

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ МЕЛИОРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ МЕЛИОРАЦИИ»

На правах рукописи



БАЕВ ОЛЕГ АНДРЕЕВИЧ

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

**2.1.6. – Гидротехническое строительство, гидравлика
и инженерная гидрология**

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор
Косиченко Ю. М.

Новочеркасск 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ	20
1.1 Обзор исследований отечественных ученых по применению полимерных материалов для противofильтрационных покрытий	20
1.2 Анализ исследований зарубежных ученых по применению геосинтетических материалов для противofильтрационных целей.....	27
1.3 Фильтрационные потери на каналах и факторы, влияющие на фильтрацию	34
1.4 Опыт применения геосинтетических материалов для противofильтрационных покрытий	43
1.5 Обоснование применения бентонитовых материалов в качестве противofильтрационных покрытий каналов.....	51
1.6 Обоснование необходимости разработки конструкций противofильтрационных покрытий каналов.....	57
1.7 Постановка цели и задач диссертационного исследования	59
Выводы по главе 1	61
Глава 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ	63
2.1 Новый подход к созданию противofильтрационных покрытий каналов из материалов на основе бентонита	63
2.2 Зарубежный и отечественный опыт создания противofильтрационных покрытий на каналах.....	66
2.3 Многослойные конструкции противofильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов.....	74
2.3.1 Комбинированные конструкции из геосинтетических материалов на основе бентонита	77
2.3.2 Противofильтрационные и дренажно-фильтрующие покрытия оросительных каналов.....	82

2.3.3 Технологические решения для определения фильтрационных потерь на каналах.....	87
2.4 Конструкции противофильтрационных и защитных покрытий из геосинтетических материалов	92
Выводы по главе 2.....	101
Глава 3. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ ИЗ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	103
3.1 Общие вопросы и описание методов теории фильтрации	103
3.1.1 Развитие исследований в области фильтрации из оросительных каналов	103
3.1.2 Описание методов решения задач фильтрации	109
3.1.3 Допущения и предпосылки при решении задач водопроницаемости противофильтрационных покрытий	114
3.2 Фильтрационная модель водопроницаемости облицовки канала через систему дефектов в геомембране.....	114
3.3 Модель осесимметричной фильтрации через дефект экрана в пористую среду основания	128
3.4 Численное моделирование фильтрации из канала при наличии повреждений в геосинтетическом экране	134
3.5 Модель водопроницаемости противофильтрационных бентонитовых покрытий с учетом самозалечивания повреждений	138
3.5.1 Методика расчета водопроницаемости и самозалечивания повреждений	138
3.5.2 Результаты оценки водопроницаемости покрытий из бентонитовых материалов с учетом самозалечивания.....	142
Выводы по главе 3.....	145
Глава 4. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ	147
4.1 Описание методов и выбор критериев оценки надежности и долговечности конструкций противофильтрационных покрытий.....	147

4.2 Надежность противofильтрационного экрана из геосинтетических материалов при эксплуатации	152
4.3 Оценка надежности геокomпозитных покрытий с использованием методов последовательного и параллельного соединения элементов....	155
4.4 Результаты оценки долговечности облицовок каналов из геосинтетических бентонитовых материалов	159
4.5 Сравнительный анализ надежности и долговечности различных типов противofильтрационных покрытий каналов.....	160
4.6 Результаты расчета эффективности геосинтетических покрытий в сравнении с альтернативными вариантами	162
Выводы по главе 4.....	171
Глава 5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ	173
5.1 Отбор образцов геосинтетических материалов для выполнения лабораторных исследований	173
5.2 Исследования разрывной нагрузки и удлинения при разрыве	176
5.2.1 Описание лабораторной установки и методика проведения исследований.....	176
5.2.2 Экспериментальные исследования бентонитовых матов на раздир	177
5.3 Исследования коэффициента фильтрации бентонитовых матов	182
5.3.1 Описание лабораторной установки и методика проведения исследований.....	182
5.3.2 Фильтрационные исследования образцов бентонитовых матов	185
5.4 Определение стойкости геосинтетических материалов к динамическим пробоям.....	187
5.4.1 Методика проведения испытания и описание лабораторной установки.....	187
5.4.2 Процесс испытания стойкости к динамическим пробоям	188
5.5 Определение толщины противofильтрационных геосинтетических покрытий.....	189
5.6 Результаты испытаний заводского и эксплуатируемого на канале	

геосинтетического бентонитового покрытия	191
5.7 Сравнительный анализ прочностных и фильтрационных характеристик покрытия, полученных по результатам испытаний	196
Выводы по главе 5.....	204
Глава 6. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ.....	206
6.1 Задачи и методика проведения натуральных исследований	206
6.2 Описание объектов натуральных исследований.....	207
6.3 Натурные исследования противофильтрационных покрытий оросительных каналов.....	213
6.3.1 Результаты обследования наиболее опасных участков комбинированного экрана Донского магистрального канала	213
6.3.2 Обследования противофильтрационных покрытий Пролетарского канала.....	218
6.3.3 Результаты натуральных исследований участков реконструкции Невинномысского канала.....	222
6.3.4 Исследования противофильтрационной облицовки Перебросного магистрального канала	226
6.3.5 Результаты обследования магистрального канала Аксыра.....	230
6.4 Натурные данные по обследуемым каналам и сведения о их техническом состоянии.....	234
Выводы по главе 6.....	239
Глава 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ.....	241
7.1 Методика выбора оптимального варианта противофильтрационного покрытия канала.....	241
7.2 Результаты расчета экономической эффективности различных типов противофильтрационных покрытий каналов.....	243
7.2.1 Расчет приведенной стоимости бетонной монолитной и сборной облицовок	243

7.2.2 Расчет приведенной стоимости облицовок с геомембранами и защитным покрытием из грунта	248
7.2.3 Расчет приведенной стоимости облицовок с геомембранами и защитным покрытием из бетона	252
7.2.4 Расчет приведенной стоимости облицовок с геосинтетическими бентонитовыми материалами и защитным покрытием из каменной наброски	254
7.3 Анализ результатов расчета рассмотренных типов облицовок и выбор оптимального варианта	256
7.4 Новые научные результаты по оптимизации разработанных решений.....	262
Выводы по главе 7.....	268
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	269
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	275
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	276
ПРИЛОЖЕНИЯ	311
Приложение А Копии патентов на изобретения и свидетельств на программы для ЭВМ.....	312
Приложение Б Акты внедрения результатов исследований.....	321
Приложение В Рекомендации по применению геосинтетических покрытий при проектировании, строительстве и эксплуатации каналов..	336
Приложение Г Примеры расчетов эффективности и надежности покрытий каналов из геосинтетических материалов.....	345
Приложение Д Данные по среднестатистическим значениям КПД каналов	349
Приложение Е Алгоритмы разработанных программ для ЭВМ.....	350

ВВЕДЕНИЕ

Противофильтрационные покрытия (ПФП) или облицовки оросительных каналов (магистральных, распределительных) и других водопроводящих гидротехнических сооружений выполняют основную функцию – гидроизоляционную защиту и снижение потерь воды на фильтрацию при ее транспортировке от водозабора до водопотребителя, а также уменьшение негативного воздействия вод на прудах-накопителях и водоемах (водотоках) различного назначения.

