2.84) и (2.77) при  $q_{\phi_1} = q_{\phi_2}$  найдем неизвестный параметр ( $h_1$ ) из уравнения:

$$\frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o - h_1)}{\text{Arsh} \left[ \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \left( \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right) \right]} = \frac{\pi k_{\text{гр}} (h_1 + H_{\text{к}})}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1})}. \quad (2.85)$$

После проведенных преобразований в уравнении (2.85) найдем:

$$\begin{aligned} & \pi \cdot k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) - \pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right) = \\ & = h_1 \cdot \pi \cdot k_{\text{кол}} \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) + h_1 \cdot \pi \cdot k_{\text{кол}} \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right). \end{aligned}$$

Откуда расчетная зависимость для определения параметра  $h_1$  будет:

$$h_1 = \frac{\pi \cdot k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) - \pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)}{\pi \cdot k_{\text{кол}} \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) + \pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)}. \quad (2.86)$$

Проведя сокращения в последнем уравнении и обозначив через  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}}$ , запишем выражение для параметра  $h_1$  в виде:

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_o) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) - \sigma \cdot H_{\text{к}} \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) + \sigma \cdot \text{Arsh} \left( \text{ch} \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)}, \quad (2.87)$$

где  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}}$ .

При вычислении средней скорости фильтрации в закольматированном шве ( $v_{\text{шв}}$ , м/с) используем следующую зависимость:

$$v_{\text{шв}} = \frac{q_{\text{ф}}}{\delta_{\text{шв}} \cdot l_{\text{шв}}}, \quad (2.88)$$

Тогда среднюю скорость вертикальной фильтрации получим исходя из средней ширины зоны растекания потока ( $\bar{B}_{\text{раст}}$ , м) аналогично формуле Н. Н. Павловского [6, 45, 82] для канала или Ю. М. Косиченко для плоской щели в пленочном экране [63]:

$$\bar{B}_{\text{раст}} = \beta \cdot (h_0 + \delta_o + H_{\text{к}}), \quad (2.89)$$

где  $\beta$  – коэффициент растекания,  $\beta = 0,01 - 1,5$ ;

$H_{\text{к}}$  – капиллярный вакуум грунта, м.

При этом среднюю скорость фильтрации в грунте основания определяем приближенно, как:

$$v_{\text{раст}} = \frac{q_{\text{ф}}}{\bar{B}_{\text{раст}} \cdot l_{\text{шв}}}, \quad (2.90)$$

где  $\bar{B}_{\text{раст}}$  – средняя ширина зоны растекания, м, определяемая по формуле (2.28).

Для согласования указанных трех типов эпюр избыточного давления проведем расчеты по зависимостям (2.76)–(2.90) по исходным данным приведенным ниже:

а)  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} < 2,5$ ;  $h_1 > 0$ ;

б)  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} = 2,5$ ;  $h_1 = 0$ ;

в)  $k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} > 2,5$ ;  $h_1 < 0$ .

Исходные данные:  $h_0 = 3,0$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $\delta_{\text{шв}} = 0,05$  м;  $m = 0,005$  м;  $k_{\text{кол}} = 1,0; 0,4; 0,1$  м/сут;  $k_{\text{гр}} = 1,0$  м/сут,  $H_{\text{к}} = 0,5$  м;  $\alpha = 1,005$ ;  $l_{\text{шв}} = 1,0$  м.

а) Случай 1 при  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} = 1 < 2,5$ , ( $h_1 > 0$ ):

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0) \cdot \operatorname{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) - \sigma \cdot H_k \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)}{\operatorname{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) + \sigma \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)} =$$

$$= \frac{(3,0 + 0,1) \cdot \operatorname{Arsh}(1/\sqrt{1,005-1}) - 1 \cdot 0,5 \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05}\right)}{\operatorname{Arsh}(1/\sqrt{1,005-1}) + 1 \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05}\right)} =$$

$$= \frac{6,293}{11,475} = 0,548 \text{ м};$$

$$q_\phi = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_0 - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 1,0 \cdot (3,0 + 0,1 - 0,548) \cdot 1,0}{\operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05}\right)} = 0,985 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$v_{\text{шв}} = \frac{q_\phi}{\delta_{\text{шв}} \cdot l_{\text{шв}}} = \frac{0,985}{0,05 \cdot 1,0} = 19,7 \text{ м/сут};$$

$$v_{\text{раст}} = \frac{q_\phi}{\bar{B}_{\text{раст}} \cdot l_{\text{шв}}} = \frac{0,985}{3,6 \cdot 1,0} = 0,274 \text{ м/сут};$$

где  $\bar{B}_{\text{раст}} = \beta \cdot (h_0 + \delta_0 + H_k) = 1,0 \cdot (3,0 + 0,1 + 0,5) = 3,6 \text{ м}$ .

Исходя из проведенных расчетов следует, что  $k_{\text{гр}} > v_{\text{раст}}$ , ( $1,0 > 0,274 \text{ м/сут}$ ),  $h_1 = 0,548$ , т. е. в этом случае фильтрация через закольматированный шов будет проходить с полным насыщением пор грунта основания водой.

б) Случай 2 при  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} = 1/4 = 2,5$ , ( $h_1 = 0$ ):

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0) \cdot \operatorname{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) - \sigma \cdot H_k \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)}{\operatorname{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) + \sigma \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}}\right)} =$$

$$= \frac{(3,0 + 0,1) \cdot \operatorname{Arsh}(1/\sqrt{1,005-1}) - 2,5 \cdot 0,5 \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05}\right)}{\operatorname{Arsh}(1/\sqrt{1,005-1}) + 2,5 \cdot \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05}\right)} =$$

$$= \frac{0,198}{23,67} = 0,0084 \approx 0 \text{ м};$$

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,4 \cdot (3,0 + 0,1 - 0) \cdot 1,0}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05} \right)} = 0,478 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$v_{\text{шв}} = \frac{q_{\phi}}{\delta_{\text{шв}} \cdot l_{\text{шв}}} = \frac{0,478}{0,05 \cdot 1,0} = 9,57 \text{ м/сут};$$

$$v_{\text{раст}} = \frac{q_{\phi}}{\beta \cdot (h_0 + \delta_o + H_{\kappa})} = \frac{0,478}{0,13 \cdot (3,0 + 0,1 + 0,5)} = 1,02 \text{ м/сут}.$$

В результате выполненных расчетов следует, что  $k_{\text{гр}} = v_{\text{раст}}$ , ( $1,0 \approx 1,02$  м/сут),  $h_1 = 0$ , т. е. в этом случае будет наблюдаться фильтрация грунта основания с полным насыщением водой.

в) Случай 3 при  $\sigma = k_{\text{гр}}/k_{\text{кол}} = 1,0/0,1 = 10 > 2,5$ , ( $h_1 < 0$ ):

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_o) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) - \sigma \cdot H_{\kappa} \cdot \text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha - 1}) + \sigma \cdot \text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)} =$$

$$= \frac{(3,0 + 0,1) \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{1,005 - 1}) - 10 \cdot 0,5 \cdot \text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05} \right)}{\text{Arsh}(1/\sqrt{1,005 - 1}) + 10 \cdot \text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05} \right)} =$$

$$= \frac{-30,297}{84,66} = -0,358 \text{ м};$$

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \delta_o}{\delta_{\text{шв}}} / \sin \frac{\pi m}{2 \cdot \delta_{\text{шв}}} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (3,0 + 0,1 + 0,358) \cdot 1,0}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 0,1}{0,05} / \sin \frac{3,14 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,05} \right)} = 0,134 \text{ м}^3/\text{сут}$$

$$v_{\text{шв}} = \frac{q_{\phi}}{\delta_{\text{шв}} \cdot l_{\text{шв}}} = \frac{0,134}{0,05 \cdot 1,0} = 2,67 \text{ м/сут};$$

$$v_{\text{раст}} = \frac{q_{\phi}}{\beta \cdot (h_0 + \delta_o + H_{\kappa})} = \frac{0,134}{0,13 \cdot (3,0 + 0,1 + 0,5)} = 2,48 \text{ м/сут}.$$

По результатам проведенных вычислений найдем, что  $k_{\text{гр}} < v_{\text{раст}}$ , ( $1,0 < 2,48$  м/сут),  $h_1 = -0,358$  м, т. е. в этом случае происходит движение филь-

трационного потока с неполным насыщением и отрицательным давлением (вакуумом) под облицовкой.

Результаты вычислений характеристик водопроницаемости для заданных параметров бетонопленочной облицовки при  $\sigma = k_{гр}/k_{кол}$  от 1,0 до 10,0.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов водопроницаемости закольматированных швов бетонопленочной облицовки

Расчетный случай, $\sigma$	Исходные данные			Расчетные данные				Сравнение характеристик		Характер фильтрации в грунте
	$k_{кол}$ , м/сут	$k_{гр}$ , м/сут	$k_{гр}/k_{кол}$	$h_1$ , м	$q_{ф}$ , м/сут	$v_{шв}$ , м/сут	$v_{раст}$ , м/сут	$h_1 \approx 0$	$k_{гр} \approx v_{раст}$	
$\sigma < 2,5$	1,0	1,0	1,0	0,584	0,985	19,7	0,274	$h_1 > 0$	$k_{гр} > v_{раст}$	С полным насыщением пор
$\sigma = 2,5$	0,4		2,5	0	0,478	9,57	1,02	$h_1 = 0$	$k_{гр} = v_{раст}$	Граница перехода к неполному насыщению
$\sigma > 2,5$	0,1		10,0	– 0,358	0,134	2,67	2,48	$h_1 < 0$	$k_{гр} < v_{раст}$	С неполным насыщением пор

Представленные в таблице 2.4 варианты показывают, что возможны три случая с отношением коэффициентов фильтрации  $\sigma = k_{гр}/k_{кол} < 2,5$ ; 0;  $> 2,5$ , при которых пьезометрический напор в основании на границе 2–2 –  $h_1$  будет следующим:  $h_1 > 0$ ,  $h_1 = 0$ ,  $h_1 < 0$ . При этом расход фильтрационного потока через шов облицовки снижается от максимального значения (при  $h_1 > 0$ ) до некоторого минимального значения (при  $h_1 < 0$ ), когда наблюдается вакуум. Данные особенности фильтрации полностью соответствуют ранее установленным результатам фильтрации для двухслойных и трехслойных сред.

Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Анализ выполненных исследований и экспериментов свидетельствует, что при движении фильтрационного потока через закольматированный шов облицовки характерны три случая: при отношении коэффициентов фильтрации  $\sigma < 2,5$ ,

когда эпюра избыточного давления во всем диапазоне положительна; при  $\sigma=2,5$ , когда эпюра давления выше подошвы облицовки положительна, а ниже под облицовкой нулевая; при  $\sigma>2,5$ , когда эпюра давления в закольматированном шве, переходит от положительного к отрицательному значению, что обусловлено появлением на границе 2–2 подошвы кольматирующего слоя и основания вакуума.

2. При переходе режимов фильтрации с положительной эпюрой давления к отрицательной эпюре за критерий следует принять параметр  $\sigma=k_{гр}/k_{кол}$  с граничным значением, составляющим  $\sigma_{гр}=2,5$ .

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Получены расчетные формулы для определения водопроницаемости трещин в бетонных облицовках каналов мелиоративных систем при истечении в атмосферу. Разработана гидравлическая модель водопроницаемости бетонной облицовки при наличии трещин и негерметичных (разрушенных) швов.

2. При использовании метода конформных отображений решена задача водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации каналов, из которой получены расчетные формулы для ряда практически важных частных случаев. По результатам проведенных расчетов водопроницаемости трещин и швов в програмном комплексе «Matchad» автором построены номограммы, которые облегчают дальнейшие расчеты.

3. Проведены исследования и установлены особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки мелиоративного канала с закольматированными швами с учетом проницаемости основания, где характерны три случая формирования эпюры избыточного давления в условиях двухслойной среды: с полным и неполным насыщением грунта водой, а также при наличии вакуума. При этом выявлено критическое значение отношения коэффициентов фильтрации в закольматированном шве и в основании  $\sigma=k_{гр}/k_{кол}=2,5$ , при котором будет происходить переход от полного насыщения к неполному насыщению грунта основания.

4. На основании изучения изменения скорости растекания фильтрационного потока под деформационным швом по сравнению с коэффициентом фильтрации грунта основания установлено, что при  $\sigma < 2,5 - k_{гр} > v_{раст}$  ( $1,0 > 0,274$  м/сут), при  $\sigma = 2,5 - k_{гр} = v_{раст}$  ( $1,0 \cong 1,02$  м/сут), при  $\sigma > 2,5 - k_{гр} < v_{раст}$  ( $1,0 < 2,48$  м/сут). Полученные результаты расчетов подтверждают характер фильтрации в грунте основания под швом: при  $\sigma < 2,5$  – с полным насыщением пор, при  $\sigma = 2,5$  – переход от полного насыщения грунта к неполному, при  $\sigma > 2,5$  – с неполным насыщением грунта основания, что соответствует ранее установленным представлениям о характере фильтрации в двухслойной пористой среде Я. В. Пустыльниковой и Т. В. Бурчак.



## ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И НАТУРНЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЛИЦОВОК ПРИ НАЛИЧИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

### 3.1 Описание лабораторной установки

Экспериментальные исследования водопроницаемости бетонных облицовок мелиоративных каналов с различной шириной раскрытия трещин проводились с использованием метода физического моделирования фильтрации через трещины облицовки с помощью фильтрационной колонки [33].

Фильтрационная колонка состоит из металлического цилиндра, включающего три секции: для заполнения водой, установки испытываемого образца и грунтового основания. На рисунке 3.1 показана фильтрационная колонка с основными элементами.



1 – первая секция установки (для заполнения водой); 2 – входной патрубок для создания давления (напора) на испытуемом образце; 3 – вход для подачи воды; 4 – водяной манометр для определения напора; 5 – вторая секция установки (для установки испытываемого образца); 6 – третья секция (для имитации грунтового основания); 7 – патрубок для отвода профильтровавшейся воды; 8 – мерный сосуд; 9 – насос, для нагнетания давления

Рисунок 3.1 – Общий вид фильтрационной колонки для лабораторных испытаний

К первой секции 1 через вход 3 подводится вода. Во второй секции 5 в нижней ее части устанавливается испытуемый образец с заданным повреждением в виде шероховатой трещины. Вода, профильтровавшаяся через повреждение в бетоне, поступает в третью секцию 6, в которой размещается мелкозернистый песок, выполняющий роль грунтового основания, после чего вода отводится через патрубков 7 в мерный сосуд 8. Давление в фильтрационной колонке измеряется при помощи водяного манометра 4.

Для экспериментальных исследований использован метод изучения движения напорного потока через различные повреждения бетонной облицовки в фильтрационной колонке [91, 92]. Данные эксперименты выполнялись в лаборатории кафедры «Гидравлика и инженерная гидрология» НИМИ на экспериментальной модели облицовки с трещиной и швом [33].

### **3.2 Моделирование повреждения в виде шероховатых трещин на бетонной облицовке мелиоративного канала**

Данная модель выполнена круглой формы с повреждением в виде продольной шероховатой трещины при условии подобия модели натуре в масштабе 1:1. Изготовленная модель бетонной облицовки представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Изготовленная модель бетонной облицовки с повреждением в виде сквозной шероховатой трещины

Для изготовления данной модели использовалась круглая металлическая форма радиусом  $r = 30$  см и толщиной  $\delta = 10$  см. В свою очередь для заполнения

формы раствором применялся цемент марки М 500 и среднезернистый песок в соотношении пропорций 1:3 (рисунок 3.3а). Для имитации повреждения в виде трещины определенной ширины раскрытия использовалась шероховатая пластина с заранее подготовленной длиной и шириной, которая представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Изготовление испытываемого образца бетонной облицовки с повреждением в виде трещины

После затвердевания образца в течение 10 дней (см. рисунок 3.3б) круглая форма снималась посредством откручивания болтов с гайками и вынималась пластмассовая шероховатая пластина.

В случае, когда на фильтрационной колонке модель трещины в облицовке выполняется увеличенной для возможности проведения опытов при малых значениях ширины раскрытия трещины (например, волосяных трещин шириной менее 1,0 мм) целесообразно учитывать масштабы подобия. Также масштабы подобия учитываются при изменении толщины грунтового основания и его коэффициента фильтрации. В основании модели использовался однородный песок [33].

Рассмотрим кратко моделирование водопроницаемости (фильтрации) [67] трещин в облицовке на физических моделях в фильтрационной колонке. В качестве масштабов подобия здесь можно использовать безразмерные отношения, которые представляют собой отношение параметров натуральных «н» к соответствующим параметрам модели «м»:

$$\alpha_l = \frac{l_H}{l_M}; \alpha_v = \frac{v_H}{v_M}; \alpha_k = \frac{k_H}{k_M}; \alpha_h = \frac{h_H}{h_M}; \quad (3.1)$$

где  $\alpha_l, \alpha_v, \alpha_k, \alpha_h$  – масштабы соответственно линейных размеров, скорости водопроницаемости (фильтрации) через трещину, коэффициента фильтрации грунта основания, напора на облицовку;

$l, v, k, h$  – линейные размеры модели, скорость фильтрации, коэффициент фильтрации песчаного основания, напор на модели.

Если существует подобие явлений фильтрации в природе и модели, то должно наблюдаться равенство масштабных коэффициентов [67]:

$$\alpha_v = \frac{\alpha_k \cdot \alpha_h}{\alpha_l}. \quad (3.2)$$

Считая, что напоры на границах области фильтрации природы и модели подобны, то масштаб подобия при  $\alpha_h = 1,0$  и  $\alpha_l \neq 1,0$  будет равен:

$$\alpha_v = \frac{\alpha_k}{\alpha_l}. \quad (3.3)$$

Из условий кинематического подобия получили масштаб подобия скорости фильтрации в виде соотношения:

$$\alpha_v = \frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha_m = \frac{m_H}{m_M}$  – масштаб подобия коэффициентов пористости природы и модели;

$\alpha_t = \frac{t_H}{t_M}$  – масштаб подобия времени в природе и на модели.

Из выражений (3.3) и (3.4) следует:

$$\alpha_t = \frac{\alpha_m}{\alpha_k}. \quad (3.5)$$

Поскольку размерность расхода равна размерности скорости фильтрации, умноженной на размерность площади, фильтрационный расход в природе вычисляется в зависимости от расхода модели по формуле:

$$Q_H = \alpha_k \cdot \alpha_k^2 \cdot Q_M, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.6)$$

Приведем также ошибки измеряемых величин:

- напор, определяемый по манометру, имеет ошибку  $\pm \delta_{h_0} = \pm 1,0$  мм;
- удельный расход через трещину имеет ошибку  $\pm \delta_{q_{тр}} = \pm 1,0$  %;
- ширина раскрытия трещины облицовки  $\pm \delta_{\delta_{тр}} = \pm 0,1$  мм.

### **3.3 Результаты экспериментальных исследований водопроницаемости трещин бетонной облицовки канала**

Исследованиями водопроницаемости бетонных облицовок каналов занимались различные авторы, но наибольший практический интерес получили результаты теоретических и экспериментальных исследований Г. М. Ломизе [68].

Водопроницаемость массивных бетонных конструкций с трещинами рассчитывается по формулам Г. М. Ломизе, которые также стали использоваться для бетонных облицовок оросительных каналов, но для вертикальных трещин.

Целью испытаний на модели являлись исследования водопроницаемости бетонных облицовок мелиоративных каналов через сквозные вертикальные повреждения (трещины) различной ширины их раскрытия [33].

Данные исследования выполнялись на фильтрационной колонке с масштабом модели 1:1. Основные параметры облицовки и трещин принимались следующими: толщина бетонной облицовки  $\delta_0 = 0,10$  м, ширина раскрытия трещины  $\delta_{тр} = 0,001, 0,0025, 0,0050, 0,01$  м, длина трещины  $l_{тр} = 0,15$  м. Исследуемая модель фильтрации через трещину бетонной облицовки оросительного канала соответствовала натурным размерам в масштабе 1:1.

Заранее подготовленные образцы бетонной облицовки с искусственно созданными шероховатыми трещинами располагались в фильтрационной колонке. Во избежание контактной фильтрации в местах соприкосновения облицовки с внутренними стенками фильтрационной колонки проводилось инъектирование по контуру бетонного образца жидким водонепроницаемым герметиком (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Установка испытываемого образца бетонной облицовки канала со сквозной трещиной

Для моделирования данной задачи водопроницаемости трещины в облицовке рассматривалось установившееся напорное движение жидкости. При помощи насоса создавался напор  $H$ , который во время проведения исследований поддерживался постоянным.