Используемые ранее противофильтрационные решения, заключающиеся в применении грунтовых материалов с низким коэффициентом фильтрации в качестве противофильтрационных устройств, а также проведение ряда мероприятий (например, нефтевания и кольматации русла, устройства пленочных и глинистых экранов, асфальтобетонных облицовок и других), направленных на снижение потерь воды на фильтрацию, являлись малоэффективными. При этом, при устройстве грунтовых покрытий требуется значительные объемы земляных работ, применение техники и технологий, позволяющих перемещать значительные объемы грунта с последующим его уплотнением. С течением времени такие грунтовые противофильтрационные экраны на оросительных каналах, как правило, зарастают камышом, рогозом и другой растительностью. Пленочные покрытия, применяемые в качестве противофильтрационных устройств на каналах, характеризуются значительной повреждаемостью, в частности в процессе их укладки, при устройстве защитных слоев из грунтовых и, особенно, каменных материалов.

Исходя из этого, все противофильтрационные мероприятия можно подразделить на 3 основные типа: 1) традиционные (оглеение, кольматация, устройство глиняного «замка», нефтевание); 2) полимерные (покрытия из пленок, полимеров, битума); 3) геосинтетические (с использованием геомембран, материалов геосинтетических бентонитовых, бетонных матов и др.).

В связи с развитием новых технологий и масштабным производством различных строительных материалов для противофильтрационных целей (геосинтетических и геокомпозитных) возникает необходимость разработки, расчетного

обоснования, создания и внедрения конструкций противофильтрационных облицовок повышенной надежности и долговечности на оросительных каналах.

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

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

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

Наиболее распространенными противофильтрационными покрытиями оросительных каналов являются: бетонные, железобетонные, пленочные и грунтовые экраны. Бетонные и железобетонные покрытия (или облицовки) на участках кана-

лов характеризуются относительно малым сроком службы (до 30–40 лет), на многих участках в процессе эксплуатации сооружений наблюдается, вымыв подстилающего грунта с последующим провисанием и разрушением плит и деформационных швов. На бетонных поверхностях происходит шелушение и разрушение поверхности бетона из-за температурных колебаний и наличия на некоторых участках каналов воды в зимний период.

Наиболее перспективным направлением в нашей стране является применение многослойных материалов в конструкциях облицовок каналов, которое сдерживается недостаточностью изученности их работы при повреждаемости, регенерации (самозалечивании бентонитом), фильтрации через отверстия и проколы. Кроме этого, отсутствует ряд конструктивных и компоновочных решений для каналов, выполняемых из геосинтетических материалов в сложных инженерных условиях и при наличии защитных устройств.

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

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

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

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

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

Разработанные в рамках выполнения диссертационной работы рекомендации по применению противofильтрационных конструкций из геосинтетических и геокомпозитных материалов отечественного производства на оросительных каналах рассмотрены и одобрены секцией мелиорации Научно-технического совета Минсельхоза России.

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

Рабочая гипотеза. Практически полное исключение потерь воды на фильтрацию, повышение коэффициента полезного действия каналов и исключение не-

гитивного воздействия вод может быть достигнуто совершенствованием конструктивных решений новых противofильтрационных покрытий, развитием методов их расчета, исследованием физико-механических характеристик облицовок с течением времени, что позволит дополнить и развить систему знаний в области применения современных строительных материалов для противofильтрационных целей в гидротехническом строительстве.

Задачи исследования:

- выполнить обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований в области применения геосинтетических материалов для противofильтрационных целей на оросительных каналах;

- обосновать новый подход к созданию противofильтрационных покрытий каналов на основе бентонитовых материалов;

- разработать новые технические решения в виде противofильтрационных покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками для оросительных каналов;

- разработать высокоэффективные многослойные конструкции противofильтрационных покрытий каналов из геосинтетиков и технологии их создания;

- оценить фильтрационные потери через облицовки каналов из геомембран и геосинтетических бентонитовых материалов;

- предложить фильтрационные и численные модели водопроницаемости противofильтрационных покрытий каналов при наличии в них дефектов;

- разработать методики расчета эффективности и водопроницаемости противofильтрационных покрытий, в том числе при повреждаемости и самозалечивании бентонитом;

- установить показатели и получить значения самозалечивания единичных повреждений в покрытиях из бентонитовых материалов;

- исследовать в лабораторных условиях коэффициент фильтрации и физико-механические характеристики геосинтетических материалов на основе бентонита;

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

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

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

Научная новизна исследования:

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

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

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

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

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

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

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

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

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

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

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

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

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

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

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

Практическая значимость работы состоит в следующем:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Объект исследования – оросительные каналы гидромелиоративных систем.

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

Положения, выносимые на защиту.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается тем, что:

- некоторые из разработанных конструкций противofильтрационных покрытий апробированы на опытном участке оросительного канала в натурных условиях;
- теория численного моделирования с помощью программного комплекса «FreeFem++» построена на распространенном методе конечных элементов;

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

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

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

- использованы сертифицированные приборы, оборудование и программное обеспечение при проведении экспериментальных и натуральных исследований противofильтрационных покрытий оросительных каналов.

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

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

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

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

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

вычислительных машин; 2 статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Общий объем работы составляет 352 страницы машинописного текста, в том числе 122 рисунка и 39 таблиц. Список литературы включает 313 источников, в том числе 73 зарубежных.

Работа была выполнена в Гидротехническом отделе ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» в 2016–2023 годах.

Автор благодарит профессора, доктора технических наук Ю. М. Косиченко, профессора, доктора технических наук А. В. Колганова, профессора, доктора технических наук А. В. Ищенко, а также профессора, кандидата технических наук В. Н. Шкуру за ценные советы, предложения и пожелания по диссертации.

Автор выражает также особую благодарность доценту, доктору технических наук М. П. Саинову за замечания по содержанию и структуре диссертационной работы.

Глава 1. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

1.1 Обзор исследований отечественных ученых по применению полимерных материалов для противofильтрационных покрытий

Опыт применения противofильтрационных устройств в гидротехнических сооружениях из полимерных, геосинтетических и композитных материалов в нашей стране составляет более 60 лет. Решением задач водопроницаемости полимерных экранов, фильтрации воды из каналов и водоемов занимались: Н. Н. Павловский [151, 152], С. Ф. Аверьянов [7, 8], А. Г. Алимов [9–12], В. И. Аравин [23, 24], В. В. Ведерников [49, 50], Н. Н. Веригин [51], И. М. Елшин [77, 78], В. Н. Жиленков [81], Ю. М. Косиченко [104, 110, 128, 130, 133, 134, 233], Ц. Е. Мирцхулава [141, 142], В. П. Недрига [144, 145], П. Я. Полубарина-Кочина [93, 135, 173], П. Ф. Фильчаков [221, 222], Р. Р. Чугаев [228] и многие другие исследователи.

Детальные исследования фильтрационных режимов плотин и их противofильтрационных элементов из различных грунтовых и негрунтовых материалов проведены К. Н. Анахаевым [14–19], Н. А. Анискиным [20–22], А. Г. Баламирзовым [38–40], В. Б. Глаговским [59], А. Л. Гольдиным [66], Л. Н. Рассказовым [187, 188], М. П. Саиновым [83, 84, 182, 190] и другими [6, 13, 47, 54, 109, 198].

Эффективность применения синтетических материалов в гидротехническом строительстве отмечается в работах М. А. Бандурина [42, 156], В. А. Волосухина [52–54, 191], А. П. Гурьева [76, 80], А. В. Еремеева [79], Т. П. Кашариной [96, 97], К. Д. Козлова [101], А. А. Ткачева [217–220], Н. В. Ханова [101, 223, 224], В. И. Штыкова [48, 230], В. Н. Щедрина [232, 235, 237] и др.

Вопросам разработки и создания конструкций облицовок оросительных каналов, водоемов и прудов-накопителей из полимерных материалов посвящены работы Д. В. Баклановой [33, 36, 37], В. А. Белова [43–45], В. Д. Глебова [62, 63], А. В. Ищенко [87–92], И. А. Печенежской [169, 170], Е. О. Скляренко [194–196],

М. А. Чернова [226, 227], В. П. Ягина [153, 154] и других [26, 32, 55, 94, 102, 103, 183, 186, 192, 238].

Большой вклад в развитие исследований геосинтетических материалов и их применение в гидротехническом и природоохранном комплексе внесли Д. Г. Золотозубов [85, 147], М. А. Лопатина и Р. Н. Орищук [204], А. Б. Пономарев [176, 177, 212], С. В. Сольский [65, 200–203], а в разработку новых технологий восстановления облицовок – Ф. К. Абдразаков [1–4], В. М. Давиденко [150], Г. В. Охапкин [148, 149], А. А. Созаев [199], А. Ю. Гарбуз [56–58] и многие другие ученые [30, 34, 35, 118, 163, 175, 193, 242].

В работах С. Ф. Аверьянова [7, 8] приведена задача фильтрации из канала в дренирующие стоки при высоком уровне грунтовых вод и конечной глубине водоупора, которая решена методом конформных отображений с использованием формулы Кристоффеля–Шварца, а также задача подпертой фильтрации из канала с учетом испарения с поверхности, где использован метод годографа скорости.

Фундаментальная монография П. Я. Полубариновой-Кочиной [173] посвящена основным методам теории фильтрации, где рассматриваются задачи фильтрации под плоским флюэтбетом в слое бесконечной и конечной глубины при наличии шпунта, фильтрации из канала и приток к дренам с использованием функции Жуковского и метода инверсии, фильтрации из канала трапецеидального сечения с учетом капиллярности, смешанной задачи теории функций и ее приложений к задачам теории фильтрации и другие.

В работах В.В. Ведерникова [50], Н. Н. Павловского [152] и В. П. Недриги, которые, наряду с работами [7, 132, 173], относятся к классическим в теории фильтрации и находят широкое применение методы конформных отображений.

Впервые задачи водопроницаемости экранов с системой щелей в гидромеханической постановке были поставлены и решены В. П. Недригой (1976) [145], а затем в ряде работ Ю. М. Косиченко [126, 133]. Кроме этого, в работе В. П. Недриги [141] представлено решение задачи водопроницаемости для шпунтовых стенок применительно к пленочным экранам с непрерывными щелями. Однако решение такой задачи получено в упрощенной постановке, где область филь-

рации представляет собой бесконечную полуполосу. Кроме того, полученные расчетные формулы затруднительно использовать при малых параметрах щелей.

В работах Ю. М. Косиченко [126, 121, 133] использованы классические методы решения задач водопроницаемости, как в упрощенной постановке, где область комплексного потенциала принимается в виде полуполосы, так и точной постановке с использованием годографа скорости и области комплексного потенциала в виде четырехугольника. Такой подход позволил получить в ряде случаев более простые расчетные формулы, а в некоторых – точные решения.

В течение 1960–1995 гг. у нас в стране широко использовались полимерные пленочные экраны в качестве грунтопленочных и бетонопленочных облицовок на каналах и водоемах. Для их создания применялись полимерные материалы, выпускаемые отечественной промышленностью – пленки из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и низкой плотности (ПЭНП), а также поливинилхлорида (ПВХ). Толщина выпускаемых пленок составляла 0,20–0,30 мм, а давление прокалыванию твердыми частицами грунта (ввиду малой толщины пленок) [111] незначительна $P_{\text{пк}} = 0,05–0,10$ МПа, в то время как давление к прокалыванию геомембраны, например, толщиной 1,0 мм, значительно выше, и составляет $P_{\text{пк}} = 0,30–0,35$ МПа. Это свидетельствует о том, что при толщине геомембраны $\delta_{\text{тр}} = 1,0$ мм сопротивление прокалыванию противодиффузионного геосинтетического материала составляет не менее: $\sigma_{\text{пк}} = \frac{(P_{\text{пк}})_{\text{гк}}}{(P_{\text{пк}})_{\text{пл}}} = \frac{0,3}{0,1} = 3$ -х раз. Отсюда сле-

дует, что полимерные геомембраны обеспечивают более значительный противодиффузионный эффект (выражающийся в меньшей поврежденности геомембран по сравнению с пленками), и превышающий эти показатели в 3,0–3,5 раза.

В последние 10–20 лет все более широкое применение находят геосинтетические материалы [92, 94] в малой гидротехнике. Они могут успешно использоваться на сооружениях природоохранного назначения – золоотвалах, накопителях промышленных отходов, а также на каналах и водоемах.

Перспективным считается применение противодиффузионных устройств из геосинтетических материалов на оросительных каналах, где потери достигают

30 % и более, из которых 70–75 % приходится на фильтрацию [31]. На текущий момент коэффициент полезного действия (КПД) большинства оросительных каналов составляет 0,75–0,80, а при использовании противофильтрационных облицовок с применением геосинтетических материалов КПД достигнет значений 0,93–0,95 [244]. Таким образом, противофильтрационный эффект от применения геосинтетических материалов на каналах может составить 20–30 %.

Несмотря на то, что облицовки с использованием геосинтетических материалов отличаются высокой надежностью, в них все-таки могут образовываться различные повреждения при строительстве и эксплуатации. Вследствие этого, исследованиям водопроницаемости полимерных экранов, облицовок и покрытий посвящено значительное количество научных работ.

Среди этих работ следует отметить статью авторов Ю. М. Косиченко и О. А. Баева [111], где рассматриваются различные методы расчета водопроницаемости полимерных экранов: экспериментальные, теоретические и экспериментально-теоретические. По результатам теоретических формул установлено, что расчеты по формулам авторов [111] и В. Н. Жиленкова [81] дают близкие значения удельного расхода фильтрации через непрерывную щель, а по формуле В. Н. Недриги получено значительное расхождение до 30–50 %.

В работе М. А. Бандурина [41] представлен разработанный им программно-технический комплекс, используемый для диагностики технического состояния водопроводящих гидротехнических сооружений на оросительных системах, позволяющий выявлять дефекты на облицовках и грунтовом основании с помощью акустического и георадарного способов неразрушающего контроля.