Замеры фильтрационного расхода через трещину в образце бетонной облицовки проводились мерным сосудом  $V = 0,0005 \text{ м}^3$  объемным методом при различных значениях напора  $h_0$  и ширины раскрытия трещины  $\delta_{\text{тр}}$ . По результатам экспериментальных исследований определялся удельный фильтрационный расход в зависимости от напора воды над облицовкой при различных значениях ширины повреждения (трещины). Результаты обработки измерений представлены в таблицах 3.1–3.5.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментальных измерений удельного расхода через трещину в бетонной облицовке канала при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{\text{тр}} = 0,001 \text{ м}$

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{\text{ср}}$ , сут	$q_{\text{тр.экс}}$ , $\text{м}^2/\text{сут}$
1-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{\text{тр}} = 0,001 \text{ м}$ , $l_{\text{тр}} = 0,15 \text{ м}$					
1	1,0	1-й замер	327	0,00376	0,885
		2-й замер	325		
		3-й замер	324		
2	2,0	1-й замер	322	0,00370	0,899
		2-й замер	320		
		3-й замер	319		



Продолжение таблицы 3.1

3	3,0	1-й замер	317	0,00365	0,912
		2-й замер	316		
		3-й замер	314		
4	4,0	1-й замер	312	0,00359	0,928
		2-й замер	310		
		3-й замер	309		
5	5,0	1-й замер	307	0,00353	0,943
		2-й замер	305		
		3-й замер	304		
6	6,0	1-й замер	302	0,00348	0,957
		2-й замер	301		
		3-й замер	300		
7	7,0	1-й замер	298	0,00343	0,971
		2-й замер	296		
		3-й замер	296		
8	8,0	1-й замер	296	0,00338	0,986
		2-й замер	292		
		3-й замер	291		
9	9,0	1-й замер	289	0,00333	1,001
		2-й замер	287		
		3-й замер	287		
10	10,0	1-й замер	284	0,00327	1,020
		2-й замер	282		
		3-й замер	281		

Таблица 3.2 – Результаты экспериментальных измерений удельного расхода через трещину в бетонной облицовке канала при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0025$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
2-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0025$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	213	0,00244	1,363
		2-й замер	211		
		3-й замер	210		
2	2,0	1-й замер	208	0,00239	1,389
		2-й замер	207		
		3-й замер	207		
3	3,0	1-й замер	204	0,00235	1,418
		2-й замер	202		
		3-й замер	203		
4	4,0	1-й замер	200	0,00230	1,445
		2-й замер	199		
		3-й замер	199		
5	5,0	1-й замер	195	0,00223	1,489
		2-й замер	193		
		3-й замер	192		

Продолжение таблицы 3.2

6	6,0	1-й замер	189	0,00217	1,532
		2-й замер	188		
		3-й замер	187		
7	7,0	1-й замер	184	0,00212	1,571
		2-й замер	183		
		3-й замер	183		
8	8,0	1-й замер	177	0,00203	1,642
		2-й замер	175		
		3-й замер	174		
9	9,0	1-й замер	169	0,00194	1,714
		2-й замер	168		
		3-й замер	167		
10	10,0	1-й замер	164	0,00187	1,774
		2-й замер	162		
		3-й замер	161		

Таблица 3.3 – Результаты экспериментальных измерений удельного расхода через трещину в бетонной облицовке канала при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0050$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
3-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0050$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	160	0,00183	1,819
		2-й замер	158		
		3-й замер	157		
2	2,0	1-й замер	155	0,00179	1,862
		2-й замер	154		
		3-й замер	155		
3	3,0	1-й замер	151	0,00173	1,924
		2-й замер	149		
		3-й замер	149		
4	4,0	1-й замер	146	0,00168	1,981
		2-й замер	145		
		3-й замер	145		
5	5,0	1-й замер	142	0,00162	2,052
		2-й замер	140		
		3-й замер	139		
6	6,0	1-й замер	137	0,00157	2,123
		2-й замер	135		
		3-й замер	135		
7	7,0	1-й замер	133	0,00153	2,182
		2-й замер	132		
		3-й замер	131		
8	8,0	1-й замер	128	0,00146	2,279
		2-й замер	126		
		3-й замер	125		



## Продолжение таблицы 3.3

9	9,0	1-й замер	123	0,00140	2,373
		2-й замер	121		
		3-й замер	120		
10	10,0	1-й замер	119	0,00136	2,441
		2-й замер	118		
		3-й замер	117		

Таблица 3.4 – Результаты экспериментальных измерений удельного расхода через трещину в бетонной облицовке канала при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0075$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
4-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0075$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	128	0,00147	2,262
		2-й замер	127		
		3-й замер	127		
2	2,0	1-й замер	125	0,00142	2,341
		2-й замер	123		
		3-й замер	121		
3	3,0	1-й замер	120	0,00136	2,441
		2-й замер	118		
		3-й замер	116		
4	4,0	1-й замер	114	0,00131	2,541
		2-й замер	113		
		3-й замер	113		
5	5,0	1-й замер	111	0,00126	2,642
		2-й замер	109		
		3-й замер	107		
6	6,0	1-й замер	105	0,00120	2,769
		2-й замер	104		
		3-й замер	103		
7	7,0	1-й замер	100	0,00114	2,909
		2-й замер	99		
		3-й замер	98		
8	8,0	1-й замер	95	0,00109	3,053
		2-й замер	94		
		3-й замер	94		
9	9,0	1-й замер	91	0,00104	3,188
		2-й замер	90		
		3-й замер	90		
10	10,0	1-й замер	86	0,00098	3,375
		2-й замер	85		
		3-й замер	85		

Таблица 3.5 – Результаты экспериментальных измерений удельного расхода через трещину в бетонной облицовке канала при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,010$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
5-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,010$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	102	0,00116	2,88
		2-й замер	100		
		3-й замер	98		
2	2,0	1-й замер	96	0,00109	3,053
		2-й замер	94		
		3-й замер	93		
3	3,0	1-й замер	90	0,00103	3,248
		2-й замер	89		
		3-й замер	87		
4	4,0	1-й замер	83	0,00094	3,541
		2-й замер	81		
		3-й замер	80		
5	5,0	1-й замер	77	0,00088	3,789
		2-й замер	76		
		3-й замер	75		
6	6,0	1-й замер	74	0,00084	3,927
		2-й замер	73		
		3-й замер	73		
7	7,0	1-й замер	71	0,00080	4,134
		2-й замер	69		
		3-й замер	69		
8	8,0	1-й замер	66	0,00075	4,431
		2-й замер	65		
		3-й замер	64		
9	9,0	1-й замер	62	0,00071	4,670
		2-й замер	62		
		3-й замер	61		
10	10,0	1-й замер	57	0,00065	5,143
		2-й замер	56		
		3-й замер	55		

Удельный расход через трещину определялся по формуле:

$$q_{тр} = \frac{V}{t_{ср} \cdot l_{тр}}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где  $V$  – объем воды, прошедший через трещину (шов) за время  $t$ , м<sup>3</sup>;

$t_{ср}$  – среднее значение времени по данным трех повторяющихся опытов, сут;

$l_{тр}$  – длина трещины, м.

По результатам проведенных экспериментальных исследований построены графики зависимости удельного расхода от напора, при фиксированных значениях ширины раскрытия трещин от 1 до 10 мм (рисунок 3.5).

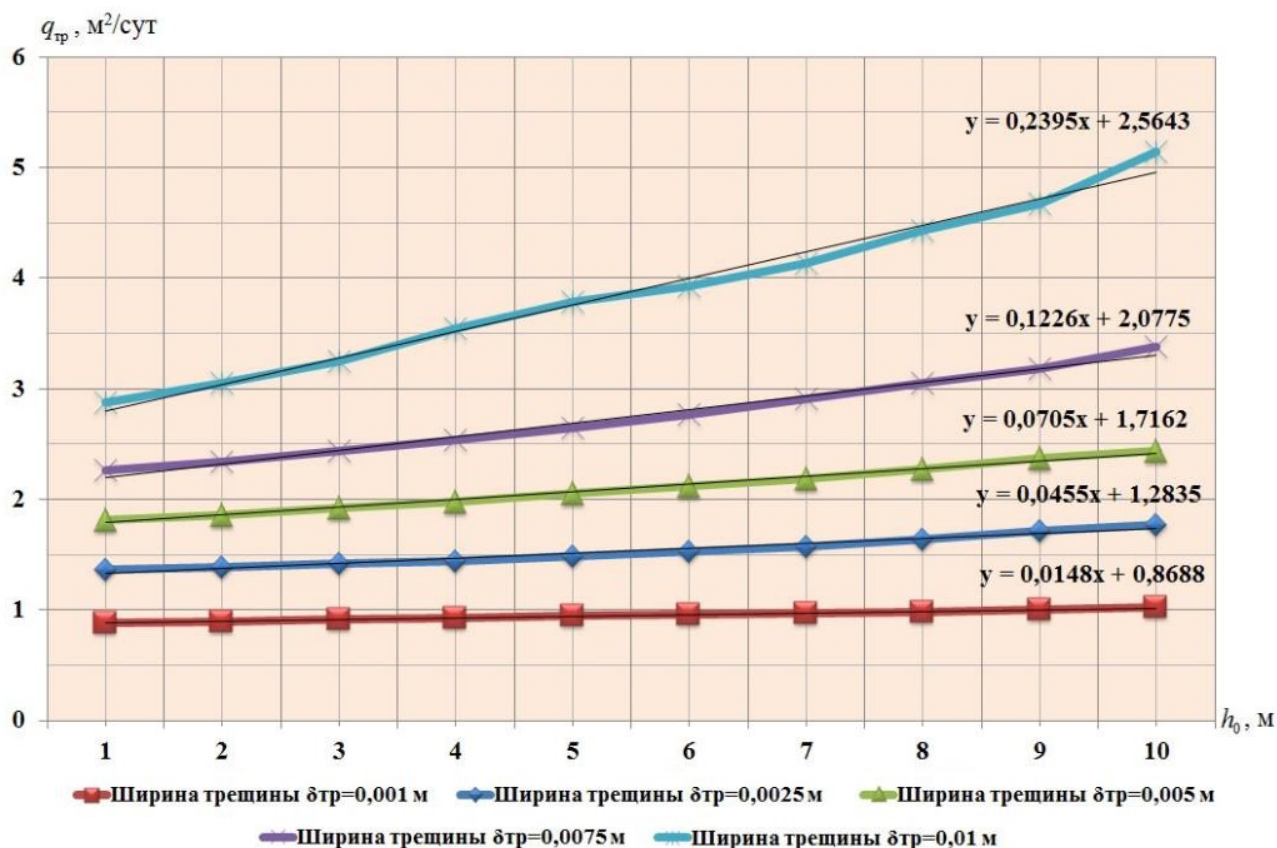


Рисунок 3.5 – Графики зависимости удельного расхода от напора при различных значениях ширины раскрытия трещины

Анализируя графическое представление полученных данных на рисунке 3.5 и используя компьютерную программу Excel, автором получены эмпирические функциональные зависимости для определения удельного фильтрационного расхода при различных значениях ширины раскрытия трещин.

Полученные эмпирические зависимости имеют следующий вид:

– при  $\delta_{тр} = 0,001$  м

$$q_{тр} = 0,0148 \cdot h_0 + 0,8688 \quad (R^2=0,999);$$

– при  $\delta_{тр} = 0,0025$  м

$$q_{тр} = 0,0455 \cdot h_0 + 1,2835 \quad (R^2=0,968);$$

– при  $\delta_{тр} = 0,005$  м

$$q_{\text{тр}} = 0,0705 \cdot h_0 + 1,7162 \quad (R^2=0,991);$$

– при  $\delta_{\text{тр}} = 0,0075$  м

$$q_{\text{тр}} = 0,1226 \cdot h_0 + 2,0775 \quad (R^2=0,988);$$

– при  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  м

$$q_{\text{тр}} = 0,2395 \cdot h_0 + 2,5643 \quad (R^2=0,986).$$

Полученные расчетные зависимости имеют достаточно высокое значение достоверности аппроксимации  $R^2=0,96-0,99$ , что позволяет их рекомендовать для использования.

На основании математического анализа экспериментальных значений удельного фильтрационного расхода, автором также получены расчетные полиномиальная и линейная двухфакторные зависимости, учитывающие напор  $h_0$  и ширину раскрытия трещины  $\delta_{\text{тр}}$ , которые дают расхождение с экспериментальными значениями до 5 %.

Полученные зависимости имеют вид.

– полиномиальная двухфакторная:

$$q_{\text{тр}} = (2470 \cdot \delta_{\text{тр}}^2 - 3,91 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,0258) \cdot h_0 + (-3340 \cdot \delta_{\text{тр}}^2 + 217,2 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,699), \text{ м}^2/\text{сут}$$

– линейная двухфакторная:

$$q_{\text{тр}} = (23,12 \cdot \delta_{\text{тр}} - 0,022) \cdot h_0 + (180,6 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,763), \text{ м}^2/\text{сут}$$

Результаты расчетов по данным двухфакторным зависимостям при значении ширины раскрытия трещины  $\delta_{\text{тр}} = 0,005$  м представлены на рисунке 3.6.

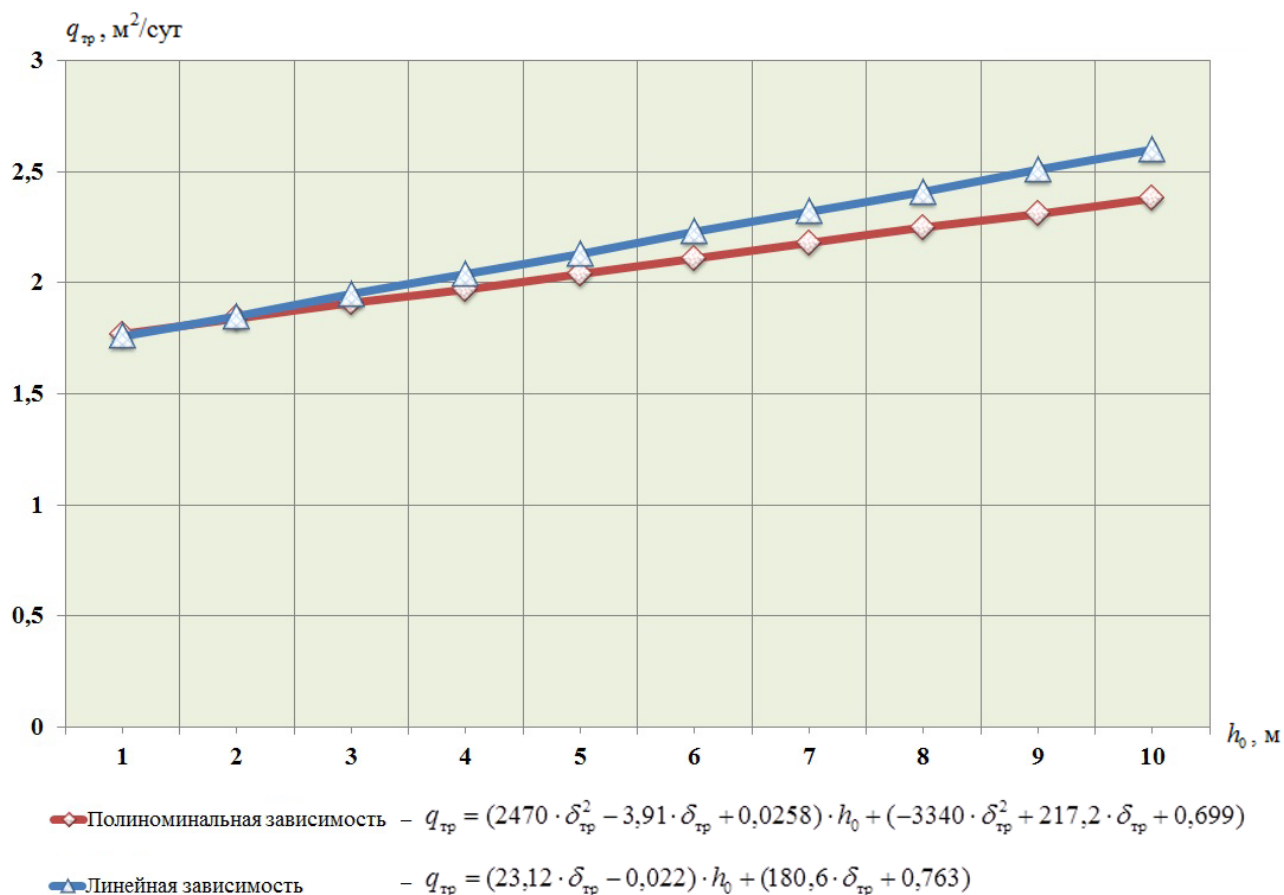


Рисунок 3.6 – Результаты расчетов по полученным двухфакторным зависимостям для ширины раскрытия трещины  $\delta_{тр}=0,005$  м

Указанные зависимости более универсальны, и позволяют найти результаты вычисления удельного расхода от 2-х факторов  $h_0$  и  $\delta_{тр}$ .

### 3.4 Результаты экспериментальных исследований водопроницаемости закольматированных трещин бетонной облицовки канала

В данном пункте рассматриваются экспериментальные исследования кольматации трещины на фильтрационной колонке. Эффект кольматации повреждения (трещины) достигался в результате добавления глинистых частиц грунта в воду [104]. По истечении 7-ми дней, илистые частицы оседали как на самом образце, так и кольматировали повреждение в виде трещины, после чего проводились замеры удельного расхода через закольматированные трещины, при различных значениях напора. Напор при проведении каждого опыта поддерживался постоянным.

Результаты измерений приведены в таблицах 3.6–3.10.

Таблица 3.6 – Результаты экспериментальных измерений расхода через закольматированную трещину в бетонной облицовке при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,001$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
1-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,001$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	347	0,00399	0,834
		2-й замер	345		
		3-й замер	344		
2	2,0	1-й замер	342	0,00393	0,846
		2-й замер	340		
		3-й замер	339		
3	3,0	1-й замер	337	0,00388	0,857
		2-й замер	336		
		3-й замер	334		
4	4,0	1-й замер	332	0,00382	0,872
		2-й замер	330		
		3-й замер	329		
5	5,0	1-й замер	327	0,00376	0,885
		2-й замер	325		
		3-й замер	324		
6	6,0	1-й замер	322	0,00371	0,897
		2-й замер	321		
		3-й замер	320		
7	7,0	1-й замер	318	0,00366	0,909
		2-й замер	316		
		3-й замер	316		
8	8,0	1-й замер	313	0,00361	0,923
		2-й замер	312		
		3-й замер	311		
9	9,0	1-й замер	309	0,00356	0,936
		2-й замер	307		
		3-й замер	307		

Продолжение таблицы 3.6

10	10,0	1-й замер	304	0,00349	0,952
		2-й замер	302		
		3-й замер	301		

Таблица 3.7 – Результаты экспериментальных измерений расхода через закольматированную трещину в бетонной облицовке при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0025$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
2-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0025$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	233	0,00268	1,245
		2-й замер	231		
		3-й замер	230		
2	2,0	1-й замер	228	0,00263	1,267
		2-й замер	227		
		3-й замер	227		
3	3,0	1-й замер	224	0,00258	1,291
		2-й замер	222		
		3-й замер	223		
4	4,0	1-й замер	220	0,00254	1,313
		2-й замер	219		
		3-й замер	219		
5	5,0	1-й замер	215	0,00247	1,35
		2-й замер	213		
		3-й замер	212		
6	6,0	1-й замер	209	0,00241	1,385
		2-й замер	208		
		3-й замер	207		
7	7,0	1-й замер	204	0,00235	1,416
		2-й замер	203		
		3-й замер	203		

Продолжение таблицы 3.7

8	8,0	1-й замер	197	0,00226	1,474
		2-й замер	195		
		3-й замер	194		
9	9,0	1-й замер	189	0,00217	1,532
		2-й замер	188		
		3-й замер	187		
10	10,0	1-й замер	184	0,00211	1,579
		2-й замер	182		
		3-й замер	181		

Таблица 3.8 – Результаты экспериментальных измерений расхода через закольматированную трещину в бетонной облицовке при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0050$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
3-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0050$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	180	0,00206	1,615
		2-й замер	178		
		3-й замер	177		
2	2,0	1-й замер	175	0,00202	1,649
		2-й замер	174		
		3-й замер	175		
3	3,0	1-й замер	171	0,00196	1,697
		2-й замер	169		
		3-й замер	169		
4	4,0	1-й замер	166	0,00191	1,741
		2-й замер	165		
		3-й замер	165		
5	5,0	1-й замер	162	0,00185	1,796
		2-й замер	160		
		3-й замер	159		



Продолжение таблицы 3.8

6	6,0	1-й замер	157	0,00180	1,850
		2-й замер	155		
		3-й замер	155		
7	7,0	1-й замер	153	0,00176	1,894
		2-й замер	152		
		3-й замер	151		
8	8,0	1-й замер	148	0,00169	1,968
		2-й замер	146		
		3-й замер	145		
9	9,0	1-й замер	143	0,00163	2,037
		2-й замер	141		
		3-й замер	140		
10	10,0	1-й замер	139	0,00159	2,087
		2-й замер	138		
		3-й замер	137		

Таблица 3.9 – Результаты экспериментальных измерений расхода через закольматированную трещину в бетонной облицовке при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,0075$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
4-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0075$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	148	0,00170	1,955
		2-й замер	147		
		3-й замер	147		
2	2,0	1-й замер	145	0,00165	2,014
		2-й замер	143		
		3-й замер	141		
3	3,0	1-й замер	140	0,00159	2,087
		2-й замер	138		
		3-й замер	136		

Продолжение таблицы 3.9

4	4,0	1-й замер	134	0,00154	2,16
		2-й замер	133		
		3-й замер	133		
5	5,0	1-й замер	131	0,00149	2,232
		2-й замер	129		
		3-й замер	127		
6	6,0	1-й замер	125	0,00143	2,322
		2-й замер	124		
		3-й замер	123		
7	7,0	1-й замер	120	0,00138	2,42
		2-й замер	119		
		3-й замер	118		
8	8,0	1-й замер	115	0,00132	2,518
		2-й замер	114		
		3-й замер	114		
9	9,0	1-й замер	111	0,00127	2,610
		2-й замер	110		
		3-й замер	110		
10	10,0	1-й замер	106	0,00122	2,734
		2-й замер	105		
		3-й замер	105		

Таблица 3.10 – Результаты экспериментальных измерений расхода через закольматированную трещину в бетонной облицовке при значении ширины раскрытия трещины в  $\delta_{тр} = 0,010$  м

Номер опыта	$h_0$ , м	Единичный замер	$t$ , сек	$t_{ср}$ , сут	$q_{тр.экс}$ , м <sup>2</sup> /сут
2-я серия опытов при исходных данных – $\delta_{тр} = 0,0025$ м, $l_{тр} = 0,15$ м					
1	1,0	1-й замер	122	0,00138	2,4
		2-й замер	120		
		3-й замер	118		

Продолжение таблицы 3.10

2	2,0	1-й замер	116	0,00132	2,518
		2-й замер	114		
		3-й замер	113		
3	3,0	1-й замер	110	0,00126	2,650
		2-й замер	109		
		3-й замер	107		
4	4,0	1-й замер	103	0,00117	2,842
		2-й замер	101		
		3-й замер	100		
5	5,0	1-й замер	97	0,00111	3,0
		2-й замер	96		
		3-й замер	95		
6	6,0	1-й замер	94	0,00108	3,086
		2-й замер	93		
		3-й замер	93		
7	7,0	1-й замер	91	0,00104	3,212
		2-й замер	89		
		3-й замер	89		
8	8,0	1-й замер	86	0,00098	3,388
		2-й замер	85		
		3-й замер	84		
9	9,0	1-й замер	82	0,00094	3,526
		2-й замер	82		
		3-й замер	81		
10	10,0	1-й замер	77	0,00087	3,789
		2-й замер	76		
		3-й замер	75		

По результатам проведенных экспериментальных исследований построены графики зависимости удельного расхода от напора, при фиксированных значениях ширины раскрытия закольматированных трещин (рисунок 3.7).