Авторы статей [183, 184] А. Прямицкий и Ю. Шлее рассматривают бентонитовые маты как альтернативный материал для противофильтрационных элементов ГТС. Как отмечается в их работах, бентонитовые маты заводского изготовления применяются уже более 20 лет. Первый опыт применения относится к 1988 г. В последние 20 лет началось более активное применение бентоматов, которые были разработаны взамен грунтовых (в частности, глиняных) экранов. В конце 90-х годов были проведены исследования по изучению изменения свойств бентонитовых матов в зависимости от времени, а также для подтверждения гипотезы само-

залечивания при увеличении в объеме. Было изъято 8 шурфов и отобрано 7 образцов из бентоматов на различных полигонах. Для доказательства регенерации бентоматов проводились лабораторные опыты на лизиметрах, а также рентгеновские испытания [183, 184]. Эти исследования показали, что бентонитовый мат полностью восстанавливает начальные свойства при наличии повреждений. В ходе лабораторных опытов понижение эффективности в работе бентоматов фиксировалось только в короткий период после укладки, в дальнейшем эффективность сохранялась на уровне 98–99 %.

М. П. Саиновым и А. О. Зверевым [297] проведены исследования напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины с противотриационным экраном, основным водонепроницаемым элементом которой является полимерная геомембрана. Моделирование тонкой геомембраны проводилось на примере плотины Bovilla (Албания), построенной в 1996 г. Результаты численных расчетов показали, что наиболее уязвимым элементом плотины является узел сопряжения экрана с бетонным сооружением [297].

А. С. Просвиряков и другие в работе [182] рассматривают результаты экспериментальных исследований полимерных геомембран (из поливинилхлорида и полиэтилена) на растяжение. Методика испытания отличается от стандартной и аналогична принятой за рубежом. Геомембрана, закрепленная по краям, испытывает нормальное состояние и находится в состоянии двухосного растяжения. Как показали эксперименты, прочность на растяжение геомембран из полиэтилена примерно в несколько раз выше, чем у геомембран из поливинилхлорида.

Как известно, при полном насыщении водой всех пор грунта основания, расходы фильтрационного потока будут максимальными. При неполном насыщении грунта основания (согласно С. Ф. Аверьянову [8]) передвижение жидкости происходит в условиях трехфазной системы: скелет грунта–жидкость–газ. Водопроницаемость в этом случае будет зависеть, помимо факторов, определяющих коэффициент фильтрации, также и от влажности или степени насыщения (ω).

Интересные исследования по самозалечиванию глиноцементной диафрагмы грунтовых плотин приведены в статье [154]. На примере плотины Гоцатлинской ГЭС рассмотрен процесс кольматирования щелевидных повреждений такой диа-

фрагмы. Разработаны математические модели в двухмерной и трехмерной постановке. Путем численного моделирования получена количественная оценка динамики значений градиентов напора для таких случаев: полностью исправного противодиффузионного элемента, со сквозной и замытой трещиной.

В другой работе [283] рассматривается эффективность и долговечность облицовок оросительных каналов из геосинтетических материалов. Дается также расчет эффективности и долговечности бентоматов, в том числе при наличии круглого повреждения, которое при заилении залечивается в результате гидратации гранул бентонита, где наблюдается метод последовательной смены стационарных состояний. Результаты расчета по полученным формулам [281] показали, что прогнозный срок службы бентоматов составит около 130 лет.

Оригинальные исследования по самозалечиванию глиноцементной диафрагмы грунтовых плотин представлены С. В. Сольским и другими в статье [200]. Авторами [200] разработаны математические модели в двухмерной и трехмерной постановке. Используя численное моделирование, получена количественная оценка значений градиентов напора для различных случаев (полностью исправного противодиффузионного элемента со сквозной и замытой трещиной).

По мнению авторов [197], при реконструкции плотин лучше использовать геокompозитный материал, состоящий из геомембраны ПВХ в комбинации с геотекстилем (совмещенными во время изготовления), обладающим противопрокольными и дренирующими свойствами. Геокompозит из ПВХ, представляющий собой гибкие листы, укладывался непосредственно на поврежденную поверхность.

На большинстве бетонных плотин, где при реконструкции применялись геомембраны, использовался материал, включающий натяжной элемент из мембраны ПВХ (толщиной 2,5 мм), сопряженной во время изготовления с геотекстилем плотностью 500 г/м^2 [197]. Такие покрытия отличаются повышенной надежностью и долговечностью при эксплуатации.

Ряд ведущих российских компаний по производству бентонитовых материалов уже несколько лет занимаются изготовлением и совершенствованием новых композитных бентонитовых покрытий, совмещенных с мембранами и (или) геотекстилями. Так, при строительстве объектов природоохранного назначения

в Финляндии использовался комбинированный экран из бентонитового мата и дренажного материала, характеризующегося повышенным содержанием монтмориллонита, дополненный самогерметизирующимся краем и усиленный дополнительным слоем нетканого геотекстиля [185]. В результате такой материал получил характеристики, превосходящие стандартные на 25 %, а самогерметизирующиеся края матов позволили сократить время монтажа, обеспечив при этом герметичность швов материала. Кроме того, согласно [185], были выполнены работы по гидроизоляции хвостохранилища в Азербайджане с помощью усовершенствованных бентонитовых противofiltrационных покрытий, площадки временного хранения отходов в Приморском крае, пруда в Центральном парке г. Актобе, резервуарах для накопления вод в г. Самаре [185].

В статье, посвященной лабораторным исследованиям геосинтетических материалов применительно к гидротехническим сооружениям [203], анализируются методики их испытаний, и обращается внимание на то, что некоторые важные вопросы, связанные с совместной работой геосинтетического элемента и контактирующего с ним материала ГТС, не рассматриваются. В частности, кольматант фильтрующего геосинтетика частицами грунта, работа в зоне переменного уровня, при периодическом промерзании и оттаивании, допустимые скорости контактной фильтрации на поверхности противofiltrационных элементов и др. Так, исследования водопроницаемости и суффозионной устойчивости модели элемента грунтового ГТС, проведенные с использованием вертикального фильтранно-суффозионного прибора, показали, что фильтрующие геосинтетики (например, геотекстили) выполняют функцию защиты и играют роль фильтра, предотвращающего вынос частиц. Результаты исследований геосинтетических материалов [203] показали значительную их устойчивость к процессам кольматации грунтовыми частицами. Определение водопроницаемости бентонитовых матов проводились на малом фильтранно-компрессионном приборе. В опытной установке происходило набухание бентонита при градиентах 186–200, при этом коэффициент фильтрации составил $K_{\phi} = A \cdot 10^{-5}$ м/сут, а после стабилизации фильтранно-режима – $K_{\phi} = A \cdot 10^{-6}$ м/сут.

1.2 Анализ исследований зарубежных ученых по применению геосинтетических материалов для противofильтрационных целей

Обширные исследования по вопросам водопроницаемости (или фильтрационным утечкам) через экраны из геосинтетических материалов и многослойных геокомпозигов были проведены за рубежом, а именно: А. У. AbdelRazek [240, 241], R. W. I. Brachman [252, 261, 296], Yu. Bowei [251], W. Cen [254–256], A. Comer [257], J. P. Giroud [250, 263, 264], X. Han [269, 270], Y. G Hsuan [272], W. Johnson [277], H. Plusquellec [291], R. M Koerner и G. R. Koerner [279–281], R. K. Rowe [287, 295], A. M. Scuro и G. Vasketti [299–301], M. Snell [305], G. Stoltz [306], R. S. Thiel [262], N. Touze-Foltz [309–311] и другими учеными [245, 246, 248, 259, 290, 307, 308, 313].

Результаты исследований противofильтрационной эффективности облицовок оросительных каналов, в том числе с применением материалов геосинтетических бентонитовых (далее бентонитовых материалов), изложены в работах А. Iyer и R. Mahajan [276], E. Blond [249], R. Hanna [271], T. Shehzad [302], а опыт применения полимерных геосинтетических покрытий на водохранилищах и дамбах в качестве противofильтрационных устройств представлен в статьях R. Bhowmik [247], D. Cazzuffi [253], D. Poulain [292], B. Sinmez, Y. M. Shu [303, 304] и других публикациях [258, 278, 289, 294, 305].

В зарубежной практике противofильтрационные покрытия с применением геосинтетических бентонитовых материалов и геомембран на оросительных каналах применялись ограниченно ввиду отсутствия натуральных данных об их водопроницаемости, самозалечивании, устройстве на крутых откосах и в условиях сезонного функционирования каналов.

В 2003 г. Федеральным институтом исследования материалов в Берлине («Federal Institute for Materials Research and Testing») были разработаны методики и проведены испытания бентонитовых матов. Полученные результаты превзошли все прогнозы по долговечности материала. Используя метод экстраполирования Аррениуса, были получены прогнозы о возможности использования бентонитовых матов первоначально в течение 200 лет. В дальнейшем опыты были продолжены,

но никаких отказов не было зафиксировано. При этом путем использования метода экстраполяции было установлено, что работоспособность бентонитовых матов сохраняется в течение более чем 400 лет.

С целью оценки эффективности работы противofильтрационного покрытия с применением натриевого бентонитового материала T. Shehzad, M. Yaseen, M. Afzal и другими [302] были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение фильтрационных характеристик различных смесей (бентонита, песка и др.), для снижения фильтрационных потерь на оросительном канале С-1 в Пакистане. Выполненные авторами [302] исследования позволили подобрать наилучший состав бентонитовой смеси для конкретных условий оросительного канала.

Другим успешным примером применения геосинтетических материалов является проект реконструкции оросительного канала (2009–2010 гг.) в штате Харьяна (Индия) [276]. В исследованиях A. Iyer, R. Mahajan, M. Korulla отмечается, что потери на необлицованных каналах составляли 35–50 % от водозабора, а на заболоченных облицованных участках наблюдался подпор облицовок грунтовыми водами. Было принято решение об использовании в проекте трехслойных композитов.

Применение конструкции облицовки из геосинтетических материалов позволило значительно снизить потери воды на фильтрацию и повысить пропускную способность канала. В статье отмечается эффективность применения геосинтетиков как альтернативы традиционным противofильтрационным покрытиям.

J. P. Giroud [265] в результате многочисленных экспериментов получены эмпирические зависимости для определения расхода фильтрации через различные повреждения экрана в виде щели, круглого отверстия, прямоугольного элемента. При этом полученные зависимости учитывают целый ряд факторов: глубину воды (h), толщину слоя грунта под экраном (t_s), диаметр круглого дефекта в геомембране, коэффициент фильтрации слоя грунта под экраном. Помимо расчетных данных, в формуле учтены некоторые параметры, полученные в результате полевых исследований, а именно коэффициент качества контакта мембраны с основанием (при плоских условиях $C_{q_0} = 1,15$), а также качество укладки геомембраны в зави-

симости от количества дефектов на площади в 1 акр (1 – «отличное», 1–4 – «хорошее», 4–10 – «удовлетворительное», 10–20 – «неудовлетворительное») [265].

Более сложные зависимости были получены R. K. Rowe, N. Touze-Foltz [309, 310] в результате аналитического решения задачи фильтрации через композитные покрытия с дефектами в геомембране, основанного на использовании «модифицированных» бесселевых функций.

В научной работе G. R. Koerner, R. M. Koerner [279] рассматривается прогноз долговечности экспонированных геотекстилей и геомембран. Период полураспада неэкспонированных (или покрытых) геомембран из полиэтилена высокой плотности (HDPE) толщиной 1,5 мм при сохранении 50 % прочности составлял около 450 лет. На открытые геомембраны непосредственно воздействует ультрафиолетовое излучение и повышенная температура, что сокращает срок их службы. Результаты исследований срока службы для геомембран составили от 47 до 97 лет, что потребовало 12 лет их изучения в лабораторных условиях [279].

A. Y. AbdelRazek и другими [240] лабораторным путем была исследована пропускная способность противofильтрационных экранов из многокомпонентных геосинтетических материалов для пяти различных видов бентонитовой глины. По результатам было установлено, что предварительная гидратация и проникновение бентонита с солевыми растворами приводит к более высокой пропускной способности, чем с водой.

В статье [311] N. Touze-Foltz, R. K. Rowe, C. Duquennoi излагаются новые зависимости для расчета скорости потока жидкости через композитное покрытие с различными отверстиями. Решение этой задачи для круглого отверстия и поврежденного покрытия можно использовать для сопоставления с лабораторными исследованиями, моделирования полевых опытов и анализа фильтрации в натуральных условиях. Как показывают данные фильтрационного расхода через отверстие в геомембране по расчетным зависимостям J. P. Giroud [264] и других, автором [311] получены близкие результаты. Вместе с тем по формуле R. K. Rowe [311] расхождение достигает 75 %, что можно объяснить необходимостью использования специальных функций.

В работе авторов [285] получено решение задачи фильтрации для полимерного экрана из геомембраны через систему щелей. Сравнение результатов расчета с формулой J. P. Giroud показывает большое расхождение, достигающее 67–128 %. Такое расхождение от других формул можно объяснить использованием закона нелинейной фильтрации и эмпирическими коэффициентами по данным полевых исследований.

N. Touze-Foltz и J. P. Giroud [309] было получено эмпирическое уравнение для определения скорости течения потока жидкости через три типа дефектов композитного покрытия (круглые повреждения, дефекты бесконечной длины и повреждения в виде трещин), а также рассматривалось три типа контакта геомембраны и грунта основания (при «отличном», «хорошем» и «плохом» качестве).

Долговечность открытых геомембранных покрытий представлена и в ряде других научных работ [254, 293, 309]. Такие факторы как ультрафиолетовое излучение, повышенная температура и воздействие кислорода сокращают срок службы геомембран. Для исследований использовались ультрафиолетовые лампы при температурах 80, 70 и 60 °C при снижении прочности и удлинения до 50 % [293].

Влияние дефекта в геомембране на фильтрацию воды в грунтовых плотинах и меры контроля водопроницаемости рассмотрены W. He Sen и D. H. Li в статье [254]. Дефекты в противофильтрационном экране могут привести к потенциальной опасности плотин, выполненных с полимерными геомембранами на их поверхности и используемых для снижения фильтрационных потерь. Поэтому трехмерные насыщенно-ненасыщенные поля просачивания с различными размерами дефектов в геомембране моделировались авторами [254] с использованием «методов удаления дефектных элементов и усиления проницаемости» [254].