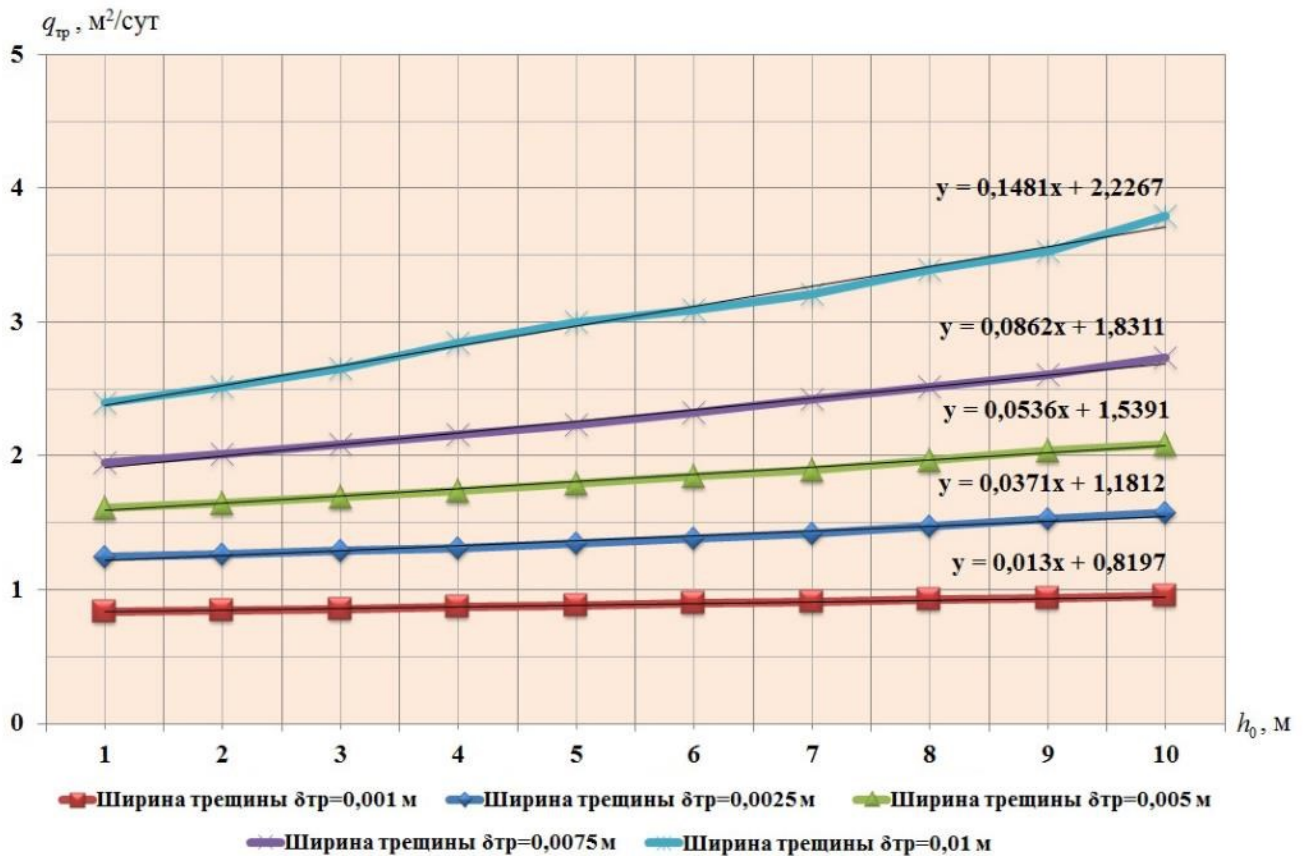


Рисунок 3.7 – Графики зависимости удельного расхода от напора при различных значениях ширины раскрытия закольматированной трещины

Анализируя графическое представление полученных данных на рисунке 3.7, и используя компьютерную программу Microsoft Excel, автором получены эмпирические функциональные зависимости для определения удельного расхода при различных значениях ширины раскрытия закольматированных трещин облицовок мелиоративных каналов.

Полученные эмпирические зависимости имеют следующий вид:

– при  $\delta_{тр} = 0,001$  м:

$$q_{кол} = 0,013 \cdot h_0 + 0,8197; \quad (R^2=0,998);$$

– при  $\delta_{тр} = 0,0025$  м:

$$q_{кол} = 0,0371 \cdot h_0 + 1,1812; \quad (R^2=0,970);$$

– при  $\delta_{тр} = 0,005$  м:

$$q_{кол} = 0,0536 \cdot h_0 + 1,5391; \quad (R^2=0,992);$$

– при  $\delta_{тр} = 0,0075$  м:

$$q_{\text{кол}} = 0,0862 \cdot h_0 + 1,8311; \quad (R^2=0,991);$$

– при  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  м:

$$q_{\text{кол}} = 0,1481 \cdot h_0 + 2,2267. \quad (R^2=0,992).$$

Полученные расчетные зависимости имеют достаточно высокое значение достоверности аппроксимации  $R^2=0,97-0,99$ , что позволяет их рекомендовать для дальнейшего использования.

На основании анализа экспериментальных значений удельного фильтрационного расхода, автором также получены расчетные полиномиальная и линейная двухфакторные зависимости удельного фильтрационного расхода для закольматированных трещин, учитывающие напор  $h_0$  и ширину раскрытия  $\delta_{\text{тр}}$ , которые дают расхождение с экспериментальными значениями до 5 %.

Полученные зависимости имеют следующий вид:

– полиномиальная двухфакторная:

$$q_{\text{тр}} = (1069 \cdot \delta_{\text{тр}}^2 + 2,25 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,0156) \cdot h_0 + (-3534 \cdot \delta_{\text{тр}}^2 + 188 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,99), \text{ м}^2/\text{сут};$$

– линейная двухфакторная:

$$q_{\text{тр}} = (13,95 \cdot \delta_{\text{тр}} - 0,005) \cdot h_0 + (149,3 \cdot \delta_{\text{тр}} + 0,74), \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Результаты расчетов по данным двухфакторным зависимостям при значении ширины раскрытия трещины бетонной облицовки мелиоративного канала ( $\delta_{\text{тр}} = 0,005$  м) представлены на рисунке 2.8.

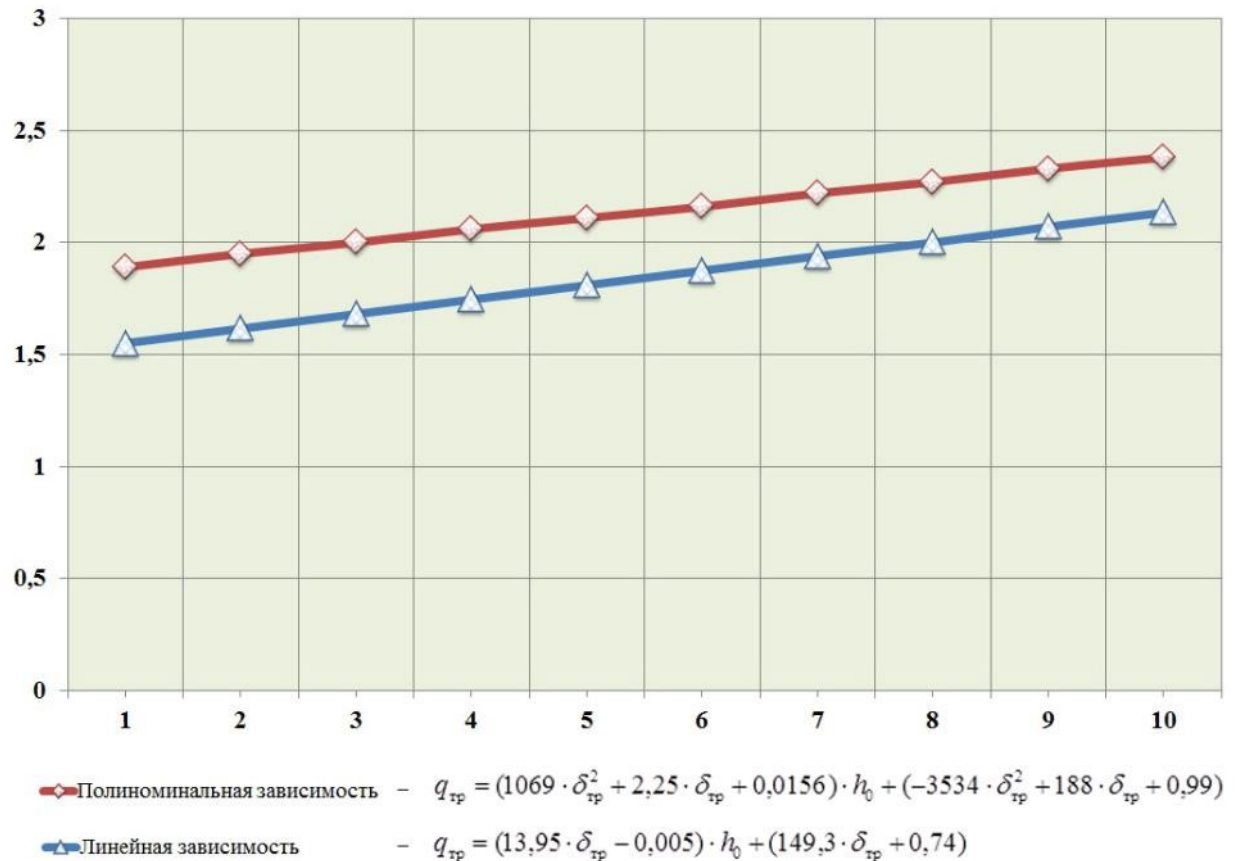


Рисунок 3.8 – Результаты расчетов по полученным двухфакторным зависимостям для ширины раскрытия трещины  $\delta_{тр}=0,005$  м

Указанные зависимости более универсальны, и позволяют найти результаты вычисления удельного расхода от 2-х факторов  $h_0$  и  $\delta_{тр}$ .

Сравнение значений удельных расходов через трещины облицовки без и с учетом кольматации показывают, что в случае кольматации расходы снижаются в зависимости от ширины трещины в 1,4–1,5 раз. В натуральных условиях при длительном периоде кольматации в течение 3–5 месяцев эффект кольматации может достигнуть 2–8 раз, что подтверждается исследованиям Калтаговой М. Г. и др. [44].

### 3.5 Натурные обследования состояния облицовок мелиоративных каналов

Анализ процесса эксплуатации оросительных каналов показывает, что их отказ наблюдается в результате следующих причин: размыва, разрушения, оползания откосов и деформации дна, заиления, фильтрации, изменения шероховатости. В результате этих воздействий параметры канала отклоняются от проектных значений, что сказывается на работоспособности канала.

Причинами ненадежности мелиоративных систем и водопроводящих мелиоративных сооружений (каналов) являются недостаточная пропускная способность, размывы русла, сползание плит, разрушение бетонной поверхности облицовки, разрушение деформационных швов, а также фильтрационные деформации грунта основания [29].

Технические требования направлены на поддержание мелиоративных сооружений в работоспособном и безопасном состоянии, то есть на обеспечение долговременной и надежной работы этих сооружений, которые заключаются в своевременном техническом обслуживании и ремонте. Техническое состояние определяется по коэффициенту полезного действия и дефектам, которые выявляются в процессе обследования сооружения. Методика проведения визуально-инструментального обследования технического состояния объектов и элементов на мелиоративной сети приведена в работе [43]. Обследования проведены при помощи следующего оборудования: лазерного дальномера «Leica Disto» A5, тахеометра «TOPCON» GPT-105N, измерителя прочности бетона, мерной рейки, рулетки и цифрового фотоаппарата, которые представлены на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Оборудование для проведения натурных обследований

По результатам обследований выявляется необходимость в проведении работ по реконструкции и устройству на каналах защитных элементов в виде противофильтрационных облицовок [29].

В таблице 3.11 приведены некоторые сведения по техническому состоянию обследуемых оросительных систем Ростовской области.

Таблица 3.11 – Техническое состояние оросительных систем Ростовской области

Оросительная система	Открытая сеть, км		КПД системы	КПД сети		Глубина залегания УГВ, м	Потери на фильтрацию, %
	в земл. русле	в облицовке		межхоз.	внутрихоз.		
Азовская	33,48	80,94	0,53	0,78	0,65	0,0–1,0	0,4
						1,0–1,5	0,5
						1,5–2,0	3,5
						2,0–2,5	4,03
						2,5–3,0	4,3
						3,0–5,0	12,3
						Более 5,0	12,5
Багаевско-Садковская	112,53	143,15	0,52	0,75	0,70	0,0–1,0	0,4
						1,0–1,5	–
						1,5–2,0	2,33
						2,0–2,5	5,58
						2,5–3,0	7,58
						3,0–5,0	33,93
						Более 5,0	4,01
Нижне-Донская	194,99	4,3	0,58	0,77	0,75	0,0–1,0	0,4
						1,0–1,5	1,2
						1,5–2,0	1,36
						2,0–2,5	5,0
						2,5–3,0	6,3
						3,0–5,0	13,9
						Более 5,0	13,91

### 3.5.1 Результаты натуральных обследований каналов Азовской, Багаевской и Нижне-Донской оросительных систем

Натурные обследования магистральных каналов Азовской, Багаевской и Нижне-Донской оросительных систем выполнялись в 2018–2020 гг.

Задачами обследования являлось определение технического состояния каналов мелиоративных систем и их эксплуатационных характеристик. Обследования проводились визуальные и инструментальные.

Магистральные каналы Азовской и Нижне-Донской оросительных систем протрассированы в земляном русле трапецеидального сечения и, в основном,



в полувыемке-полунасыпи, а Багаевские распределительные каналы Бг-Р-5, Бг-Р-6 и Бг-Р-7 обустроены бетонной и бетонопленочной облицовкой. За время эксплуатации сечения каналов деформировалось, имеют приближенную к параболической форме сечения. По результатам натурных обследований на рисунках 3.10 и 3.11 приведено их текущее техническое состояние [29].



Рисунок 3.10 – Текущее техническое состояние Азовского магистрального канала



Рисунок 3.11 – Вид Азовского магистрального канала по дну  
(размыв русла и зарастание откосов канала камышом)

Анализ результатов обследования Азовского магистрального канала показывает, что техническое состояние канала оценивается как неудовлетворительное, наблюдается существенное снижение пропускной способности и гидравлической эффективности. При подаче расходов в период максимального водопотребления происходят существенные потери воды на фильтрацию через земляное русло. Результаты обследования позволяют сделать вывод о необходимости реконструкции Азовского магистрального канала, путем применения полимерных композиционных материалов для уменьшения и предотвращения фильтрационных потерь.

Подача воды в Нижне-Донской магистральный канал производится из Донского магистрального канала. Канал имеет длину 73,9 км, выполнен в земляном русле и бетонопленочной облицовке, сечение по проекту трапецеидальное. Канал зарос водной растительностью, наблюдаются донные отложения, имеются деформации и смещение бетонных облицовок, разрушение бетонного покрытия и деформационных швов (рисунок 3.12).



а – текущее состояние распределителя; б – повреждения

Рисунок 3.12 – Семикаракорский распределитель Нижне-Донского магистрального канала

Багаевский магистральный канал забирает воду из Донского магистрального канала. Канал выполнен в земляном русле и бетонной облицовке длиной 36,4 км. На рисунке 3.13 представлены дефекты канала (зарастание водной растительностью (камышом) и деформация откосов).





Рисунок 3.13 – Общий вид Багаевского МК с дефектами в виде оползания, разрушения поверхности бетонных плит и зарастания канала камышом

Из Багаевского магистрального канала вода подается в Багаевские распределители: Бг-Р-1, Бг-Р-2...Бг-Р-8. Автором были обследованы распределители в бетонопленочной облицовке Бг-Р-5, Бг-Р-6 и Бг-Р-7. При обследовании распределителей были выявлены следующие дефекты: зарастание водной растительностью откосов, частичное и полное разрушение деформационных швов, обрушение и сползание плит, раскрытие трещин различной длины и ширины, сколы и выбоены плит, оголение арматуры, донные отложения и другие, которые показаны на рисунках 3.14–3.20.



Рисунок 3.14 – Определение толщины донных отложений в распределительном канале Бг-Р-5





Рисунок 3.15 –Разрушение бетонной облицовки канала, оголение противофильтрационной пленки



Рисунок 3.16 – Смещение бетонной облицовки, повлекшее раскрытие деформационного шва и оголение противофильтрационной пленки





Рисунок 3.17 – Заращение откоса канала камышом



Рисунок 3.18 – Вымывание грунта из-под плиты, смещение бетонной облицовки





Рисунок 3.19 – Измерение смещения бетонной облицовки на откосе канала



Рисунок 3.20 – Дефекты на поверхности бетонной облицовки мелиоративного канала

По результатам проведенных натуральных обследований участков Азовского, Багаевского и Нижне-Донского каналов были выявлены значительные деформации русел, противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий, а бетонная часть и гидротехническая арматура (металлические затворы, подъемные устройства) многих перегораживающих и запорно-регулирующих сооружений частично разрушены, происходит оползание плит и коррозия бетона. Средняя глубина в распределительных каналах Бг-Р-5, Бг-Р-6 и Бг-Р-7 изменяются от 1,3 до 1,5 м, данные участки канала устроены с бетонопленочной облицовкой (с пленочным экраном и защитным покрытием из предварительно напряженных плит НПК). На данных участках каналов обнаружены повреждения и дефекты на бетонной облицовке, а именно: оползание, сдвиг и выпор бетонных плит, различного рода дефекты в бетоне в виде трещин, сколов, отшелушивания бетона и оголения арматуры. На некоторых участках происходит сползание плит с образованием больших промоин в грунтовых откосах канала, повреждение плитами противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки. Наряду с этим обнаружены участки канала с заилением дна и толщиной наносов от 0,15 до 0,35 м, что свидетельствует о низкой гидравлической эффективности и малой пропускной способности (расхода) в руслах каналов.

По результатам проведенных натуральных обследований отметим, что при длительном сроке эксплуатации около 45 % каналов находится в неудовлетворительном техническом состоянии и нуждаются в проведении реконструкции, при этом коэффициент полезного действия большинства каналов не превышает 0,75–0,80, а потери воды на фильтрацию достигают 25–30 % от водозабора. С целью уменьшения потерь воды на фильтрацию и снижения вероятности образования аварийных ситуаций, подтопления, вторичного засоления и заболачивания приканальных территорий, необходимо проведения реконструкции каналов с созданием надежных и долговечных противофильтрационных облицовок. В связи с этим целесообразно применять новые строительные материалы – полимерные композиционные, геосинтетические и геокомпозитные материалы.



### 3.5.2 Оценка технического состояния бетонной облицовки на участке Багаевского распределительного канала

Автором для проведения натурных исследований по ремонту бетонных облицовок каналов мелиоративных систем полимерными композиционными материалами был выбран распределительный канал 10–Х–4 Багаевской оросительной системы в Мартыновском районе Ростовской области.

Во время проведения исследований канал был полностью опорожнен, что позволило более детально оценить его техническое состояние. По дну мелиоративного канала имели место донные отложения, на откосах канала была камышовая растительность, также частично разрушены деформационные швы. Все вышеперечисленные повреждения проиллюстрированы на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 – Общий вид распределительного канала до проведения очистки ложа и откосов для ремонта повреждений

Для проведения более детального обследования канала 10–Х–4 была проведена очистка ложа канала от влекомых водным потоком донных отложений и откосов от водной растительности (рисунок 3.22), с целью определения повреждений бетонной облицовки и деформационных швов.





Рисунок 3.22 – Подготовленный участок мелиоративного канала для ремонта бетонной облицовки полимерными композициями

После осмотра подготовленной бетонной облицовки канала 10–Х–4 были выявлены следующие дефекты: трещины различной ширины и глубины, шелушение бетона, частично разрушенные деформационные швы по дну и на откосе канала. Для ремонта выявленных повреждений были применены жидкие полимерные композиционные материалы отечественного производства, которые представлены на рисунке 3.23.