Под геосинтетическим материалом будем понимать класс строительных материалов, как правило, синтетических, используемых для создания слоев различного назначения (гидроизоляционных, дренирующих, защитных, фильтрующих, армирующих, разделительных и др.) [274].

Обобщенная схема геосинтетических покрытий, которые наиболее распространены применяются в гидротехническом и гидромелиоративном строительстве,

а также в разработанных автором конструктивных решениях (конструкциях противофильтрационных покрытий оросительных каналов) приведена на рисунке 1.1.

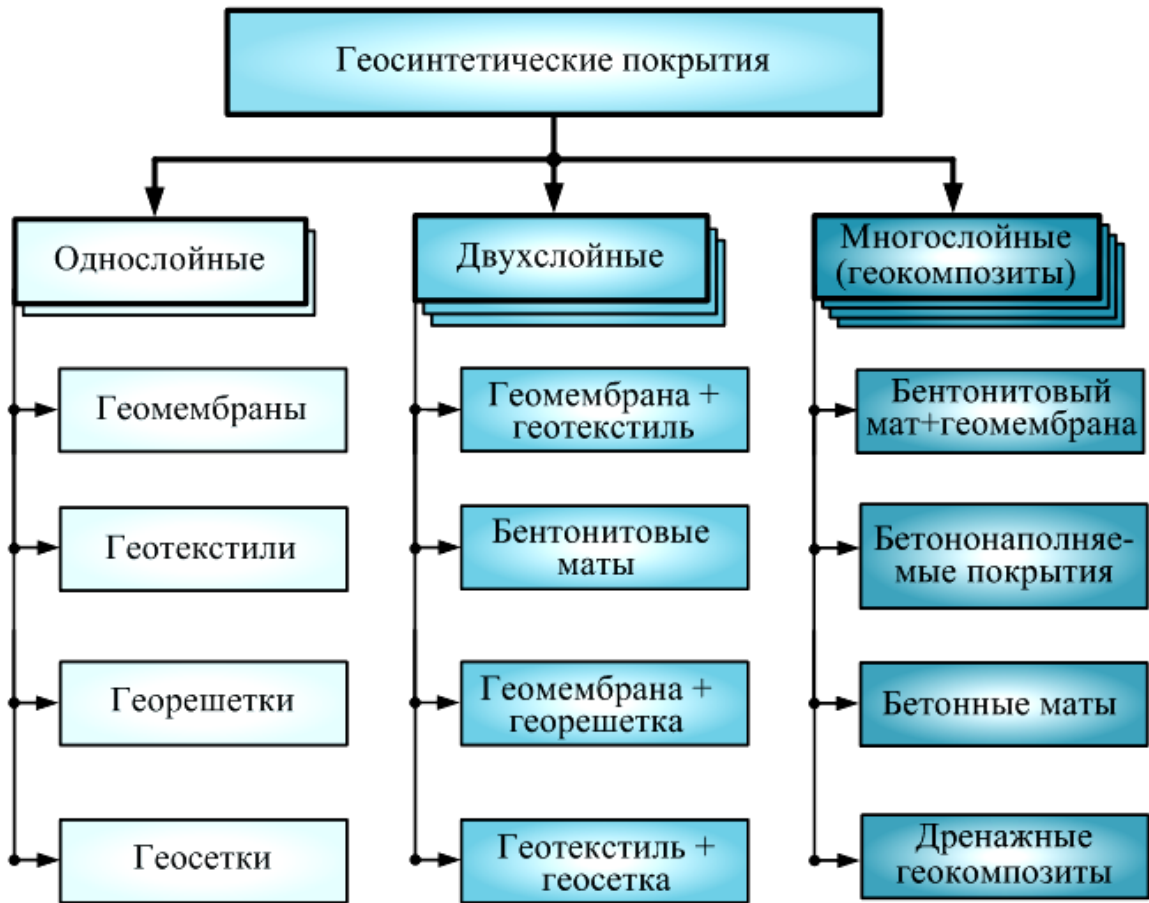


Рисунок 1.1 – Геосинтетические покрытия, используемые при создании противофильтрационных конструкций на оросительных каналах

В данной схеме геосинтетические покрытия предлагается подразделить на три основные группы:

1) однослойные, состоящие из единого материала, изготовленного в заводских условиях и применяемого в конструкциях покрытий каналов для противофильтрационных и других (например, защитных) целей;

2) двухслойные, включающие два геосинтетических материала (с наполнителем или без него), к которым отнесены покрытия на основе геомембран, совмещенных в заводских или производственных условиях с геотекстилем и другими геосинтетиками, а также бентонитовые материалы, бетонные маты и др.;

3) многослойные, как правило, геокомпозитные материалы, сочетающие два-три и более геосинтетика или компонента (наполнителя), благодаря которым такие материалы могут выполнять несколько функций одновременно. К таким по-

крытиям предлагается отнести совмещенные материалы на основе бентонита или бетона, полимерных геомембран, геотекстилей и др.

Другая классификация геосинтетических материалов, применительно к противofильтрационным и дренажным устройствам гидротехнических сооружений, разработана и приведена в [125], где предлагается все геосинтетики разделить на две большие группы: водопроницаемые и водонепроницаемые.

В зарубежных работах в последнее время уделяется значительное внимание исследованиям бентонитовых материалов, в том числе включающих дополнительные (дублирующие) противofильтрационные элементы. При этом рассматривается слой бентонита, который заключен в капсулу между двумя геомембранами, чтобы уменьшить вероятность преждевременной гидратации бентонита.

В статье авторов J. P. Giroud, R. S. Triel [264] исследуется гидратированное бентонитовое покрытие, сформированное с использованием панелей, состоящих из геомембраны и бентонита. Авторы указывают, что вода может мигрировать из грунтового слоя в бентонит из-за разницы напора (на фоне гидратации) [264]. Исходя из изложенного, представлен аналитический метод оценки степени гидратированной площади покрытия от времени, начальной и гидратированной влажности бентонита, гидравлических характеристик, ширины и расстояния между полотнами экрана. При этом численные расчеты [264] показывают, что для типичных значений параметров потребуются много десятилетий для достижения эффекта гидратации всего слоя бентонита в противofильтрационном экране.

Аналогичные исследования также представлены в работе [265], где отмечается, что одним из преимуществ бентонитового слоя, заключенного между двумя геомембранами, является уменьшение риска снижения прочности на сдвиг вследствие гидратации бентонита. При наличии дефекта в верхней геомембране часть жидкости, изначально находящаяся над верхней геомембраной, переходит в бентонит, а после мигрирует в боковом направлении в бентонитовом порошке между двумя геомембранными полотнами. На основе анализа результатов в работе [265] рассмотрены аналитические решения для одномерных и осесимметричных случаев. Для двух случаев получено: 1) уравнение, необходимое для того, чтобы про-

цесс гидратации достиг определенного расстояния от дефекта в геомембране; 2) уравнение, которое показывает скорость просачивания жидкости через дефект. В результате, чтобы фронт гидратации достигал относительно небольшого расстояния (например, нескольких метров) потребуется около 10 лет. Проведенный анализ работы J. P. Giroud и D. E. Daniel [265] свидетельствует об эффективности многослойных противofильтрационных покрытий, состоящих из бентонита и двух слоев геомембран.