Рисунок 3.23 – Полимерный композиционный материал типа жидкая резина

Технические характеристики применяемого ремонтного полимерного материала представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Технические характеристики применяемого на канале обмазочного материала

Технические характеристики материала	Показатели
Расход мастики на 1 мм толщины в сухом остатке, кг/м <sup>2</sup>	1,39
Условная прочность при разрыве, МПа	2,9
Относительное удлинение при разрыве, %	1500
Прочность сцепления с бетоном, МПа	0,4
Прочность сцепления с металлом, МПа	1,0
Гибкость образования трещин на брусе радиусом 5 мм при температуре, °С	– 42
Теплостойкость, °С	+ 110
Водонепроницаемость при давлении 0,03 МПа	отсутствие мокрого пятна
Водопоглощение за 24 часа, %	0,4
Коррозионная стойкость, рН	2...12
Температура применения (окружающей среды), °С	– 10...+ 50

Перед нанесением ремонтного состава на участок облицовки канала была проведена подготовка бетонной поверхности. Удалена грязь и пыль с трещин и деформационных швов, все повреждения были зачищены металлической щеткой для более лучшей адгезии наносимого материала (рисунок 3.24).



Рисунок 3.24 – Подготовленная бетонная поверхность облицовки канала для проведения ремонтно-восстановительных работ

Нанесение жидкой резины производилось вручную (шпателем), предварительно разогрев материал газовой горелкой. Материал сперва наносился на крупные повреждения в виде частично разрушенных швов и крупных



пролодговатых трещин. Затвердевание происходило в течение 45 минут. Бетонная поверхность и деформационные швы облицовки после ремонта приведены на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 – Бетонная поверхность облицовки канала после ремонта композиционным материалом типа жидкая резина

Для оценки водопроницаемости бетонной облицовки по результатам натуральных исследований выполнено сравнение результатов с полученными данными теоретических расчетов автора.

Расчетная схема реконструируемого канала представлена на рисунке 3.26.

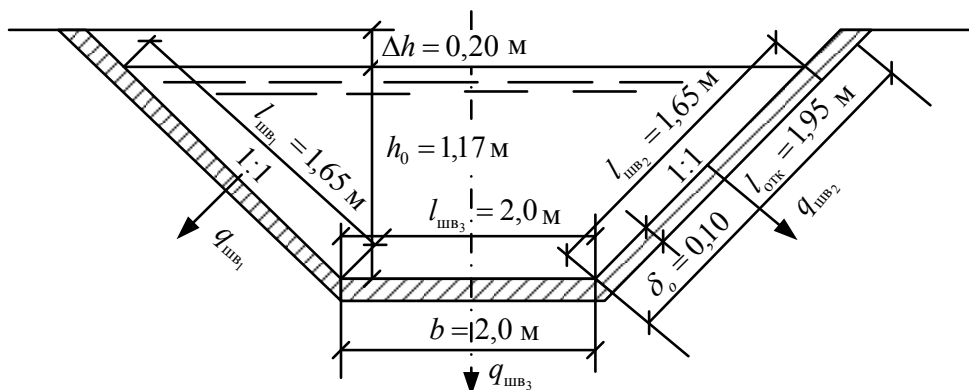


Рисунок 3.26 – Расчетная схема оросительного канала 10–Х–4

По результатам натуральных обследований поверхности облицовки оросительного канала, выявлены дефекты и повреждения, в виде трещин различной длины

и шириной раскрытия, а также разрушения деформационных швов. Перечень повреждений, на рассматриваемом участке представлен в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Дефекты и повреждения бетонной облицовки канала 10–Х–4

Наименование дефекты или повреждения	Глубина канала, $h_0$ , м	Параметры дефекта или повреждения	
		Ширина повреждения, $\delta_{\text{повр}}$ , м	Длина повреждения, $l_{\text{повр}}$ , м
Поперечный шов облицовки по дну канала	1,17	0,10	1,0
Продольный шов облицовки по дну	1,17	0,10	6,2
Поперечный шов на откосах	0,58	0,10	1,65
Большая трещина на откосе	0,99	0,01	5,7
Средняя трещина на откосе	0,80	0,06	2,7
Малая трещина на откосе	1,20	0,002	1,6
Волосьяная трещина на откосе	0,45	0,001	0,50

Исходные данные для расчета водопроницаемости бетонной облицовки:  $k_{\text{гр}} = 0,1 \div 0,3$  м/сут (для суглинка принимаем – 0,1 м/сут);  $h_0 = 1,17$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $T = 3,0$  м;  $\delta_{\text{шв,дна}} = 0,10$  м;  $\delta_{\text{шв}} = 0,10$  м;  $l_p = \beta \cdot (h_0 + \delta_o) = 1,0 \cdot (1,17 + 0,1) = 1,27$  м.

– поперечный шов по дну до оси канала –  $l_{\text{шв}} = 1,0$  м,  $\delta_{\text{шв}} = 0,10$  м:

$$q_{\text{шв,днопер}} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_0 + \delta_o + T) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{шв}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (1,17 + 0,1 + 3,0) \cdot 1,0}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,1}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,103 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– продольный шов по дну –  $l_{\text{шв,дна}} = 6,20$  м;  $\delta_{\text{шв,дна}} = 0,10$  м;  $h_0 = 1,17$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $k_{\text{гр}} = 0,1$  м/сут;  $T = 3,0$  м;  $l_p = 1,27$  м.

$$q_{\text{шв,днопрод}} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_0 + \delta_o + T) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{шв}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (1,17 + 0,1 + 3,0) \cdot 6,20}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,1}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,638 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– поперечный шов на откосах –  $l_{\text{шв,отк}} = 1,65$  м;  $\delta_{\text{шв,отк}} = 0,10$  м;

$$h_{\text{о,ср}} = \frac{h_0}{2} = \frac{1,27}{2} = 0,585 \text{ м};$$

$$q_{\text{шв,отк}} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_{\text{о,ср}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{шв}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,585 + 0,1 + 3,0) \cdot 1,65}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,1}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,167 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– большая трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 5,70$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,99$  м:

$$q_{\text{тротк}1} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,99 + 0,1 + 3,0) \cdot 5,70}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,01}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,47 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– средняя трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 2,70$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,006$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,80$  м:

$$q_{\text{тротк}2} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,80 + 0,1 + 3,0) \cdot 2,70}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,006}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,212 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– малая трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 1,60$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,002$  м;  $h_{\text{тр}} = 1,20$  м:

$$q_{\text{тротк}3} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (1,2 + 0,1 + 3,0) \cdot 1,60}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,002}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,117 \text{ м}^3/\text{сут};$$

– волосяная трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 0,50$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,001$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,45$  м:

$$q_{\text{тротк}4} = \frac{\pi \cdot k_{\text{гр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,45 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,50}{\text{Arsh} \left( ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,001}{2 \cdot 1,27} \right)} = 0,134 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Суммарные потери через трещины и швы бетонной облицовки на длине участка  $l_{\text{уч}} = 6,2$  м, с учетом левого и правого участка дна и откосов оросительно-го канала будут равны:

$$\begin{aligned} Q_{\text{потсум}} &= 2 \cdot (q_{\text{швдннпер}} + q_{\text{швдннпрод}} + q_{\text{тротк1}} + q_{\text{тротк2}} + q_{\text{тротк3}} + q_{\text{тротк4}} + q_{\text{швотк}}) = \\ &= 2 \cdot (0,103 + 0,638 + 0,167 + 0,47 + 0,212 + 0,117 + 0,034) = 3,482 \text{ м}^3/\text{сут}. \end{aligned}$$

Удельные потери на 1 п. м. длины канала составляет:

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{потсум}}}{l_{\text{уч}}} = \frac{3,482}{6,2} = 0,56 \text{ м}^3/\text{сут на 1 п. м.}$$

Удельные потери на 1 м<sup>2</sup> поверхности облицовки будут равны:

– при  $\chi_{\text{кан}} = b + 2 \cdot l_{\text{отк}} = 2 + 2 \cdot 1,95 = 5,9$  м:

$$q_{\text{уд}1\text{м}^2} = \frac{q_{\text{уд}}}{\chi_{\text{кан}}} = \frac{0,56}{5,9} = 0,095 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}^2.$$

Допускаемые потери на фильтрацию для пленочных покрытий каналов мелиоративных систем (согласно В. С.Алтунину и др. [12]) составляет от 7 до 10 л/(сут·м<sup>2</sup>). Полученные результаты расчета показывают, что на канале 10–Х–4 удельные потери на фильтрацию составляют:

$$q_{уд_{1,м^2}} = 0,095 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}^2) = 95,0 \text{ л}/(\text{сут} \cdot \text{м}^2),$$

что в 9 раз превышает допускаемые потери для пленочных облицовок. Такие большие потери на фильтрацию обусловлены значительными повреждениями бетонной поверхности облицовки в виде разрушенных деформационных швов и трещин разной шириной раскрытия.

Для оценки потерь воды на фильтрацию после проведения ремонта полимерными композиционными материалами, автором были проведены повторные исследования отремонтируемого участка спустя 12 месяцев. В результате обследования бетонной поверхности облицовки, на местах где ранее производился ремонт разрушений обнаружено не было. За прошедшее время, в процессе эксплуатации оросительного канала по дну и на его откосе образовались незначительные повреждения в виде трещин различной длины и ширины раскрытия, результаты которых приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Обнаруженные дефекты и повреждения бетонной облицовки канала 10–Х–4 после проведения ремонта повреждений

Наименование дефекты или повреждения	Глубина канала, $h_0$ , м	Параметр дефекта или повреждения	
		Ширина повреждения, $\delta_{повр}$ , м	Длина повреждения, $l_{повр}$ , м
Малая трещина на откосе	0,99	0,003	0,9
Малая трещина на откосе	0,80	0,002	0,38
Малая трещина на откосе	1,20	0,002	0,22
Волосяная трещина на откосе	0,45	0,001	0,17
Волосяная трещина на откосе	0,45	0,001	0,14

Результаты расчетов водопроницаемости бетонной облицовки после ремонта представлены ниже.

– малая трещина на откосе –  $l_{тр_{отк}} = 0,90$  м;  $\delta_{тр} = 0,003$  м;  $h_{тр} = 0,99$  м:

$$q_{тр_{отк}} = \frac{\pi \cdot k_{гр} \cdot (h_{тр} + \delta_o + T) \cdot l_{тр}}{Arsh\left(ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{тр}}{2l_p}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,99 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,90}{Arsh\left(ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27} / \frac{3,14 \cdot 0,003}{2 \cdot 1,27}\right)} = 0,067 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

– малая трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 0,38$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,002$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,80$  м:

$$q_{\text{тротк}2} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{\pi \cdot T}{l_p}}{\frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,80 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,38}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27}}{\frac{3,14 \cdot 0,002}{2 \cdot 1,27}}\right)} = 0,027 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

– малая трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 0,22$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,002$  м;  $h_{\text{тр}} = 1,20$  м:

$$q_{\text{тротк}3} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{\pi \cdot T}{l_p}}{\frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (1,20 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,22}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27}}{\frac{3,14 \cdot 0,002}{2 \cdot 1,27}}\right)} = 0,016 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

– волосяная трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 0,14$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,001$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,45$  м:

$$q_{\text{тротк}4} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{\pi \cdot T}{l_p}}{\frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,45 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,14}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27}}{\frac{3,14 \cdot 0,001}{2 \cdot 1,27}}\right)} = 0,009 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

– волосяная трещина на откосе –  $l_{\text{тротк}} = 0,12$  м;  $\delta_{\text{тр}} = 0,001$  м;  $h_{\text{тр}} = 0,45$  м:

$$q_{\text{тротк}5} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_{\text{тр}} + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{\pi \cdot T}{l_p}}{\frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2l_p}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,45 + 0,1 + 3,0) \cdot 0,12}{\text{Arsh}\left(\frac{ch \frac{3,14 \cdot 3,0}{1,27}}{\frac{3,14 \cdot 0,001}{2 \cdot 1,27}}\right)} = 0,008 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Суммарные потери через образовавшиеся трещины бетонной облицовки на длине участка  $l_{\text{уч}} = 6,2$  м, с учетом левого и правого участка канала будут равны:

$$\begin{aligned} Q_{\text{потсум}} &= 2 \cdot (q_{\text{тротк}1} + q_{\text{тротк}2} + q_{\text{тротк}3} + q_{\text{тротк}4} + q_{\text{тротк}5}) = \\ &= 2 \cdot (0,067 + 0,027 + 0,016 + 0,009 + 0,008) = 0,254 \text{ м}^3/\text{сут.} \end{aligned}$$

Удельные потери на 1 п. м. длины мелиоративного канала составляет:

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{потсум}}}{l_{\text{уч}}} = \frac{0,254}{6,2} = 0,041 \text{ м}^3/\text{сут на 1 п. м.}$$

Удельные потери на 1 м<sup>2</sup> поверхности облицовки будут равны:

– при  $\chi_{\text{кан}} = b + 2 \cdot l_{\text{отк}} = 2 + 2 \cdot 1,95 = 5,9$  м:

$$q_{\text{уд}_{\text{м}^2}} = \frac{q_{\text{уд}}}{\chi_{\text{кан}}} = \frac{0,041}{5,9} = 0,0069 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}^2.$$

Результаты исследований показывают, что потери воды через повреждения в бетонной облицовке по дну и на откосах оросительного канала до ремонта, которые составляют – 95 л/сут на 1 м<sup>2</sup> снизились после заделки повреждений в 13,8 раз и составляют – 6,9 л/сут на 1 м<sup>2</sup>, что свидетельствует о целесообразности применения жидких полимерных композиционных материалов для ремонта крупных и средних повреждений бетонных облицовок.

Анализируя результаты исследований, отмечено, что полученные значения потерь воды на фильтрацию значительно сократились. Однако в случае, когда заделка повреждений жидкой резиной проводится не по всей поверхности облицовки, возможны некоторые утечки, через волосяные трещины. Для их предотвращения рекомендуется механизированное напыление материала по всему сечению канала, с целью получения бесшовной мембраны, исключаяющей полностью все фильтрационные потери.

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

1. Выполненные экспериментальные исследования водопроницаемости трещин бетонных облицовок каналов мелиоративных систем на фильтрационной колонке, позволили получить эмпирические зависимости для определения удельного фильтрационного расхода от напора и ширины раскрытия трещин при различных исходных данных.

2. На основе экспериментальных исследований водопроницаемости закольматированных трещин бетонных облицовок каналов на фильтрационной колонке установлено, что кольматация в течение 7 дней позволила уменьшить потери воды на участке оросительной системы в 1,4–1,5 раз, а в натуральных условиях (при периоде кольматации 3–5 месяцев) – в 2–3 раза.

3. Получены новые эмпирические расчетные зависимости, которые имеют достаточно высокое значение достоверности аппроксимации для сквозных трещин ( $R^2=0,96-0,98$ ), а также для закольматированных ( $R^2=0,95-0,97$ ) трещин бетонных облицовок каналов, что позволяет их рекомендовать для дальнейшего использования.



4. Проведены натурные обследования технического состояния участков Азовского, Багаевского и Нижне-Донского оросительных каналов, позволили выявить дефекты, заключающиеся в деформации русел, разрушение противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий, а также причины их образования. Наряду с этим в натуральных условиях выполнено исследование ремонта бетонной облицовки канала полимерным композиционным материалом (на распределительном канале 10–Х–4 Багаевской оросительной системы в Мартыновском районе Ростовской области), по результату которого потери воды через повреждения в бетонной облицовке были снижены в 13,7 раз.

5. Основными причинами образования дефектов на бетонных облицовках мелиоративных каналов являются перепады температур в осенне-зимний и весенний период (особенно, при наличии воды), истирание бетонной поверхности наносами, прорастание камыша в деформационных швах и другие.

## ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

### 4.1 Новый способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок мелиоративных каналов

Автором [87] разработан способ ремонта и герметизации дефектов и повреждений бетонных облицовок каналов (патент № 2669302), который рекомендуется к применению для ремонта различных повреждений бетонных облицовок мелиоративных систем.

Подобные технические и компоновочные решения использованы в ряде патентов на изобретения РФ [83–85], однако, они имеют существенные недостатки.

Так, способ ремонта бетонных облицовок и конструкций [84], включает следующий состав ремонтных работ по удалению дефектного участка покрытия: прогрев его до температуры 70–110 °С на глубину не менее 10 мм и заполнение подготовленного участка предварительно нагретым жидким композитным материалом (до температуры 110–170 °С), который представляет собой смесь серного вяжущего и минерального наполнителя.

Основной недостаток этого способа – сложность проведения ремонтных работ бетонных элементов, заключающийся не только в нагреве строительного материала, но и в прогреве дефектного участка покрытия до температуры 70–110 °С. Кроме того, в данном техническом решении отсутствует возможность ремонта крупных повреждений (например, деформационных швов и других больших дефектных участков покрытия).

Другой способ ремонта железобетонных конструкций (патент [83], опубл. 28.02.1991), включает заделку трещин мастикой на основе полиэфирной смолы, состоящей из определенных компонентов в процентном соотношении.

Недостатком данного способа является ограниченность его применения при ремонте значительных повреждений, поскольку мастикой возможно производить заделку только небольших трещин и щелей. Кроме этого, применяемая мастика на

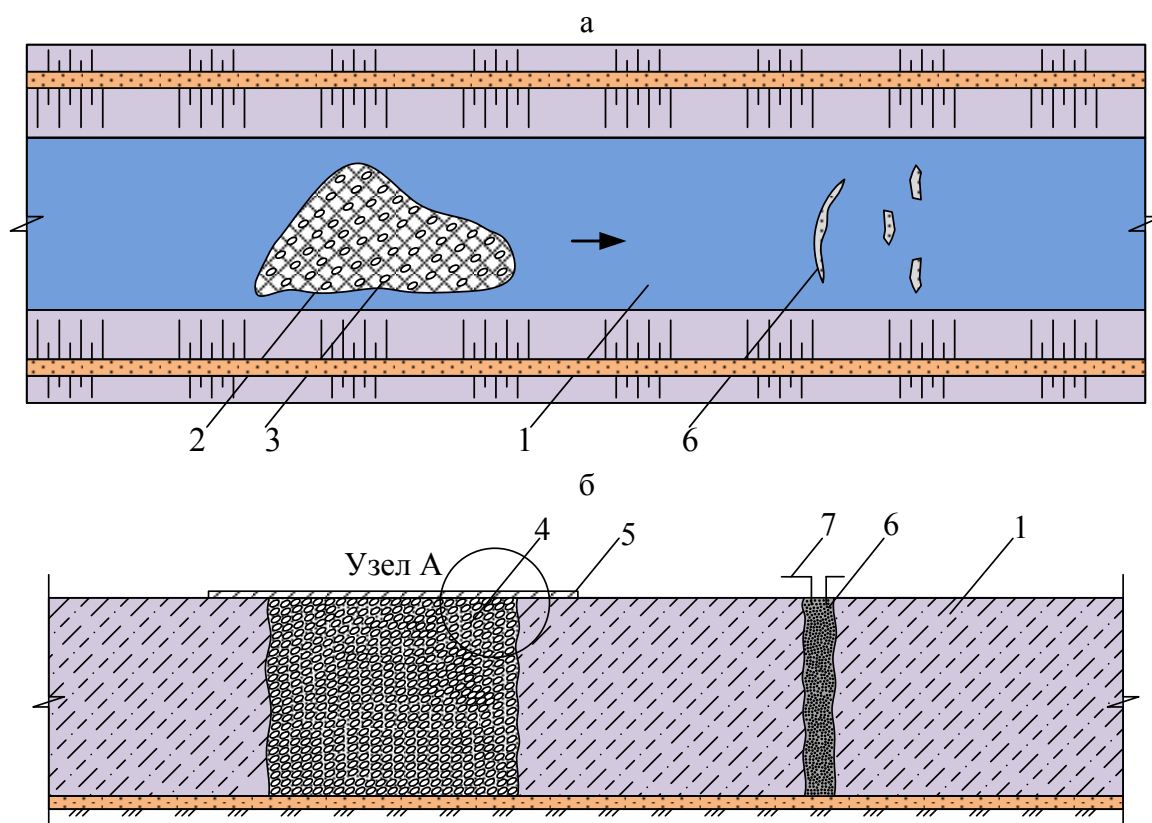
основе полиэфирной смолы и других компонентов является недолговечной, после нескольких сезонов эксплуатации сооружения будет разрушаться.

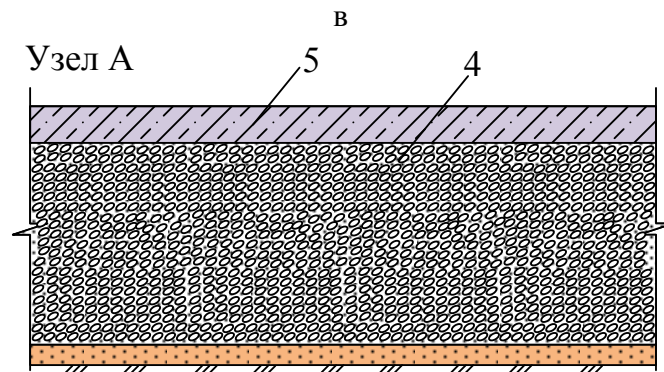
Наиболее близким техническим решением является способ ремонта бетонных элементов (патент РФ № 2148690, опубл. 10.05.2000), который включает удаление дефектного участка бетона и продуктов разрушения бетонного покрытия, нанесение адгезионного слоя, заполнение дефектного участка бетона строительным материалом, его разравнивание и заделку фибры в свежееуложенный бетонный раствор.

Недостаток данного конструктивно-технологического решения заключается в длительности сроков ремонта бетонных облицовок и низких физико-механических показателей после его выполнения.

Целью способа (по патенту на изобретение РФ № 2669302 [87]) заключается в повышении эффективности ремонта различных повреждений на поверхности бетонных облицовок каналов мелиоративных систем.

С этой целью предлагается способ ремонта крупных повреждений (деформационных швов и поверхностных разрушений бетона мелиоративных каналов), а также герметизации малых повреждений (трещин, сколов, раковин), рисунок 4.1.





а – план канала; б – схема ремонта крупных и малых повреждений в бетонной облицовке; в – узел А (ремонт крупных повреждений); 1 – бетонная облицовка; 2 – крупные повреждения; 3 – дефектный участок; 4 – щебеночно-гравийный материал; 5 – жидкая композиция; 6 – малые повреждения; 7 – инъекторы

Рисунок 4.1 – Способ ремонта крупных и малых повреждений в бетонной облицовке мелиоративного канала

Использование данного способа позволяет обеспечить надежность, срок службы и водонепроницаемость повреждений бетонных облицовок каналов, а также наименьшую шероховатость отремонтированного участка.

Для ремонта крупных дефектов бетонных облицовок с шириной  $b_{\text{пов}} \geq 0,05$  м осуществляют заделку разрушенного участка гравийно-щебеночным составом с последующим нанесением на поверхность повреждения водонепроницаемой полимерной композицией, а герметизацию малых повреждений в бетонных облицовках  $b_{\text{пов}} \leq 0,05$  м опроизводят путем нагнетания под давлением полимерной композиции через установленные на дефектных участках трубчатых инъекторах (см. рисунок 4.1). При этом, для герметизации малых повреждений жидкая полимерная композиция представляет собой смесь с соотношением компонентов, масс. %: жидкий битум 60, бентонит 30, антифрикционные добавки 10.

Способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок мелиоративных каналов выполняется в следующей последовательности. Все работы по обнаружению, ремонту и герметизации повреждений на бетонных облицовках каналов производятся при опорожнении каналов в весенний или осенний период. После опорожнения воды из каналов при обнаружении повреждений на бетонной облицовке выполняют подготовку участка покрытия с разрушениями, которая заключается в очистке поверхности облицовки от пыли, ила и других крупных включений вблизи места повреждения. При ремонте крупных повреждений с шириной

$b_{\text{пов}} \geq 0,05$  м (деформационных швов, подплитного пространства, больших трещин) производится заполнение разрушенного участка гравийно-щебеночным материалом с последующим нанесением поверхности водонепроницаемой полимерной композицией. С целью обеспечения адгезионной прочности полимерная композиция наносится дополнительно на стенки и бетонную поверхность облицовки с каждой из ее сторон на расстояние 5–10 см. Ремонт малых повреждений ( $b_{\text{пов}} \leq 0,05$  м) в бетонных облицовках выполняется путем нагнетания под давлением полимерной композиции через установленные в повреждениях трубчатые иньекторы.

Применяемая для ремонта малых повреждений полимерная композиция производится в соотношении компонентов, масс. %: жидкий битум 60 %, бентонит 30%, антифрикционные добавки 10 %. При нанесении на поврежденный участок жидкой полимерной композиции происходит залечивание повреждений за счет полимеризации жидкой композиции с последующим затвердеванием композиции и полимера, что обеспечивает прочность и высокую адгезию композиции. При необходимости использования более жидкой композиции в состав вводится: битум – в соотношении 50 %, бентонит – 30 %, антифрикционные добавки – 20 %.

Преимуществом разработанного способа является повышение эффективности проведения ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов мелиоративных систем, а также увеличение прочности, надежности и продление срока службы бетонных покрытий.

#### **4.2 Технология и способ ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов полимерным композиционным материалом жидкая резина**

Для ремонта бетонных облицовок оросительных каналов известен способ (патент РФ 2612419 [86], опубл. 09.03.2017), включающий удаление дефектного участка покрытия, нанесение жидкого бетона с толщиной слоя  $\delta = 0,05$  м, укладку на жидкий бетон полимерной профилированной геомембраны жесткими ребрами вниз. При наличии больших повреждений с шириной  $b_{\text{пов}} \geq 1,5$  м, на слой бетона дополнительно производится укладка полимерной геосетки. Ширина полоски профилированной геомембраны определяется в зависимости от размеров по-

вреждения бетонной облицовки, с учетом запаса не менее 0,05–0,10 м. Недостатком данного способа является сложность производства работ, связанная с ремонтом небольших повреждений в виде деформационных швов, трещин и щелей с помощью листовых полимерных материалов, а также невозможность и нецелесообразность их укладки в труднодоступных местах и на малых повреждениях. Кроме того, при использовании профилированной мембраны требуется подготовка и укладка дополнительного слоя бетона, необходимого для ее крепления к подстилающему основанию.

Для ремонта бетонных и железобетонных покрытий известен другой способ (патент РФ 2212487 [84], опубл. 20.09.2003), включающий удаление поврежденного участка покрытия, прогрев его до температуры 70–110 °С на глубину не менее 20 мм и заполнение этого участка предварительно нагретым строительным материалом (до температуры 110–170 °С) – смесью серного вяжущего и минерального наполнителя в процентном соотношении. Недостатком данного способа является – сложность производства работ по ремонту бетонных и железобетонных конструкций, необходимость нагрева строительного материала, а также дополнительного подогрева поврежденного участка покрытия до температуры 70–110 °С.

В другом способе, который является наиболее близким техническим решением, предлагается ремонт железобетонных (патент РФ 2148690, опубл. 10.05.2000), в котором осуществляется послойное удаление поврежденного участка покрытия, нанесение композитного материала с образованием адгезионного слоя, нанесение поврежденного участка строительным материалом, его разравнивание и втапливание поверхностью с фибрами в свежееуложенную смесь. Недостатком данного способа является его низкая эксплуатационная надежность и недолговечность, связанная с применением быстроразрушающихся (особенно под воздействием воды и атмосферных осадков) строительных материалов на основе мелкозернистого бетона, армированного фиброй.

На основе анализа рассматриваемых способов и технологий ремонта бетонных поверхностей, автором разработана технология и способ ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов мелиоративных систем с использова-

нием полимерного композиционного материала жидкая резина – патент на изобретение РФ № 2732588 [88].

Жидкая резина представляет собой модифицированную битумно-латексную эмульсию, которая поставляется в виде двух компонентов, компонента А (эмульсии) и компонента Б (реагент) состоит из эмульсии соли и модификатора, значительно увеличивающего прочностные, деформативные и эластичные свойства материала. Ее дисперсная система состоит из двух взаимно нерастворимых жидкостей (в виде битума и воды) в другой дисперсной среде (воде) в виде мельчайших частиц, покрытых тонким слоем эмульгатора, обеспечивающего технологическую устойчивость такой системы.

Для сырья используют два компонента – полимерно-битумную эмульсию, которая поставляется в бочках (компонент А), и закрепитель (компонент Б), разводимый в воде. Компонент Б – раствор гидратированного или кальцинированного хлористого кальция в воде ( $\text{CaCl}_2$ ) массовая доля которого в растворе составляет 10–15 %. Соотношение компонентов 1:8/10 (1 л растворенного в воде  $\text{CaCl}_2$  на 8/10 литров компонента А).

Такой состав жидкого гидроизоляционного раствора быстро твердеет, что является основным преимуществом данного материала. Вследствие химической реакции между компонентами возникает очень гибкая и прочная мембрана. Кроме того, материал включает компоненты, которые экологически чисты и не выделяют вредных веществ.

Технические характеристики жидкой резины приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики жидкой резины

Характеристики	Ед. изм.	Показатели
Водонепроницаемость покрытия после нанесения при давлении 0,002 МПа	сут	в течение 3 сут
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1000–1100
Общая часть нелетучих веществ	%	58–64
Отверждение поверхности покрытия после нанесения	ч	24
Прочность покрытия (адгезия к бетону)	МПа	10,0–14,0
Относительное удлинение при разрыве	%	700–1000
Толщина покрытия	мм	2,0–6,0

К преимуществам битумно-полимерной мастики типа жидкой резины относятся:

- высокая адгезия к бетону, металлу и другим строительным материалам;
- нанесение материала на существующую гидроизоляцию;
- обеспечение полной водонепроницаемости;
- монолитность покрытия и отсутствие швов после нанесения;
- высокая гибкость и прочность применяемого материала;
- материал защищен от механического и химического воздействия;
- устойчивость к температурным колебаниям;
- длительный срок эксплуатации покрытия;
- экономичность материала за счет использования способа напыления.

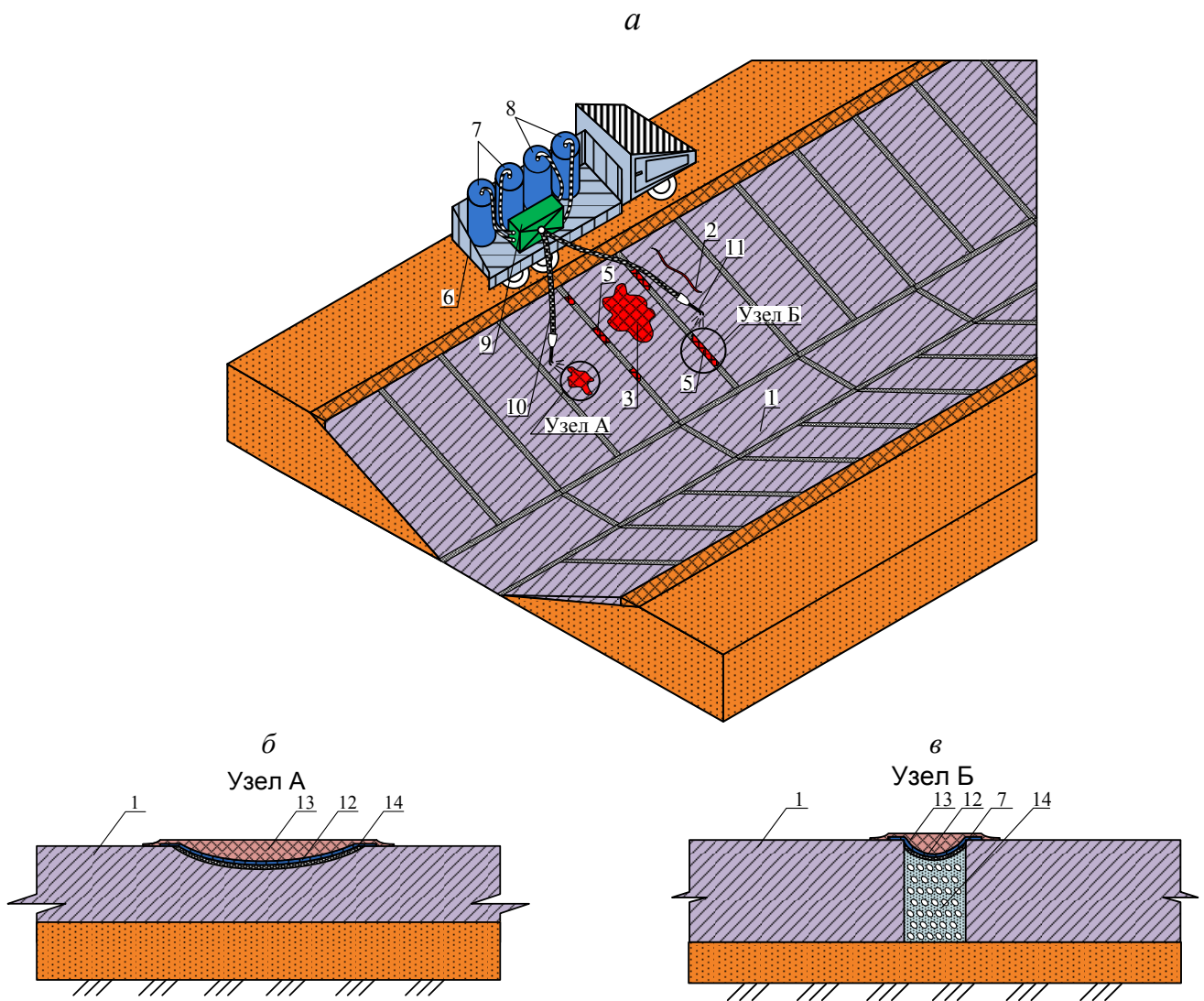
Процесс нанесения композиции может осуществляться как механическим, так и ручным способами. При механическом способе используются безвоздушные установки: отечественные мобильные устройства на бензиновом двигателе УЖК-2, ДУГА и зарубежные устройства RUBBER SPRAY-20, RX-27. Эти устройства не требуют дополнительного источника электропитания, отвечают всем стандартам безопасности и могут эксплуатироваться при выполнении самых сложных работ. При ручном способе используются валики, шпатели и кисточки.

Целью предлагаемой технологии является повышение эффективности ремонта различных повреждений на бетонных облицовках длительно работающих каналов мелиоративных систем, которая заключается в повышении надежности, долговечности и водонепроницаемости повреждений бетонных облицовок длительно работающих каналов мелиоративных систем, а также продления срока их службы и обеспечения наименьшей шероховатости отремонтированного участка.

Результат достигается за счет способа ремонта бетонных облицовок, в котором сначала осуществляют подготовку разрушенного участка, включающую удаление разрушения бетонного покрытия, нанесение связующего материала и заполнение разрушенного участка строительным материалом. Ремонт дефектов покрытия осуществляется в четыре этапа и включает очистку поверхности бетонной облицовки, праймирование с использованием механизированного оборудования, в состав которого входит емкость с компонентом А и компонентом Б, компрессорная установка, гибкие шланги с двухканальными распылителями, напыление на поврежденную поверхность бетонной облицовки тонкого слоя компонента А,



укладку полотна тканого или нетканого геотекстиля и устройство финишного покрытия с использованием компонента Б, наносимого поверх геотекстиля сплошным слоем с толщиной от 3 до 6 мм. Ремонт крупных повреждений с большой шириной раскрытия более 3 см производится заполнением повреждения песчано-гравийным материалом с его разравниванием, уплотнением и последующим выполнением финишного покрытия. Компонент А представляет собой полимерно-битумную эмульсию, а компонент Б – в виде закрепителя поверхности. Соотношение компонентов принимается 1:8 (рисунок 4.2).

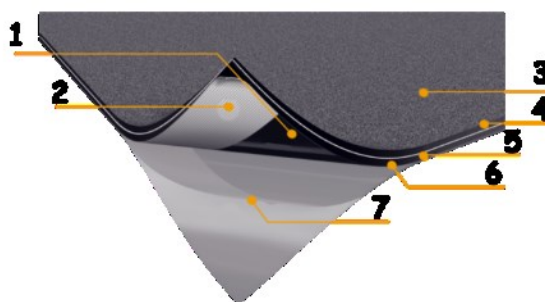


- а – план-схема канала с размещением оборудования для ремонта бетонной облицовки;  
 б – схема ремонта поверхностных повреждений в бетонной облицовке канала;  
 в – схема ремонта деформационных швов и трещин; 1 – бетонная облицовка; 2 – повреждение в виде удлиненной (волосяной) трещины; 3 – локальное повреждение в бетонной облицовке;  
 4 – песчано-гравийный наполнитель; 5 – повреждение в деформационном шве;  
 6 – механизированное оборудование; 7 – емкость с компонентом А (реагентом); 8 – емкость с компонентом Б; 9 – компрессорная установка; 10 – гибкие шланги; 11 – распылитель двухканальный; 12 – геотекстиль; 13 – финишное покрытие

Рисунок 4.2 – Схема ремонта бетонной облицовки оросительного канала

### 4.3 Способ ремонта бетонных облицовок мелиоративных каналов наплавленными геомембранами

Автором предлагается способ ремонта бетонных облицовок каналов гидро-мелиоративных систем наплавленными мембранами, одной из которых является «Теганар». Данный материал представляет собой однослойную систему подобранных материалов для гидроизоляции подземных и наземных инженерных сооружений, находящихся под постоянным воздействием воды. Структура предлагаемого ремонтного материала представлена на рисунке 4.3.



- 1 – легкоплавкая полимерная пленка; 2 – защитная полоса из крафт-бумаги;  
 3 – мелкозернистая посыпка (песок); 4, 6 – модифицированный битум;  
 5 – нетканная полиэфирная основа; 7 – защитная полиэтиленовая пленка

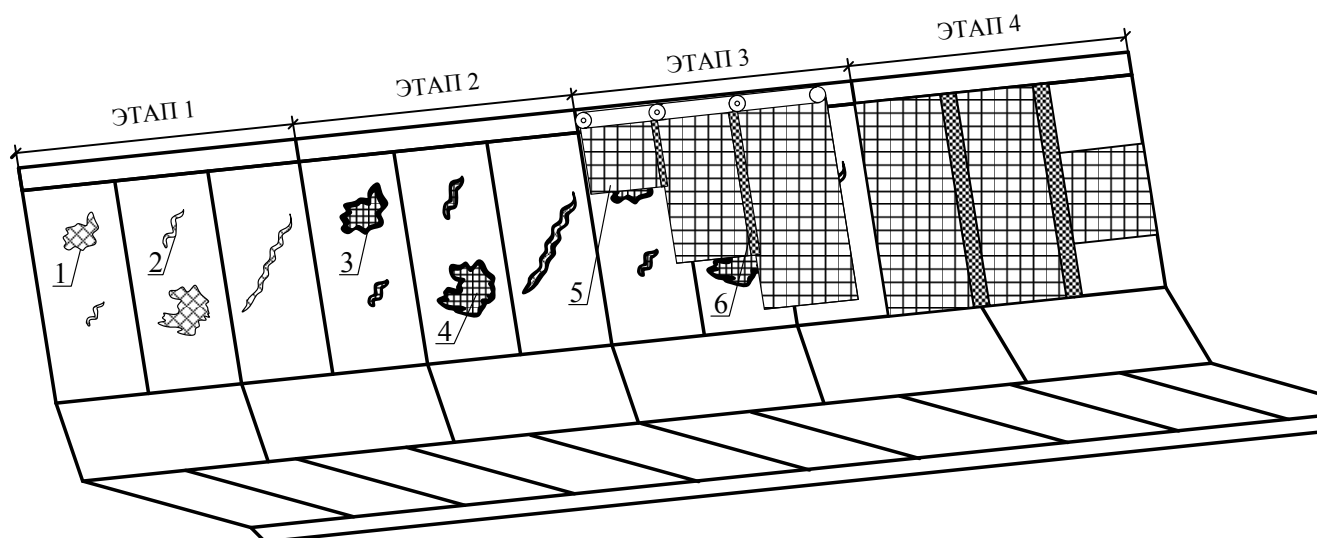
Рисунок 4.3 – Структура ремонтной наплавленной мембраны

Технические характеристики предлагаемого к использованию в мелиоративном строительстве материала представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные физико-технические характеристики наплавленной мембраны

Наименование характеристики	Технический показатель
Толщина материала	4,0 мм
Ширина и длина рулона	2,0×20 м
Вес рулона	205 кг
Основа	Нетканый полиэстер
Плотность основы	243 г/м <sup>2</sup>
Теплостойкость	120 °С
Разрывная сила при растяжении,	950 (1137) Н/50 мм
Относительное удлинение при разрыве	49 %
Водонепроницаемость при гидростатическом давлении	0,2 МПа

Предлагаемый способ ремонта повреждений бетонных облицовок канала включает четыре основных этапа, которые представлены на рисунке 4.4.



- 1 – локальное повреждение в виде выбоены на поверхности облицовки; 2 – повреждение в виде трещины; 3 – праймирующий слой битумно-полимерным материалом; 4 – армирующий слой геотекстиля; 5 – раскладываемый ремонтный наплавляемый материал; 6 – уплотнение деформационных швов после наплавления геомембраны

Рисунок 4.4 – Технология ремонта участков бетонных облицовок каналов наплавляемыми битумно-полимерными геомембранами

На первом этапе выполняется подготовка бетонной поверхности облицовки: производится ее очистка от пыли компрессорной установкой, от растительности и мусора. Повреждения в виде выбоен, сколов и трещин зачищают металлической щеткой, для лучшей адгезии с наносимым ремонтным материалом. Деформационные швы заполняются песчано-щебеночной смесью.

На втором этапе производится праймирование ремонтируемых повреждений при помощи битумно-полимерных материалов по всей их площади с последующим армированием для большей надежности геотекстилем.

На третьем этапе рулоны с материалом раскатывают по всему сечению канала в местах с наибольшим количеством повреждений, в случае если на поверхности облицовки малое количество разрушений, то материал наносится локально. Все соединения в местах перехлеста наплавляются горелкой и уплотняются металлическими валиками для большей адгезии (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Сварка нахлестных швов при помощи газовой горелки

Ширина швов между полотнами принимается равной 15 см. В отдельных случаях ширина шва увеличивается в зависимости от конструкции ремонтируемого участка.

На четвертом этапе производится оценка качества выполненного ремонтного покрытия на наличие дефектов, для максимального эффекта ремонтируемым материалом по всей площади бетонной облицовки производится уплотнение металлическими валиками нанесенного материала.

Применение наплавляемых геомембран позволяет быстро и качественно произвести ремонт участка канала, где обнаружено значительное количество повреждений и дефектов. При наличии только отдельных повреждений ремонт осуществляется локально в виде латок, вырезанных из рулона геомембраны. При этом на латках должны предусматриваться достаточные запасы геомембраны (не менее 30–50 см от краев повреждений).