В статье зарубежными I. V. Scalia и другими [298] предлагается модифицировать бентонит для предотвращения изменения гидравлической проводимости при проникновении агрессивных неорганических растворов. С этой целью акриловая кислота в бентонитовой суспензии была полимеризована для создания бентонит-полимерного композита (БПК). Испытания показали, что полимер БПК обычно набухает больше и сохраняет низкую гидравлическую эффективность по сравнению с природным бентонитом натрия при контакте с агрессивными неорганическими растворами. Например, Na-бентонит и полимер (аналогичный полимеру в БПК), пропитанные теми же растворами, имели пропускную способность, по меньшей мере, на три порядка выше.

Европейский опыт применения геосинтетических материалов при строительстве ПФП представлен в статье [183]. Анализируются различные виды геосинтетических материалов – геомембраны, геотекстили, георешетки, геосетки, бентонитовые маты. Применяя геомембраны как барьер для жидкостей и газов, они представляют фундаментальный элемент при создании полигонов [183]. Сырьем при изготовлении геомембран, используемых во многих странах Евросоюза, является полиэтилен высокого давления (HDPE). При строительстве полигонов в основном используется геомембрана толщиной 1,5 мм, однако в отдельных странах, в частности, в Германии, согласно техническим требованиям, необходимо использовать геомембраны повышенной толщины более 2,5 мм. Геомембраны должны быть защищены от возможных дефектов и повреждений с помощью защитных покрытий. Для этого могут быть использованы нетканые геотекстили и геосинтетические материалы из пропилена (тканый геотекстиль и др.), обычно применяемые в качестве защитных прокладок.

Правила Американского агентства защиты окружающей среды [125] и Европейская директива [125] устанавливают перспективные направления технологии захоронения отходов. Согласно Европейской директиве («European Council Directive») в основании выполняется глинистый экран толщиной не менее 1 м с коэффициентом фильтрации $k_{\phi} < 1 \cdot 10^{-9}$ м/с, на который укладывается полимерная геомембрана (HDPE) толщиной не менее 2 мм, затем поверх геомембраны устраивается дренажный слой толщиной 0,5 м. При этом на практике геомембрана дополнительно защищается слоем нетканого иглопробивного геотекстиля плотностью не менее 800 г/м², а затем укладываются отходы. Требования («US-EPA Directive») для неопасных отходов, в отличие от европейских требований, учитывают следующее: в основании устраивается глиняный экран толщиной не менее 0,6 м с коэффициентом фильтрации $k_{\phi} < 1 \cdot 10^{-9}$ м/с, затем укладывается геомембрана толщиной 1,5 мм и сверху защитный слой дренажа толщиной 0,3 м с коэффициентом фильтрации не менее 10^{-4} м/с, на дренаж – слой обычного грунта и далее отходы.

Взамен грунтовым экранам в европейских странах успешно используются бентонитовые экраны, которые сохраняют свою способность к герметизации при значительных температурах. При использовании бентонитовых матов без дополнительных мер по армированию грунта возможно возведение крутых откосов (до 1:3) за счет применения в качестве основы нетканых геотекстилей, скрепленных между собой иглопробивным способом [125].

1.3 Фильтрационные потери на каналах и факторы, влияющие на фильтрацию

Потери воды при фильтрации из оросительных каналов зависят от их КПД. Чем выше КПД каналов, тем, соответственно, меньше потери на фильтрацию. В таблице 1.1 представлены обобщенные сведения о технических характеристиках каналов гидромелиоративных систем (с учетом [134]), в том числе данные по протяженности каналов, расходам воды и КПД (проектному и фактическому значению, полученному по результатам расчета и натурных исследований).

Таблица 1.1 – Сведения о технических характеристиках каналов и их КПД
(магистральных и межхозяйственных распределителей)

№ п/п	Наименование канала	Год ввода	Протяженность, км	Расход воды, м ³ /с	КПД, проект, факт
1	2	3	4	5	6
Магистральные каналы (МК)					
1	Донской магистральный	1952	112,0	165,0	<u>0,93</u> 0,90
2	Азовский	1952	92,3	20,0	<u>0,83</u> 0,78
3	Багаевский	1954	36,6	34,5	<u>0,84</u> 0,75
4	Пролетарский	1965	83,3	54,1	<u>0,90</u> 0,85
5	Нижне-Донской	1952	73,8	30,2	<u>0,86</u> 0,78
6	Верхне-Сальский	1960	99,4	30,2	<u>0,85</u> 0,70
7	Большовский	1963	29,1	22,3	<u>0,87</u> 0,73
8	Садковский	1971	10,8	11,2	<u>0,93</u> 0,86
Межхозяйственные Багаевские распределители (Бг-Р)					
9	Бг-Р-5	1954	5,2	7,8	<u>0,95</u> 0,86
10	Бг-Р-6	1954	24,0	7,2	<u>0,85</u> 0,77
11	Бг-Р-7	1954	22,6	7,5	<u>0,83</u> 0,78
12	Бг-Р-8	1954	25,2	9,0	<u>0,96</u> 0,87
Другие каналы					
13	Большой Ставропольский канал (БСК), БСК-1	1973	156,0	180,0	<u>0,56</u> 0,92
14	БСК-2	1974	64,4	60,0	0,80
15	БСК-3	1983	42,5	50,0	0,85
16	БСК-4	2001	25,3	53,0	0,90
17	Невинномысский канал	1948	49,2	75,0	0,85
18	Право-Егорлыкский канал (ПЕК)	1955	127,0	45,0	0,75
19	Левая ветвь ПЕК	1974	230,0	23,0	0,75
20	Терско-Кумский канал	1960	146,0	100,0	0,75
21	Кумо-Манычский канал	1960	96,2	60,0	0,75
22	Магистральный канал ЛЕООС	1985	10,0	31,0	0,85
23	Наурско-Шелковский канал	1960	167,0	27,0	0,75
24	МК Пануро-Калининской ОС	–	42,4	96,0	0,80
25	МК Черноерковской ОС	–	25,0	25,0	0,82

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
26	Федоровский МК Федоровской ОС	–	37,0	111,0	0,80
27	МК Марьяно-Чебургольской ОС	–	40,0	185,0	0,85
28	МК Кубанской ОС	–	75,0	60,0	0,85
29	Грушевский распределитель	–	3,5	55,0	0,90
30	Александровский распределитель	–	71	21,0	0,90
31	Чернолесский распределитель	–	69	8,0	0,85
32	Саблинский распределитель	–	77	21,0	0,80
33	Октябрьский распределитель	–	42,6	10,5	0,85
34	Елизаветинский распределитель	–	52,8	13,5	0,85
35	МК Петровско-Анастасиевской ОС	–	18,9	80,0	–

Примечание.

Земл. – земляное русло; обл. – облицовка.

Представленные сведения не являются окончательными и могут меняться в зависимости от различных условий функционирования оросительных каналов, площади орошения и др.

Анализ представленных данных показывает, что наибольшие значения фактического КПД имеют Донской МК – 0,90, а проектное значение КПД составляет 0,93. Кроме того, высокие значения фактического КПД имеют БСК–1 – 0,928 и еще больше значения проектного КПД – 0,956.