Так как наплавляемые геомембраны имеют гладкую верхнюю поверхность с коэффициентом шероховатости 0,012–0,014, то ее можно использовать для снижения шероховатости ремонтируемой поверхности канала и соответственно повышения пропускной способности канала. В этом случае предусматривается сплошное покрытие сечения канала наплавляемой геомембраной.

Долговечность (срок службы) наплавляемой геомембраны составляет 20–25 лет, что позволяет продлить срок службы бетонной облицовки канала.

#### 4.4 Продление срока службы бетонной облицовки канала путем нанесения жидкой резины

Срок службы бетонных облицовок мелиоративных систем без проведения капитального ремонта (при значительном трещинообразовании, разрушении бетона в виде «шелушения», а также разгерметизации деформационных швов) составляет в среднем 25–30 лет. Однако для ГТС I–II класса, в том числе каналов оросительных систем, согласно СП 58.13330.2012 должен составлять не менее 100 лет, а для III–IV класса – не менее 50 лет.

В связи с этим необходимо для продления срока службы бетонных облицовок каналов предусмотреть планомерно-предупредительные или же капитальные ремонты через 20–25 лет их эксплуатации. Такие ремонты позволят продлить срок службы облицовок до 50 лет и более, что будет вполне достаточно для каналов оросительных систем III–IV класса.

Для оценки продления долговечности бетонной облицовки мелиоративного канала выполним расчет срока службы ее до и после ремонта, используя обобщенное уравнение Аррениуса [48, 58, 73, 74, 109]:

$$\ln S = \ln S_0 - K'' \cdot t \cdot e^{-\frac{Q}{E}}, \quad (4.1)$$

где  $S$  – мгновенная прочность, МПа;

$S_0$  – начальная прочность, МПа;

$Q$  – энергия активации;

$E$  – энергия реакции;

$K''$  – включает в себя константы  $K$  и  $K'$ , и является функцией концентрации веществ, а также их природы;

$K$  – константа, зависящая от материала;

$K'$  – константа, характеризующая размер дефекта.

Преобразуя уравнение (4.1), получаем уравнение для расчета срока службы бетонной облицовки мелиоративного канала без ремонта защитным покрытием из жидкой резины:

$$t = \frac{\ln S_0 - \ln S}{K \cdot e^{-\frac{\rho}{E}}} \quad (4.2)$$

Параметр  $K$  принимается в зависимости от изменения свойств бетона, который определяется по графику (рисунок 4.6) и составляет  $K = 0,0548$ .

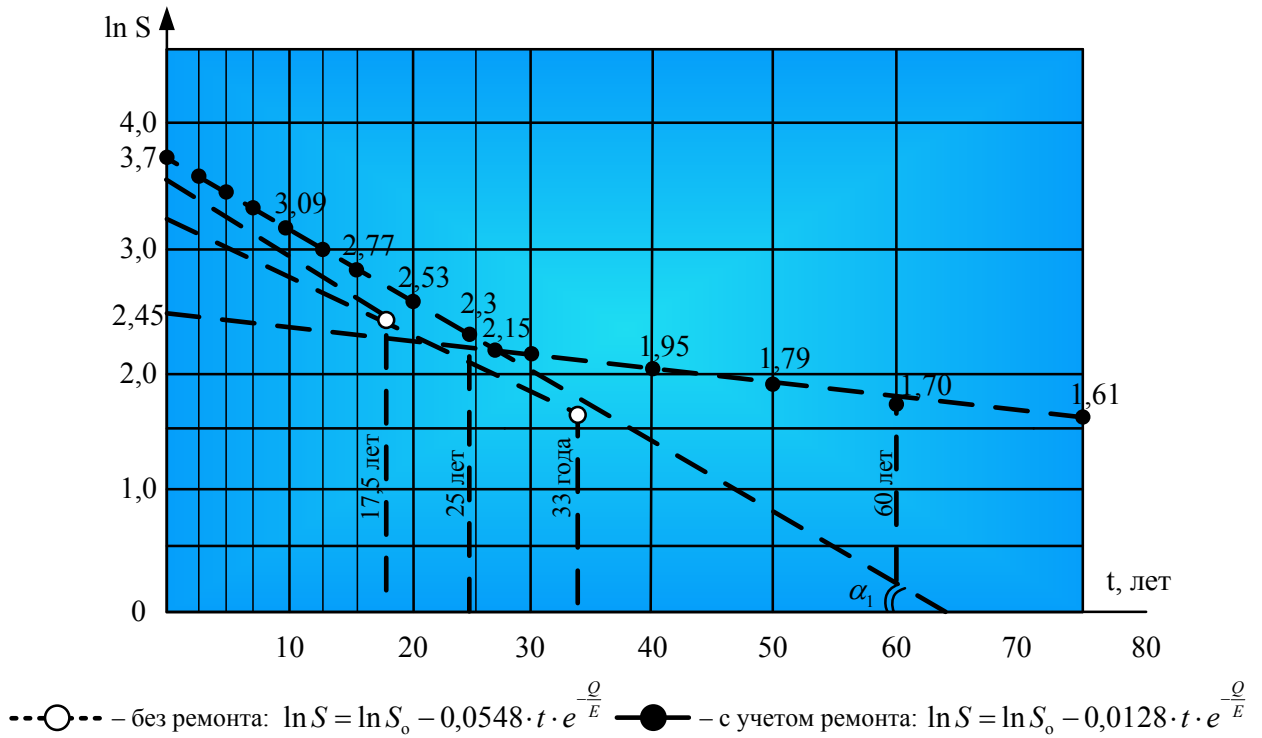
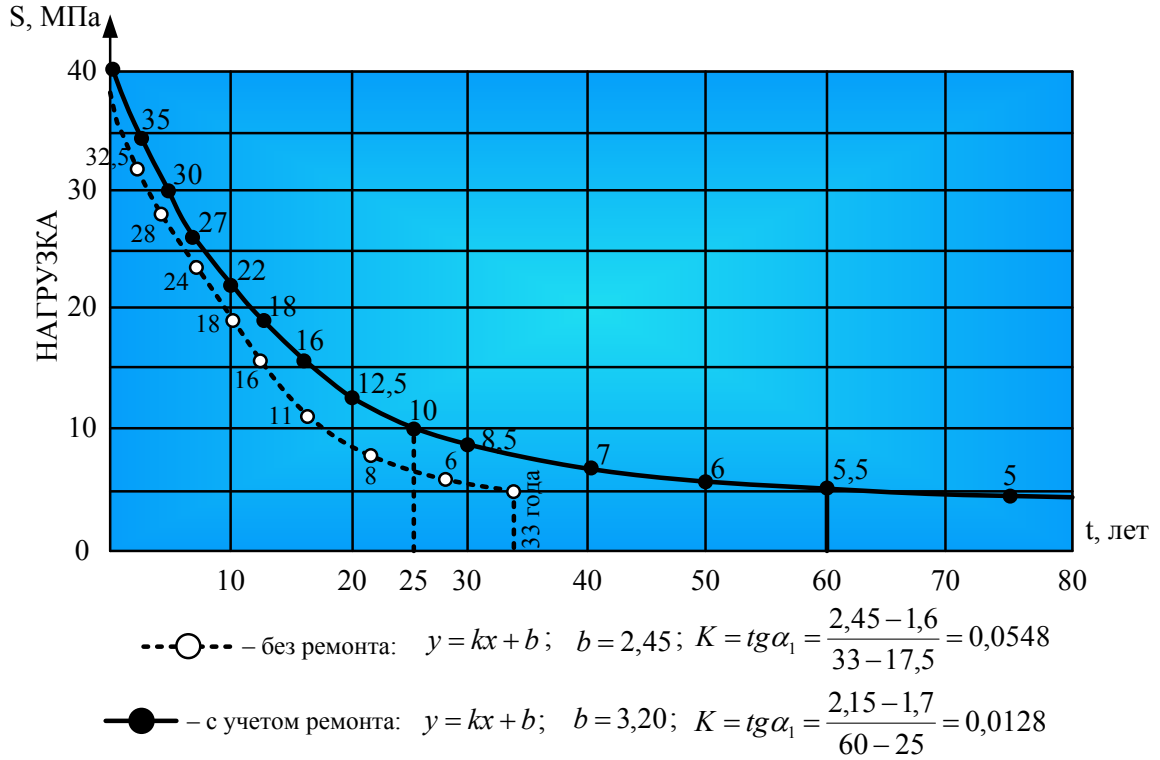


Рисунок 4.6 – График изменения прочности бетона от времени эксплуатации оросительного канала

В связи этим уравнение (4.2) для облицовки без ремонта примет вид:

$$t_{\text{без.рем}} = \frac{\ln S_0 - \ln S}{0,0548 \cdot e^{-\frac{Q}{E}}}. \quad (4.3)$$

Приведем пример расчета со следующими исходными данными.

Исходные данные:  $S_0 = 40$  МПа;  $S = 20$  МПа;  $\frac{Q}{E} = 0,80$ .

Определяем долговечность (срок службы) бетонной облицовки мелиоративного канала до проведения ремонта при  $K = 0,0548$  по формуле (4.3):

$$t_{\text{без.рем}} = \frac{\ln 40 - \ln 20}{0,0548 \cdot e^{-0,75}} = \frac{3,69 - 3,00}{0,0548 \cdot (1/2,223)} = 28,0 \text{ лет.}$$

Вычисляем долговечность бетонного покрытия после ремонта полимерными композиционными материалами при  $K = 0,0128$  по выражению (4.3):

$$t_{\text{рем}} = \frac{\ln 40 - \ln 27}{0,0128 \cdot e^{-0,75}} = \frac{3,69 - 3,30}{0,0128 \cdot (1/2,12)} = 64,7 \text{ года.}$$

Определяем прогнозируемое продление срока службы облицовки мелиоративного канала по формуле:

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{рем}} - t_{\text{без.рем}} \quad (4.4)$$

Подставляя полученные значения  $t_{\text{без.рем}}$  и  $t_{\text{рем}}$  в формулу (4.4) получаем:

$$t_{\text{пр}} = 64,7 - 28,0 = 36,7 \text{ лет.}$$

Таким образом, после ремонта жидкой резиной срок службы бетонной облицовки мелиоративного канала может быть продлен на 36,7 лет.

#### **4.5 Экономическая эффективность ремонта повреждений бетонных облицовок каналов композитными материалами**

Экономический эффект от предлагаемых конструктивно-технических решений при проведении ремонта оросительных каналов включает в себя приведенные затраты с учетом чистого дохода от реализации сельскохозяйственной продукции на единицу дополнительно используемой воды, сэкономленной от потерь на фильтрацию, и вследствие возможного ущерба от подтопления, засоления и заболачивания прилегающей территории.

Расчет экономического эффекта  $\mathcal{E}$ , руб., рекомендуется выполнять по формуле:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 - \varphi \cdot Z_2) \cdot (F_{\text{обл}}/L_{\text{к}})] \cdot L_{\text{к}}, \quad (4.5)$$

где  $Z_1 = C_1 + E_{\text{н}} \cdot K_1$  – приведенные затраты по базовому варианту канала с экраном из бетона, руб./м<sup>2</sup>;

$Z_2 = C_2 + E_{\text{н}} \cdot K_2$  – приведенные затраты по предлагаемому варианту канала с защитным экраном из жидкой резины, руб./м<sup>2</sup>;

$C_1$  и  $K_1$  – эксплуатационные и капитальные затраты по базовому варианту защитного слоя облицовки канала из бетона, руб./м<sup>2</sup>;

$C_2$  и  $K_2$  – эксплуатационные и капитальные затраты по предлагаемому варианту защитного экрана из жидкой резины, руб./м<sup>2</sup>;

$E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности,  $E_{\text{н}} = 0,15$ ;

$F_{\text{обл}}$  – площадь экрана участка канала, м<sup>2</sup>;

$L_{\text{к}}$  – длина канала, км;

Для выполнения экономического расчета предлагаемого материала принимаются следующие исходные данные, которые приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для расчета экономического эффекта по патенту № 2669302

Показатели	Принятые обозначения	Единица измерения	Современное состояние	Базовый вариант	Предлагаемое мероприятие
Расход канала	$Q$	м <sup>3</sup> /с	6,0	6,5	6,5
Длина канала	$L_{\text{к}}$	км	2,0	2,0	2,0
КПД канала	$\eta$	–	0,83	0,87	0,90
Стоимость бетонной облицовки	$K_{\text{обл}}$	руб./м <sup>2</sup>	–	1128,0	1362,0
Площадь облицовки (экрана)	$F_{\text{обл}}$	м <sup>2</sup>	–	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Срок службы экрана	$T$	лет	–	30	65
Продление срока службы	$\Delta T$	лет	–	–	35

Исходя из принятых исходных данных выполняем расчет экономического эффекта по базовому и предлагаемому мероприятию, результаты которых приведены в таблице 4.4.



Таблица 4.4 – Расчет затрат по базовому и предлагаемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. измерения	Расчет показателей
Эксплуатационные затраты по базовому варианту $C_1=0,05 \cdot K_1$	$C_1$	руб./м <sup>2</sup>	$C_1=0,05 \cdot 1128,0=56,4$
Эксплуатационные затраты по предлагаемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	$C_2$	руб./м <sup>2</sup>	$C_2=0,05 \cdot 1362,0=68,1$
Капитальные затраты по базовому варианту	$K_1$	руб./м <sup>2</sup>	1128,0
Капитальные затраты по предлагаемому мероприятию	$K_2$	руб./м <sup>2</sup>	1362,0
Нормативный коэффициент эффективности	$E_n$	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n \cdot K_1$	$Z_1$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_1=56,4+0,15 \cdot 1128,0=225,6$
Приведенные затраты по предлагаемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n \cdot K_2$	$Z_2$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_2=68,1+0,15 \cdot 1362,0=272,4$
Коэффициент приведения срока службы экрана по предлагаемому мероприятию $\varphi = \frac{T_1 / T_{норм} + E_n}{T_2 / T_{норм} + E_n}$ , где $T_1=30$ лет; $T_2=65$ лет; $T_{норм}=50$ лет	$\varphi$	–	$\varphi = \frac{30 / 50 + 0,15}{65 / 50 + 0,15} = 0,517$

Расчет ожидаемого экономического эффекта от предлагаемого мероприятия по сравнению с базовым вариантом осуществляем по формуле (4.5):

$$\mathcal{E} = [(225,6 - 0,517 \cdot 272,4) \cdot (20000/2000)] \cdot 2000 = 1695384 \text{ руб.}$$

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования предлагаемого способа ремонта бетонной облицовки канала протяженностью 2,0 км (по патенту на изобретение РФ № 2669302) составляет 1695384 руб.

Аналогичный расчет экономической эффективности от предлагаемого способа ремонта бетонных облицовок оросительных каналов по патенту на изобретение № 2732588 с учетом использования механизированного нанесения ремонтного состава выполняем с использованием следующих исходных данных, которые приведены в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Исходные данные для расчета экономического эффекта по патенту № 2732588

Показатели	Принятые обозначения	Единица измерения	Современное состояние	Базовый вариант	Внедряемое мероприятие
Расход канала	$Q$	м <sup>3</sup> /с	6,0	6,5	6,5
Длина канала	$L_k$	км	2,5	2,5	2,5
КПД канала	$\eta$	–	0,83	0,87	0,90
Стоимость бетонной облицовки	$K_{обл}$	руб./м <sup>2</sup>	–	1128,0	1362,0
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м <sup>2</sup>	–	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Срок службы экрана	$T$	лет	–	30	65
Продление срока службы	$\Delta T$	лет	–	–	35

Результаты расчетов по базовому и предлагаемому мероприятию приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Расчет затрат по базовому и внедряемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. измерения	Расчет показателей
Эксплуатационные затраты по базовому варианту $C_1=0,05 \cdot K_1$	$C_1$	руб./м <sup>2</sup>	$C_1=0,05 \cdot 1128,0=56,4$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	$C_2$	руб./м <sup>2</sup>	$C_2=0,05 \cdot 1362,0=68,1$
Капитальные затраты по базовому варианту	$K_1$	руб./м <sup>2</sup>	1128,0
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию	$K_2$	руб./м <sup>2</sup>	1362,0
Нормативный коэффициент эффективности	$E_n$	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n \cdot K_1$	$Z_1$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_1=56,4+0,15 \cdot 1128,0=225,6$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n \cdot K_2$	$Z_2$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_2=68,1+0,15 \cdot 1362,0=272,4$
Коэффициент приведения срока службы экрана по внедряемому мероприятию $\varphi = \frac{T_1 / T_{норм} + E_n}{T_2 / T_{норм} + E_n}$ , где $T_1=30$ лет; $T_2=65$ лет; $T_{норм}=50$ лет	$\varphi$	–	$\varphi = \frac{30 / 50 + 0,15}{65 / 50 + 0,15} = 0,517$

Расчет ожидаемого экономического эффекта от предлагаемого мероприятия по сравнению с базовым выполняем по зависимости (4.5):

$$\mathcal{E} = [(225,6 - 0,517 \cdot 272,4) \cdot (25000/2000)] \cdot 2500 = 2119230 \text{ руб.}$$

Исходя из проведенного расчета ожидаемый годовой экономический эффект от использования предлагаемой технологии ремонта бетонной облицовки канала механизированным способом протяженностью 2,5 км (по патенту № 2732588) составляет 2119230 руб.

При технико-экономическом обосновании ремонтно-восстановительных мероприятий следует принимать во внимание ограниченность всех видов лимитируемых ресурсов, необходимых для реализации проекта. Ограниченность воспроизводимых ресурсов (например, трудовых) оценивается исходя из нормативного или директивного срока реконструкции (ремонта) для рассматриваемого объекта.

#### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4**

1. Разработан новый способ по ремонту и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов мелиоративных систем, использование которого позволяет повысить надежность защитных бетонных покрытий, увеличить срок их службы и водонепроницаемость повреждений бетонных облицовок, а также уменьшить шероховатость отремонтированного участка.

2. Разработана технология ремонта бетонных облицовок каналов жидкой резиной (ремонт поверхностных повреждений бетона облицовки большой площади и ремонт разрушенных швов и трещин малой ширины), а также способ ремонта бетонных облицовок каналов наплавляемыми мембранами, который позволяет проводить полный или локальный ремонт поврежденных участков. Один из разработанных способов ремонта (патент № 2732588) апробирован в натуральных условиях на участке мелиоративного канала.

3. Выполнена расчетная оценка эффективности и долговечности защитного покрытия бетонной облицовки мелиоративного канала до и после проведения ремонта жидкой резиной по уравнению Аррениуса. По результатам расчета прогнозный срок службы облицовки канала может быть продлен на 36,7 лет после проведения ремонта по разработанной технологии.

4. Разработанные технологические решения (по патентам на изобретения № 2669302, № 2732588) обладают научно-практической новизной и при соответ-

ствующем обосновании могут быть применимы при проведении текущего (или капитального) ремонта бетонных поверхностей водопроводящих сооружений (оросительных, магистральных или лотковых бетонных и железобетонных каналов) мелиоративных систем.

5. Выполнена оценка экономической эффективности разработанных способов ремонта бетонных облицовок оросительных каналов в сравнении с традиционными методами. Экономический эффект от предлагаемых разработанных мероприятий составляет 1,7 млн руб. при выполнении ремонта без применения специального оборудования и 2,12 млн руб. при использовании механизированной установки для нанесения ремонтного компаунда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ отечественного и зарубежного опыта применения полимерных композитов для ремонта бетонных облицовок оросительных каналов мелиоративных систем показал возможность продления срока их службы за счет использования жидкой резины и наплавляемых геомембран. При этом вода, сэкономленная за счет уменьшения потерь на фильтрацию, может быть использована для орошения дополнительных площадей, повышения КПД каналов в бетонной облицовке до нормативных значений 0,93–0,95.

2. Получены расчетные зависимости для определения водопроницаемости трещин в бетонной облицовке мелиоративного канала при истечении в атмосферу. Разработана гидравлическая модель водопроницаемости бетонной облицовки при наличии трещин и негерметичных (разрушенных) швов, по результатам которых составлены номограммы, позволяющие выполнять расчеты по определению удельного расхода малых повреждений в виде трещин различной ширины раскрытия. Методами теории фильтрации решена задача водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации.

3. Изучены особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки оросительного канала с закольматированными швами с учетом проницаемости основания, где характерны три случая формирования эпюры избыточного давления в условиях двухслойной среды: с полным и неполным насыщением грунта водой, а также при наличии вакуума. Установлено критическое значение отношения коэффициентов фильтрации в закольматированном шве облицовки канала и в основании  $\sigma_{гр} = k_{гр}/k_{кол} = 2,5$ , при котором будет происходить переход от полного насыщения к неполному насыщению грунта основания.

4. В результате экспериментальных исследований водопроницаемости сквозных и закольматированных трещин бетонных облицовок оросительных каналов мелиоративных систем получены эмпирические зависимости для определения удельного расхода ( $q_{уд}$ ) от напора  $h_0=1,0–10,0$  м и ширины раскрытия трещин  $\delta_{тр}=0,001–0,010$  м в облицовке.

5. Оценка технического состояния участков Азовского, Багаевского и Нижне-Донского каналов, позволили выявить деформации русел, разрушение

противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий, а также причины их образования. По результатам работ произведен ремонт бетонной облицовки оросительного канала полимерным композиционным материалом на участке распределительного канала 10–Х–4 Багаевской оросительной системы в Мартыновском районе Ростовской области, после которого потери воды через повреждения в бетонной облицовке снизились в 13,7 раз и составили 6,9 л/сут. на 1 м<sup>2</sup>.

6. Разработан новый способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов (патент № 2669302), использование которого позволяет обеспечить надежность и увеличить срок службы защитного покрытия на 30–35 лет, уменьшить шероховатость отремонтированного участка канала.

7. Предложено конструктивно-технологическое решение по ремонту бетонных облицовок каналов жидкой резиной (патент № 2732588), применение которого позволит производить текущий ремонт длительно эксплуатируемых участков оросительных каналов, выполненных в бетонной облицовке.

8. Проведена расчетная оценка эффективности и долговечности защитного покрытия бетонной облицовки канала с учетом ремонта бетонной поверхности жидкой резиной по зависимости Аррениуса, которая составила 64,7 лет, за счет чего может быть обеспечено продление срока службы облицовки на 36,7 лет.

9. Выполнена оценка экономической эффективности разработанных способов ремонта бетонных облицовок оросительных каналов в сравнении с традиционными методами. Экономический эффект от предлагаемых разработанных мероприятий составляет 1,7 млн руб. при выполнении ремонта без применения специального оборудования и 2,12 млн руб. при использовании механизированной установки для нанесения ремонтного состава.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в исследовании новых композиционных материалов, применяемых для сооружений мелиоративного назначения, отличающихся более высокой надежностью, технологичностью и относительно низкой стоимостью, и разработке на их основе технологий ремонта бетонных сооружений мелиоративных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков, Ф. К. Повышение эффективности облицовочных покрытий оросительных каналов на основе бетонного полотна / Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства. Материалы Междунар. науч.-практ. конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР акад. МАЭП и РАВН Бочкарева Я. В. – Изд-во: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева, 2020. – С. 16–20.
2. Абдразаков, Ф. К. Современные облицовочные материалы для оросительных каналов и требования к ним / Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников // Основы рационального природопользования. Материалы VI Национальной конференции с междунар. участием, Саратов. – Изд-во: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2020. – С. 11–14.
3. Абдразаков, Ф. К. Состояние оросительных каналов Саратовского заволжья и пути повышения их эффективности / Ф. К. Абдразаков, К. И. Чуркина // Аграрный научный журнал, 2020. – № 4. – С. 68–70.
4. Абелишвили, Г. В. Роль фильтрации через трещины и пути повышения водопроницаемости бетонных облицовок каналов / Г. В. Абелишвили, М. Р. Разумовская, Т. Г. Жордания // Труды коорд. совещ. по гидротехнике. – 1971. – № 68 – С. 204–208.
5. Аверьянов, С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. – М.: Колос, 1978. – 288 с.
6. Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. – М.: Колос, 1982. – 237 с.
7. Алимов, А. Г. Натурные исследования противодиффузионных одежд оросительных каналов / А. Г. Алимов, Э. И. Гольденберг, В. М. Иванов // Гидротехника и мелиорация. – 1977. – № 8. – С. 33–38.
8. Алимов, А. Г. Противодиффузионная защита каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – № 4. – 2008. – С. 36–42.

9. Алимов, А. Г. Современные противofiltrационные конструкции защитных облицовок каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 7. – С. 26–36.
10. Алимов, А. Г. Ультразвуковой контроль водонепроницаемости бетона мелиоративных гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 5. – С. 18–21.
11. Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. – М.: Колос, 1979. – 255 с.
12. Алтунин, В. С. Защитные покрытия оросительных каналов / В. С. Алтунин [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1988. – 160 с.
13. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления 2-е изд. перераб. и доп. / А. Д. Альтшуль – М.: Недра, 1982. – 224 с.
14. Ачкасов, Г. П. Технология и организация ремонта мелиоративных гидротехнических сооружений: учеб. пособие / Г. П. Ачкасов, Е. С. Иванов. – М.: Колос. – 1984. – 174 с.
15. Баев, О. А. Обоснование необходимости проведения противofiltrационных мероприятий на оросительных каналах // Экология и мелиорация агроландшафтов: перспективы и достижения молодых ученых, Волгоград, 2019. – Изд-во: ФНЦ Агроэкологии РАН. – С. 128–130.
16. Баев, О. А. Натурные обследования и анализ технического состояния оросительных каналов Республики Дагестан / О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2020. – № 3 (06). – С. 61–72. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=78>. – DOI: 10.31774/2658-7890-2020-3-61-72.
17. Баев, О. А. Особенности гидравлических условий эксплуатации крупных каналов / О. А. Баев, Ю. М. Косиченко // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2019. – № 3 (03). – С. 145–160. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=43>. – DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-145-160.
18. Бандурин, М. А. Совершенствование методов продления жизненного цикла технического состояния длительно эксплуатируемых водопроводящих со-



оружений / М. А. Бандурин // Северо-Кавказский научный центр высшей школы ЮФУ. – Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1 (24) – 28 с.

19. Белов, В. А. Инженерная защита крупных каналов в сложных условиях эксплуатации / В. А. Белов, А. А. Кондратенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2005. – № 1 (129). – С. 87–88.

20. Белогай, С. Г. Гидротехнические сооружения внутрихозяйственной мелиоративной сети / С. Г. Белогай, В. А. Волосухин, А. И. Тищенко. – М.: «Издательский Центр РИОР». – 2013. – 321 с.

21. Бурчак, Т. В. Искусственное пополнение подземных вод. Расчет бассейнов и их систем / Т. В. Бурчак. – Киев: Будівельник, 1986. – 120 с.

22. Васильев, С. М. Технология и организация мелиоративных работ: учеб. пособие / С. М. Васильев, Ю. Е. Домашенко. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 122 с.

23. Ведерников, В. В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа / В. В. Ведерников. – М.-Л.: Госстройиздат, 1939. – 248 с.

24. Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развитие мелиоративного комплекса Российской Федерации на период 2022 до 2031 года (утв. Постановлением правительства РФ от 14.05.2021 г. – № 731). – М. – 2021. – 288 с.

25. Волосухин, В. А. Расчет и эксплуатационный мониторинг лотковых каналов оросительных систем: учеб. пособие / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2007. – 135 с.

26. Ворошнов, С. Н. К вопросу о противофильтрационной эффективности бетонопленочных облицовок оросительных каналов / С. Н. Ворошнов [и др.] // Тезисы докладов 3-й науч.-произв. конф. по проектированию, строительству и эксплуатации оросительных систем в Поволжье. – Волгоград. – 1976. – С. 237–238.

27. Гарбуз, А. Ю. Выбор композиционных составов, применяемых для ремонта повреждений на каналах // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2021. – № 1 (81). – С. 37–43.

28. Гарбуз, А. Ю. Виды и свойства полимерных композиционных материалов, применяемых для ремонта бетонных покрытий / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. №3 (67). – Новочеркасск: «РосНИИПМ», 2017. – С. 83–91.

29. Гарбуз, А. Ю. Натурные обследования технического состояния каналов Багаевской распределительной системы / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2020. – № 3 (79). – С. 63–67.

30. Гарбуз, А. Ю. Обеспечение водонепроницаемости облицовок оросительных каналов за счет применения жидких полимеров / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. 56. – Ч. 1. – Новочеркасск: «РосНИИПМ», 2014. – С. 21–29.

31. Гарбуз, А. Ю. Ремонт бетонных облицовок каналов полимерными композициями / А. Ю. Гарбуз, О. А. Баев // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях: сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г.; Редкол.: В. А. Шадских (председ.) и др. – Энгельс, 2016. – С. 169–174.

32. Гарбуз, А. Ю. Ремонт повреждений облицовок длительно работающих каналов с использованием полимерных композиций / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. 56. – Ч. 2. – Новочеркасск: «РосНИИПМ», 2015. – С. 33–39.

33. Гарбуз, А. Ю. Экспериментальные исследования водонепроницаемости локальных повреждений бетонных облицовок каналов / А. Ю. Гарбуз // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2020. – № 1 (04). – С. 76–88. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=54>. – DOI:10.31774/2658-7890-2020-1-76-88.

34. Гвенетадзе, А. Р. Долговечность пленочных экранов в облицовках каналов / А. Р. Гвенетадзе // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 5. – С. 23–25.

35. Глебов, В. Д. Исследования повреждаемости полимерных пленочных противofильтрационных конструкций / В. Д. Глебов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1982. – Т. 157. – С. 47–49.

36. Глебов, В. Д. Основные результаты исследований пленочных экранов во ВНИИГе им. Б. Е. Веденеева / В. Д. Глебов, В. П. Лысенко // Труды коорд. совещ. по гидротехнике ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1977. – Вып. 114. – С. 157–162.

37. ГОСТ 32016-2012. Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования. – Введ. 2014-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 40 с.

38. Давиденко, В. М. Причины разрушения и концепция ремонта бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений / В. М. Давиденко и [др.] / Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2017. – Т. 286. – С. 3–9.

39. Дубяго, Д. С. Уход за бетоном с использованием пленки при ремонте и восстановлении бетонных и железобетонных конструктивных элементов гидротехнических сооружений / Д. С. Дубяго, В. Н. Основин // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2007. – № 3. – С. 95–100.

40. Елшин, И. М. Применение полимерных материалов для облицовок гидросооружений ирригационных систем: автореф. дис....докт. техн. наук: 05.23.07 / Елшин Игорь Михайлович. – Л., 1974. – 54 с.

41. Ищенко, А. В. Оценка эффективности противofильтрационного экрана на Донском магистральном канале / А. В. Ищенко, О. А. Баев // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7. – № 4. – С. 51–56.

42. Ищенко, А. В. Гидравлическая модель водопроницаемости и эффективности противofильтрационных облицовок крупных каналов / А. В. Ищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 51–64.

43. Ищенко, А. В. Повышение эффективности и надежности противofильтрационных облицовок оросительных каналов: монография / А. В. Ищенко. – Ростов н/Д: Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2006. – 211 с.

44. Калтагова, М. Г. Борьба с потерями воды на фильтрацию из водоемов и оросительных каналов / М. Г. Калтагова. – М.: Сельхозгиз, 1955. – 94 с.

45. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль, Н. В. Данильченко; под ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, изд. 4-е, переработ. и доп, 1972. – 312 с.
46. Козлов, В. В. Гидроизоляционные материалы. Научное Издание / В. В. Козлов, В. П. Камсков. – М.: Изд-во АСВ. – 2014. – 240 с.
47. Колганов, А. В. Водохозяйственный комплекс Южного Федерального округа: современное состояние, проблемы управления / А. В. Колганов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 5. – С. 2–4.
48. Косиченко, Ю. М. Водопроницаемость противофильтрационных облицовок при наличии в них трещин / Ю. М. Косиченко, С. Н. Полубедов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 1997. – № 4. – С. 91.
49. Косиченко, Ю. М. Оценка комплексной реконструкции и модернизации оросительных систем / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 6–11.
50. Косиченко, Ю. М. Водопроницаемость противофильтрационных облицовок при наличии в них трещин / Ю. М. Косиченко, С. М. Полубедов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1999. – № 4. – С. 91–94.
51. Косиченко, Ю. М. Гидромеханическое решение задачи водопроницаемости экрана нарушенной сплошности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 4. – С. 3–11.
52. Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 240 с.
53. Косиченко, Ю. М. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – 239 с.
54. Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка водопроницаемости трещин бетонных облицовок каналов на основе гидравлических методов / Ю. М. Косиченко, А. Ю. Гарбуз // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 34–42.

55. Косиченко, Ю. М. Современные методы борьбы с фильтрацией на оросительных системах / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. В. Ищенко // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – 12 с. – Режим доступа: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_91\\_-kosichenko.pdf\\_55f9154bc5.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_-kosichenko.pdf_55f9154bc5.pdf).
56. Косиченко, Ю. М. Исследования фильтрационных потерь из каналов оросительных систем // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 6. – С. 24–25.
57. Косиченко, Ю. М. Классификация геосинтетических материалов и их применение для противофильтрационных устройств / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Актуальные вопросы гидротехники и мелиорации на юге России: сб. ст. / ФГБОУ ВПО «НГМА». – Новочеркасск: Лик, 2013. – С. 108–117.
58. Косиченко, Ю. М. Высоконадежные конструкции противофильтрационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. 2014. – №8. – С. 18–25.
59. Косиченко, Ю. М. Исследования в области борьбы с фильтрацией и эксплуатационной надежности грунтовых гидротехнических сооружений [Электронный ресурс] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. Электрон. журн. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2012. – № 2 (06). – 7 с. Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=100&id=108>.
60. Косиченко, Ю. М. Математическое и физическое моделирование фильтрации через малые повреждения противофильтрационных устройств из полимерных геомембран / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 274. – С. 60–74.
61. Косиченко, Ю. М. Оценка водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ. – 2016. – № 7. – С. 114–133.
62. Косиченко, Ю. М. Технические указания по применению противофильтрационных экранов из рулонных полимерных материалов на прудах-накопителях сточных вод животноводческих комплексов / Ю. М. Косиченко, Г. А. Золотарев, Н. А. Евстратов – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ. – 1984. – С. 5–8.

63. Косиченко, Ю. М. Инструкция по расчету водопроницаемости и эффективности противofильтрационных облицовок каналов / Ю. М. Косиченко, В. А. Бородин, А. В. Ищенко. – М.: Союзгипроводхоз, ЮжНИИГиМ, 1984. – С. 26–72.
64. Косиченко, Ю. М. Обеспечение противofильтрационной эффективности и надежности облицовок оросительных каналов / Ю. М. Косиченко // Доклады ВАСХНИЛ. – 1988. – № 3. – С. 41–43.
65. Костяков, А. Н. Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – М.: Госсельхозиздат, 1960. – 750 с.
66. Лаврик, В. И. Справочник по конформным отображениям / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. – Киев.: Наукова думка, 1970. – 252 с.
67. Левин, Я. К. Методика моделирования движения грунтовых вод для обоснования вариантов промывок и дренажа / Я. К. Левин. – Новочеркасск. – ЮжНИИГиМ. – 1973. – 40 с.
68. Ломизе, Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах / Г. М. Ломизе. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – 127 с.
69. Лысенко, В. П. Полимерные пленочные материалы для гидроизоляции / В. П. Лысенко, В. Д. Глебов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1977. – Вып. № 114. – С. 7–12.
70. Мелиоративные системы и сооружения: СП 81.13330.2017. Актуализированная редакция СНиП 3.07.03-85. – Введ. 2018-05-26. – М., 2018. – 66 с.
71. Мелиорация и водное хозяйство: Справочник. Том 6. Орошение / И. П. Айдаров [и др.]. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 415 с.
72. Миронов, А. А. О фильтрационных потерях при наличии дефектов в пленочном экране / А. А. Миронов, Г. А. Панасенко // Сб. научных трудов ВНИИГиМ «Новые способы строительства и гидравлика гидротехнических сооружений». – 1975. – № 2. – С. 32–36.
73. Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений. – М.: Колос, 1974. – 280 с.
74. Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

75. Недрига, В. П. О вероятностном расчете повреждений пленочных противотрифильтрационных экранов гидротехнических сооружений / В. П. Недрига, В. А. Бородин // Применение модифицированных полимерных материалов в конструкциях мелиоративных систем, Елгава. – 1983. – С. 145–151.

76. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений: монография / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Баев, Е. Д. Михайлов. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 283 с.

77. Олехнович, В. А. Исследование фильтрационных потерь из облицованных каналов с пленочным экраном / В. А. Олехнович, Г. М. Куделя, В. В. Милешин // Мелиорация и водное хозяйство. – Киев, 1964. – № 30. – С. 116–132.

78. Ольгаренко, В. И. Задачи эксплуатации гидромелиоративных систем / В. И. Ольгаренко, Г. В. Ольгаренко // Проблемы и перспективы развития орошаемого земледелия. – 2000. – С. 87–90.

79. Ольгаренко, В. И. Ремонтные работы на оросительных системах / В. И. Ольгаренко, И. А. Чуприн, П. В. Иоффе. – М.: Колос, 1976. – 64 с.

80. Ольгаренко, В. И. Эксплуатация и мониторинг мелиоративных систем: учебник / В. И. Ольгаренко, Г. В. Ольгаренко, И. И. Рыбкин; под ред. В. И. Ольгаренко. – М.: Коломна, 2006. – 391 с.

81. Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / под общ. ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 361 с.

82. Павловский, Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения: собр. соч. Т. 2. / Н. Н. Павловский. – М.-Л., 1956. – 771 с.

83. Пат. 1631054 Российская Федерация, МПК С04В 26/18. Способ ремонта железобетонных конструкций / Меликсетян А. М., Алавердян Р. А., Александян Р. З.; заявитель и патентообладатель Науч.-производственное объединение «Полимерклей» – № 894674794; заявл. 06.04.89; опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. – 4 с.

84. Пат. 2212487 Российская Федерация, МПК Е01С 23/06. Способ ремонта бетонных и железобетонных покрытий и конструкций / Ремизов В. В. [и др.]; за-

явитель и патентообладатель ООО «Науч.-исслед. ин-т природных газов и газовых технологий-ВНИИГАЗ» – № 2001126658/03; заявл. 03.10.01; опубл. 20.09.03, Бюл. № 26. – 5 с.

85. Пат. 2505642 Российская Федерация, МПК E02B3/16 (2006.01). Способ и система для точечного крепления гидроизоляционной мембраны к гидросооружениям / А. М. Скуеро.; заявитель и патентообладатель Карпи тек б. в. Амстердам, Балерна Бранч (ch) – заявка: 2011113740/13, заявл. 02.09.2009; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 14 с.: ил. 6.

86. Пат. 2612419 Российская федерация, МПК E02B 13/00, E02B 3/16 Способ ремонта бетонных облицовок оросительных каналов / О. А. Баев; заявитель и патентообладатель Баев О. А. – № 2016105674; заявл. 18.02.2016; опубл. 09.03.2017, Бюл. № 19. – 9 с. ил.

87. Пат. 2669302 Российская Федерация, МПК E02B 13/00. Способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов / Ищенко А. В., Баев О. А., Скляренко Е. О., Гарбуз А. Ю., Гвозденко К. В.; заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюджетное образ. уч-ние высшего образ. «Донской госуд. аграрный университет» ФГБОУ ВО ДГАУ. – № 2017120124; заявл. 07.06.17; опубл. 09.10.18, Бюл. № 28. – 8 с.

88. Пат. 2732588 Российская федерация, МПК E02B 13/00, E02B 3/16 Способ ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов / С. М. Васильев, Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз; заявитель и патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации – № 2019134272; заявл. 24.10.2019; опубл. 21.09.2020, Бюл. № 27. – 9 с. ил.

89. Печенежская, И. А. Решение одной задачи фильтрации из каналов с защитным покрытием / И. А. Печенежская // Тезисы докладов V Международной конференц. женщин-математиков «Математика. Экономика», г. Ростов н/Д, 1997. – С. 101.

90. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод. / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, изд. 2-е. – 1977. – 664 с.



91. Полубедов, С. Н. Некоторые особенности физики явления водопроницаемости противofильтрационных облицовок / С. Н. Полубедов // Кадры и научно-технический прогресс в мелиорации, Новочеркасск: НГМА, 1997. – С. 175–176.
92. Полубедов, С. Н. Экспериментальные исследования водопроницаемости противofильтрационных облицовок оросительных каналов при наличии в них трещин / С. Н. Полубедов, Г. А. Полубедова, О. А. Пашигорова, Н. А. Стерлядникова // Проблемы строительства и инженерной экологии, Новочеркасск: НОК, 2000. – С. 237–238.
93. Пустыльников, Я. А. Изучение фильтрации воды из экранированных каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Я. А. Пустыльников. – Ташкент, 1966. – 21 с.
94. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России / А. В. Колганов, Н. А. Сухой, В. Н. Шкура, В. Н. Щедрин; под ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 222 с.
95. Расчет водопроницаемости бетонной облицовки с закольцованными швами: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ 2017617276 / А. Ю. Гарбуз, О. А. Баев; заявитель и патентообладатель Гарбуз А. Ю., Баев О. А. – № 2017614101; заявл. 02.05.17; опубли. 04.07.2017.
96. Резник, В. Б. Новые материалы и конструкции на основе полимеров в водохозяйственном строительстве / В. Б. Резник. – Киев: Будівельник, 1987. – 176 с.
97. Рубин, В. М. Бетонная облицовка каналов / В. М. Рубин, А. Г. Шлаен. – М.: Агропромиздат, 1987. – 182 с.
98. Семенов, С. Я. Способ реконструкции деформационных швов противofильтрационных бетонных и железобетонных облицовок гидротехнических сооружений / С. Я. Семенов [и др.]. – Мелиорация и водное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 31–35.
99. Созаев, А. А. Долговечность гидротехнического бетона облицовок каналов / А. А. Созаев, Ю. М. Хасауов // Наука, техника и технология XXI века (НТТ–2009). – 2009. – С. 398–403.
100. Созаев, А. А. Эффективный способ реконструкции лотковых каналов призматического сечения / А. А. Созаев, С. О. Курбанов // Известия высших учеб-

ных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2007. – № 6 (142). – С. 105–106.

101. СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85. Введ. 2017-06-17. – М.: Изв-во стандартов, 2017. – 89 с.

102. Стрижевский, И. В. Защита от коррозии трубопроводов мелиоративных систем / И. В. Стрижевский, Б. Л. Рейзин. – М.: Колос, 1980. – 142 с.

103. Татьянин, Д. А. Определение характеристик трения для двух типов геосинтетических материалов путем проведения испытаний на сдвиг / Д. А. Татьянин, А. Б. Пономарев, В. И. Клевеко // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 174–186.

104. Тищенко, А. И. Оценка интенсивности истирания наносами бетонных облицовок каналов / А. И. Тищенко, А. А. Созаев // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 11. – С. 24–28.

105. Ткачев, А. А. Повышение эффективности функционирования оросительных магистральных каналов в условиях неустановившегося течения воды / А. А. Ткачев // Труды Кубанского государственного аграрного университета, 2008. – № 2. – С. 94–98.

106. Фильчаков, П. Ф. Теория фильтрации под гидротехническими сооружениями. Т. 1. – Киев: Из-во АНУССР. – 1959. – 308 с.

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

108. Ханов, Н. В. 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. – Т. 8. – № 1 (27). – С. 108–117.

109. Хевиленд, Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. Перевод с англ. – под ред. Г. Н. Баласанова. – М.: Энергия, 1966. – 231 с.

110. Чернов, М. А. Обоснование противofильтрационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов / М. А. Чернов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2 (160). – С. 108–113.

111. Чернов, М. А. Конструкции защитных облицовок каналов и водоемов с применением геосинтетических материалов [Электронный ресурс] / М. А. Чернов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ. – 2011. – № 3 (03). – 13 с. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=37&id=42>.

112. Чуприн, И. А. Особенности орошения в предгорной зоне Северного Кавказа и способы уменьшения фильтрации на оросительных каналах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: / 06.01.02. Новочеркасск, 1955. – 19 с.

113. Шилин, А. А. Современный подход к разработке решений по ремонту железобетонных конструкций гидротехнических сооружений / А. А. Шилин, А. М. Кириленко, П. А. Знайченко // Транспортное строительство. – 2017. – № 12. – С. 6–10.

114. Шкура, В. Н. Природообустройство: терминолог. слов. / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск, 2009. – 768 с.

115. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика. – М.: Колос, 3-е изд., перераб. и доп. – 2004. – 656 с.

116. Щедрин, В. Н. Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. – В 2 ч. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – 590 с.

117. Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов // Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2004. – 388 с.

118. Янке Е., Специальные функции. Формулы, графики, таблицы, перевод с немецкого издания. / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: 3 изд. – 1977. – 342 с.

119. Ashraf, M. Impact evaluation of a karez irrigation scheme in Balochistan-Pakistan: Issues and options / M. Ashraf, A. Majeed, M. Saeed // Pakistan Journal of

Agricultural Sciences, 2016. – Vol. 53. – N 3. – Pp. 661–671. DOI: 10.21162/PAKJAS/16.3527

120. Bandurin, M. A. The efficiency of impervious protection of hydraulic structures of irrigation systems / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, I. F. Yurchenko, V.V Vanzha, A. V. Mikheyev // International scientific and practical conference «Agrosmart – smart solutions for agriculture». – Advances in Engineering Research. – 2018. – Pp. 62–66.

121. Bandurin, M. A. Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state / V. A. Volosukhin, M. A. Bandurin, A. V. Mikheev, Y. V. Volosukhin, V. V. Vanzha // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015 (3). – Pp. 032–146.

122. Chuck, R. T. World's largest butyl rubber-lined reservoir at Kualapuu, Hawaii. – In: 8th Congress ICID. Varna, 1972, Q. 28-1, R. 7, Pp. 115–127.

123. Kosichenko, Yu. M. Geo-Composite Drainage Material for Hydro-Technical and Civil Engineering / Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev, S. M. Vasilyev // Solid State Phenomena, 2021. – Vol. 316. – Pp 1025–1030.

124. Madhava Chandran, K. Performance Evaluation of Selected Irrigation Systems in Kerala State, India / K. Madhava Chandran, E. J. Joseph, C. M. Sushanth // Irrigation and Drainage, 2016. – Vol. 65. – N 5. – Pp. 613–619. DOI: 10.1002/ird.2012

125. Matsuoka, A. Irrigation channel repair work using ultra-high-strength fiber reinforced concrete panels / A. Matsuoka, T. Nishiba // Journal of The Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering, 2007. – Vol. 75 (1). – Pp. 29–30.

126. Matyakubov, B. Condition of irrigation and drainage systems in the Khorezm region and recommendations for their improvement / B. Matyakubov, I. Begmatov, A. Mamataliev, S. Botirov, M. Khayitova // Journal of Critical Reviews, 2020. – Vol. 7. – N 5. – Pp. 417–421. DOI: 10.31838/jcr.07.05.86

127. Matyakubov, B. Recommendations for improving the reliability of hydraulic structures in the on-farm network / B. Matyakubov K. Isabaev, D. Yulchiyev, S. Azizov // Journal of Critical Reviews, 2020. – Vol. 7. – N 5. – Pp. 376–379. DOI: 10.31838/jcr.07.05.74

128. Matyakubov, B. The role of the irrigation network in the efficient use of water / B. Matyakubov, D. Yulchiyev, I. Kodirov, G. Axmedjanova // International Scientific Conference on Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, CONMECHYDRO, 2021. – Vol. 264. – N 2. DOI: 10.1051/e3sconf/202126403018

129. Ono, T. Application of Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete for Irrigation Channel Repair Works / T. Ono // Designing and Building with UHPFRC, 2013. – Pp. 541–552. DOI10.1002/9781118557839.ch36

130. Schmidt, M. 50 Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Schriftenreihe Baustoffe. Centrum Baustoffe und Materialprufund Fest-schrift zum 60 Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schlopi. 2003. – H.2, Pp. 189–198.

131. Sol'skii, S. V. Results of laboratory tests of the filtration characteristics of clay-cement concrete / S. V. Sol'skii, E. E. Legina, R. N. Orishchuk, N. L. Orlova // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 50. – N 5. – C. 496–500.

132. Winfield, J. Canal repair solutions for urban, rural, degraded and leaking irrigation canals / J. Winfield // Technical Representative, Cairo Canal Solutions LLC. – 2015. – N 4. – P. 483–494.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2598669

**СПОСОБ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО  
ЭКРАНА**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной  
ответственностью "Южный научно-исследовательский  
институт гидротехники и мелиорации" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014137906

Приоритет изобретения 18 сентября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 06 сентября 2016 г.

Срок действия патента истекает 18 сентября 2034 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивашев* Г.П. Ивашев





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2669302

**СПОСОБ РЕМОНТА И ГЕРМЕТИЗАЦИИ  
ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК КАНАЛОВ**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ДОНСКОЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(ФГБОУ ВО ДГАУ) (RU)**

Авторы: **Ищенко Александр Васильевич (RU), Баев Олег  
Андреевич (RU), Скляренко Елена Олеговна (RU), Гарбуз  
Александр Юрьевич (RU), Гвозденко Кирилл Вячеславович  
(RU)**

Заявка № 2017120124

Приоритет изобретения 07 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 09 октября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 июня 2037 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2732588

СПОСОБ РЕМОНТА БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК  
ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ КАНАЛОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации" (ФГБНУ "РосНИИПМ") (RU)*

Авторы: *Васильев Сергей Михайлович (RU), Косиченко Юрий Михайлович (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Гарбуз Александр Юрьевич (RU)*

Заявка № 2019134272

Приоритет изобретения 24 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в


Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 октября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617276

РАСЧЕТ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОННОЙ  
ОБЛИЦОВКИ С ЗАКОЛЬМАТИРОВАННЫМИ ШВАМИПравообладатели: *Гарбуз Александр Юрьевич (RU), Баев Олег  
Андреевич (RU)*Авторы: *Гарбуз Александр Юрьевич (RU),  
Баев Олег Андреевич (RU)*

Заявка № 2017614101

Дата поступления 02 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 июля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614718

**Программа для гидравлического расчета основных параметров каналов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ») (RU)*

Авторы: *Щедрин Вячеслав Николаевич (RU), Косиченко Юрий Михайлович (RU), Колганов Александр Васильевич (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Гарбуз Александр Юрьевич (RU), Сильченко Виктория Федоровна (RU)*

Заявка № 2019613302

Дата поступления 29 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 апреля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## Приложение Б – Акты внедрения результатов НИР



УТВЕРЖДАЮ

Директор Сальского филиала ФГБУ

«Управление «Ростовмелиоводхоз»

*В. И. Сопельняк* В. И. Сопельняк

« 5 » октября 2015 г.

### АКТ

#### Внедрения программы для ЭВМ

1. **Наименование организации и объекта, где использована программа для ЭВМ:** Сальский филиал ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз».
2. **Наименование научной организации, проводившей разработку и опытное освоение программы:** ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», г. Новочеркасск.
3. **Цель внедрения программы для ЭВМ:** Использование программы в учебном процессе и при выполнении научно-исследовательских работ.
4. **Срок использования:** 2015-2016 гг.
5. **Название программы и сведения о ее регистрации:** Гидравлические и оптимизационные расчеты магистрального и распределительного каналов различного порядка оросительной системы («Ras Chet.canal») (свидетельство о государственной регистрации № 2014619417 от 16.09.2014 г.).
6. **Назначение программы:** Программа предназначена для автоматизации расчетов параметров магистрального и распределительных каналов I-III порядков оросительной системы.
7. **Решаемые задачи:** Программа позволяет определить основные параметры магистрального и распределительных каналов оросительной системы с учетом подачи необходимых объемов воды в водовыделы и проводить многовариантные технико-экономические расчеты с учетом объемов земляных работ для выбора оптимальных решений.
8. **Фактический объем использования в натуральных показателях:**

**8.1 Число рабочих мест, на которых установлена программа:**

установлена на 2 ПК.

**8.2 Количество специалистов, освоивших программу: 3.****9. Экономический эффект от внедрения:** Экономический эффект

от внедрения составил – 262,55 тыс. руб.

Расчет экономического эффекта прилагается (приложение № 1).

Представители разработчика программы  
для ЭВМ ФГБНУ «РосНИИПИМ»:

Косиченко Ю. М.



---

Гарбуз А. Ю.



---



УТВЕРЖДАЮ

Директор Сальского филиала ФГБУ  
«Управление «Ростовмелиоводхоз»

*В. И. Сопельняк* В. И. Сопельняк

« 5 » октября 2015 г.

### РАСЧЕТ

#### экономического эффекта от внедрения программы для ЭВМ

«Гидравлические и оптимизационные расчеты магистрального и распределительных каналов различного порядка оросительной системы»  
(«Ras Chet.canal»)

**Внедряемое мероприятие:** Программа для ЭВМ, предназначенная для проведения гидравлических расчетов основных параметров каналов оросительной системы и выполнение оптимизационных расчетов при выборе вариантов с минимум объемов земляных работ.

**Базовый вариант:** Разработка методики расчета и программы ее реализации на ЭВМ.

**Объект внедрения:** Открытая оросительная система с комплексом каналов различного порядка (магистральных и распределительных 1-го-3-го порядка).

Расчет годового экономического эффекта от внедряемого мероприятия по сравнению с базовым вариантом выполняется по формуле:

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2, \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2$  – затраты при использовании базового варианта и внедряемого мероприятия.

Таблица 1 – Расчет затрат при внедрении программы для ЭВМ

Наименование работ	Базовый вариант		Внедряемое мероприятие (программа ЭВМ)	
	Трудоемкость чел.-дн.	Стоимость работ, руб.	Трудоемкость чел.-дн.	Стоимость работ, руб.
1	2	3	4	5
1. Подготовка исходных данных	3,0	3126,0	3,0	3126,0
2. Ввод данных	3,0	3126,0	3,0	3126,0

1	2	3	4	5
3. Составление алгоритма расчета	3,0	5210,0	–	–
4. Формирование базы данных	5,0	5210,0	3	3126,0
5. Разработка методики расчета и программы	238,0	247996,0	–	–
6. Выполнение расчетов	6,0	6252,0	6,0	6252,0
7. Тестирование программы	5,0	5210,0	–	–
8. Анализ полученных результатов	5,0	5210,0	3,0	3126,0
Итого	270,0	281310,0	18	18756,0

Примечание: Стоимость 1 чел.-дн. принята исходя из заработной платы инженера программиста – 1042 руб.

Расчет затрат при внедрении программы ЭВМ и базового варианта приведен в таблице 1.

Согласно выполненным расчетам годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2 = 281310,0 - 18756,0 = 262554 \text{ руб.}$$

Расчет составили:  
разработчики программы  
для ЭВМ ФГБНУ «РосНИИПМ»:

Косиченко Ю. М.



Гарбуз А. Ю.









Приложение 1  
УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФГБУ «Управление  
«Ростовмелиоводхоз»



В. А. Назаренко

2019 г.

### РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов  
научно-исследовательской работы

**Внедряемое мероприятие:** Способ ремонта и герметизации повреждений бетонных облицовок каналов (по патенту на изобретение РФ № 2669302).

**Базовый вариант:** Противофильтрационная бетонная облицовка.

**Объект внедрения:** Проект реконструкции Нижне-Маньчского канала

**Исходные данные** для расчета экономического эффекта приведены в таблице 1

Таблица 1 – Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатели	Принятые обозначения	Единица измерения	Современное состояние	Базовый вариант	Внедряемое мероприятие
Расход канала	$Q$	м <sup>3</sup> /с	6,0	6,5	6,5
Длина канала	$L_k$	км	2,0	2,0	2,0
КПД канала	$\eta$	–	0,83	0,87	0,90
Стоимость Бетонной облицовки	$K_{обл}$	руб./м <sup>2</sup>	–	1128,0	1362,0
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м <sup>2</sup>	–	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Срок службы экрана	$T$	лет	–	30	65
Продление срока службы	$\Delta T$	лет	–	–	35

Результаты расчетов по базовому и внедряемому мероприятию приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет затрат по базовому и внедряемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. измерения	Расчет показателей
Эксплуатационные затраты по базовому варианту $C_1=0,05 \cdot K_1$	$C_1$	руб./м <sup>2</sup>	$C_1=0,05 \cdot 1128,0=56,4$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	$C_2$	руб./м <sup>2</sup>	$C_2=0,05 \cdot 1362,0=68,1$
Капитальные затраты по базовому варианту	$K_1$	руб./м <sup>2</sup>	1128,0
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию	$K_2$	руб./м <sup>2</sup>	1362,0
Нормативный коэффициент эффективности	$E_n$	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n \cdot K_1$	$Z_1$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_1=56,4+0,15 \cdot 1128,0=225,6$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n \cdot K_2$	$Z_2$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_2=68,1+0,15 \cdot 1362,0=272,4$
Коэффициент приведения срока службы экрана по внедряемому мероприятию $\varphi = \frac{T_1 / T_{норм} + E_n}{T_2 / T_{норм} + E_n}$ , где $T_1=30$ лет; $T_2=65$ лет; $T_{норм}=50$ лет	$\varphi$	–	$\varphi = \frac{30/50+0,15}{65/50+0,15} = 0,517$

Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедряемого мероприятия по сравнению с базовым вариантом выполняется по формуле:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 - \varphi \cdot Z_2) \cdot (F_{обл}/L_k)] \cdot L_k = [(225,6 - 0,517 \cdot 272,4) \cdot (20000/2000)] \cdot 2000 = 1695384 \text{ руб.}$$

где  $\mathcal{E}$  – годовой ожидаемый экономический эффект, руб.;

$L_k$  – длина ремонтируемого участка канала, м;

$Z_1$  – приведенные затраты по базовому мероприятию руб./м<sup>2</sup>;

$Z_2$  – приведенные затраты по внедряемому мероприятию руб./м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение срока службы покрытия;

$T_1, T_2$  – срок службы базового и внедряемого мероприятия, лет;

$T_{норм}$  – нормативный срок службы, лет;

$F_{обл}$  – площадь экрана участка канала, м<sup>2</sup>.

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования в проекте реконструкции Нижне-Маньчского канала (протяженностью 2,0 км) внедряемого мероприятия (по патенту на изобретение РФ № 2669302) составит 1695384 руб.

Расчет составили:

гл. науч. сотр.

ст. науч. сотр.

гл. специалист

Ю. М. Косиченко

О. А. Баев

А. Ю. Гарбуз



СОГЛАСОВАНО

Врио директора ФГБУ «РосНИИПМ»  
д-р. техн. наук, профессор

С. М. Васильев

«20» декабря 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФГБУ  
«Управление «Ростовмелиоводхоз»

В. А. Назаренко

«20» декабря 2019 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и  
технологических работ**Настоящим подтверждаю, что результаты НИР:**«Провести исследования и разработать методику расчета эффективности и надежности противofильтрационных мероприятий на оросительных каналах и выбор наиболее эффективных типов противofильтрационных облицовок с учетом типовых проектных решений и методик с разработкой программ для ЭВМ» (шифр 2.1.3.4)

(наименование работы)

выполненной ФГБУ «РосНИИПМ»  
(наименование вуза, НИИ)проводимой в период с 09 января по 02 декабря 2019 года  
(сроки выполнения)внедрены ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»  
(наименование организации)**1. Вид внедренных результатов:** «Конструктивно-техническое решение по способу ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов» (заявка на изобретение РФ № 2019134272).

(наименование мероприятия)

**2. Характеристика масштабов внедрения:** единичное  
(уникальное, единичное, массовое, серийное)**3. Форма внедрения:**Конструктивно-техническое решение по способу ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов» (заявка на изобретение РФ № 2019134272)**4. Новизна внедряемого мероприятия** заключается в увеличении, срока службы и повышении водонепроницаемости бетонных облицовок каналов, а также в обеспечении наименьшей шероховатости отремонтированного участка облицовки.**5. Ожидаемый экономический эффект составит – 2,12 млн. руб. Расчет экономического эффекта прилагается (Приложение 1).**От ФГБУ «РосНИИПМ»  
Разработчики:Ю. М. Косиченко  
О. А. Баев  
А. Ю. ГарбузОт ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»  
Начальник отдела:В. М. Попов

Приложение 1  
УТВЕРЖДАЮ  
Зам. директора ФГБУ «Управление  
«Ростовмелиоводхоз»



В. А. Назаренко

2019 г.

### РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов  
научно-исследовательской работы

**Внедряемое мероприятие:** «Конструктивно-техническое решение по способу ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов» (заявка на изобретение РФ № 2019134272)

**Базовый вариант:** Противофильтрационная бетонная облицовка.

**Объект внедрения:** Проект реконструкции Нижне-Маньчского канала

**Исходные данные** для расчета экономического эффекта приведены в таблице 1

Таблица 1 – Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатели	Принятые обозначения	Единица измерения	Современное состояние	Базовый вариант	Внедряемое мероприятие
Расход канала	$Q$	м <sup>3</sup> /с	6,0	6,5	6,5
Длина канала	$L_k$	км	2,5	2,5	2,5
КПД канала	$\eta$	–	0,83	0,87	0,90
Стоимость Бетонной облицовки	$K_{обл}$	руб./м <sup>2</sup>	–	1128,0	1362,0
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м <sup>2</sup>	–	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Срок службы экрана	$T$	лет	–	30	65
Продление срока службы	$\Delta T$	лет	–	–	35



Результаты расчетов по базовому и внедряемому мероприятию приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет затрат по базовому и внедряемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. измерения	Расчет показателей
Эксплуатационные затраты по базовому варианту $C_1=0,05 \cdot K_1$	$C_1$	руб./м <sup>2</sup>	$C_1=0,05 \cdot 1128,0=56,4$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	$C_2$	руб./м <sup>2</sup>	$C_2=0,05 \cdot 1362,0=68,1$
Капитальные затраты по базовому варианту	$K_1$	руб./м <sup>2</sup>	1128,0
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию	$K_2$	руб./м <sup>2</sup>	1362,0
Нормативный коэффициент эффективности	$E_n$	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n \cdot K_1$	$Z_1$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_1=56,4+0,15 \cdot 1128,0=225,6$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n \cdot K_2$	$Z_2$	руб./м <sup>2</sup>	$Z_2=68,1+0,15 \cdot 1362,0=272,4$
Коэффициент приведения срока службы экрана по внедряемому мероприятию $\varphi = \frac{T_1 / T_{\text{норм}} + E_n}{T_2 / T_{\text{норм}} + E_n}$ , где $T_1=30$ лет; $T_2=65$ лет; $T_{\text{норм}}=50$ лет	$\varphi$	–	$\varphi = \frac{30/50+0,15}{65/50+0,15} = 0,517$

Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедряемого мероприятия по сравнению с базовым вариантом выполняется по формуле:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 - \varphi \cdot Z_2) \cdot (F_{\text{обл}} / L_k)] \cdot L_k = [(225,6 - 0,517 \cdot 272,4) \cdot (25000 / 2500)] \cdot 2500 = 2119230 \text{ руб.}$$

где  $\mathcal{E}$  – годовой ожидаемый экономический эффект, руб.;

$L_k$  – длина ремонтируемого участка канала, м;

$Z_1$  – приведенные затраты по базовому мероприятию руб./м<sup>2</sup>;

$Z_2$  – приведенные затраты по внедряемому мероприятию руб./м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение срока службы покрытия;

$T_1, T_2$  – срок службы базового и внедряемого мероприятия, лет;

$T_{\text{норм}}$  – нормативный срок службы, лет;

$F_{\text{обл}}$  – площадь экрана участка канала, м<sup>2</sup>.

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования в проекте реконструкции Нижне-Манычского канала (протяженностью 2,5 км) внедряемого мероприятия (по заявке на изобретение РФ № 2019134272) составит 2119230 руб.

Расчет составили:

гл. науч. сотр.

ст. науч. сотр.

гл. специалист

Ю. М. Косиченко

О. А. Баев

А. Ю. Гарбуз