Некоторые каналы характеризуются высокими значениями проектных КПД. Так, например, Пролетарский МК – 0,90, Садковский МК – 0,95, а также межхозяйственные распределители: Бг-Р-5 – 0,95, Бг-Р-7 – 0,95, Бг-Р-8 – 0,96. Высоким значением фактического КПД также характеризуются: БСК-4 – 0,90, Грушевский распределитель – 0,90 и Александровский распределитель – 0,92.

Низкие значения КПД имеют каналы в земляном русле: Верхне-Сальский МК – 0,70 и Большовский МК – 0,73, а также Азовский МК – 0,78, Нижне-Донской МК – 0,76, Бг-Р-6 – 0,77, Право-Егорлыкский МК – 0,75, Левая ветвь ПЕК – 0,75, Терско-Кумский, Кумо-Маньчский, Наурско-Шелковский – 0,75.

На основании представленных в таблице 1.1 данных был построен график изменения КПД в зависимости от расхода воды в каналах (рисунок 1.2). Анализ графика показывает, что особенностью КПД каналов является изменчивость для средневзвешенных значений группировки точек. Осредненная линия КПД постоянно варьируется от начального максимального до конечного минимального значения.

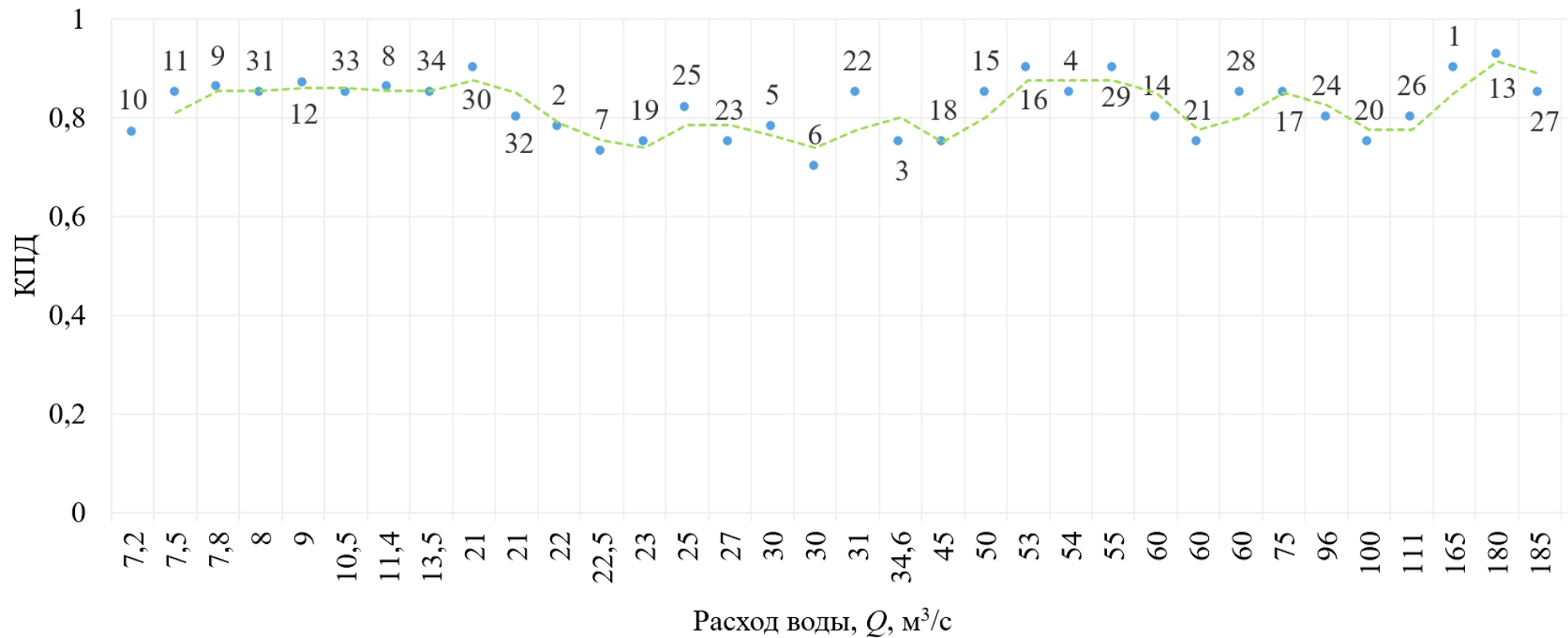


Рисунок 1.2 – График изменения КПД в зависимости от расхода каналов

Примечание: 1. Точки, показанные на графике, свидетельствуют об изменчивости КПД каналов
 2. Точки на графике соответствуют порядковому номеру канала (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.2 – Динамика потерь воды при транспортировке по земляным и облицованным руслам каналов

№ п/п	Наименование канала	Тип покрытия	Потери воды при транспортировке, млн м ³
Магистральные каналы			
1	Донской магистральный	земл./обл.	277·10 ⁶
2	Азовский	земл.	33·10 ⁶
3	Багаевский	земл.	20·10 ⁶
4	Пролетарский	земл./обл.	50,6·10 ⁶
5	Нижне-Донской	земл.	40·10 ⁶
6	Верхне-Сальский	земл.	67·10 ⁶
7	Большовский	земл.	13·10 ⁶
8	Садковский	земл./обл.	2,2·10 ⁶
Межхозяйственные Багаевские распределители			
9	Бг-Р-5	обл.	2,1·10 ⁶
10	Бг-Р-6	земл.	2,1·10 ⁶
11	Бг-Р-7	обл.	2,0·10 ⁶
12	Бг-Р-8	обл.	2,2·10 ⁶
Большой Ставропольский канал			
13	БСК-1	земл.	147·10 ⁶
14	БСК-2	земл.	57·10 ⁶
15	БСК-3	обл.	24·10 ⁶
16	БСК-4	обл.	10·10 ⁶
Другие каналы			
17	Невинномысский канал	земл.	41,5·10 ⁶
18	Право-Егорлыкский канал (ПЕК)	земл.	107·10 ⁶
19	Левая ветвь ПЕК	земл.	99·10 ⁶
20	Терско-Кумский канал	земл.	273·10 ⁶
21	Кумо-Манычский канал	земл.	65·10 ⁶

Расчет потерь воды при транспортировке по каналам за период их эксплуатации в течение 5–6 месяцев проводился по формуле:

$$S_k = Q_k \cdot L_{МК} \cdot S_{пот} \cdot T, \quad (1.1)$$

где S_k – объем потерь воды при транспортировке по каналу, м³;

Q_k – расход канала, м³/с;

$L_{МК}$ – протяженность магистрального канала, м;

$S_{пот}$ – доля процента потерь воды из канала;

T – период эксплуатации канала, сут.

На рисунке 1.3 показана динамика изменения потерь воды при транспортировке по каналам юга России. Здесь за период действия каналов в течение 5–6 месяцев наблюдается сильная изменчивость потерь от минимального объема ($2 \cdot 10^6$ м³) до некоторых максимальных значений – $55 \cdot 10^6$ м³, $65 \cdot 10^6$ м³ и $105 \cdot 10^6$ м³.

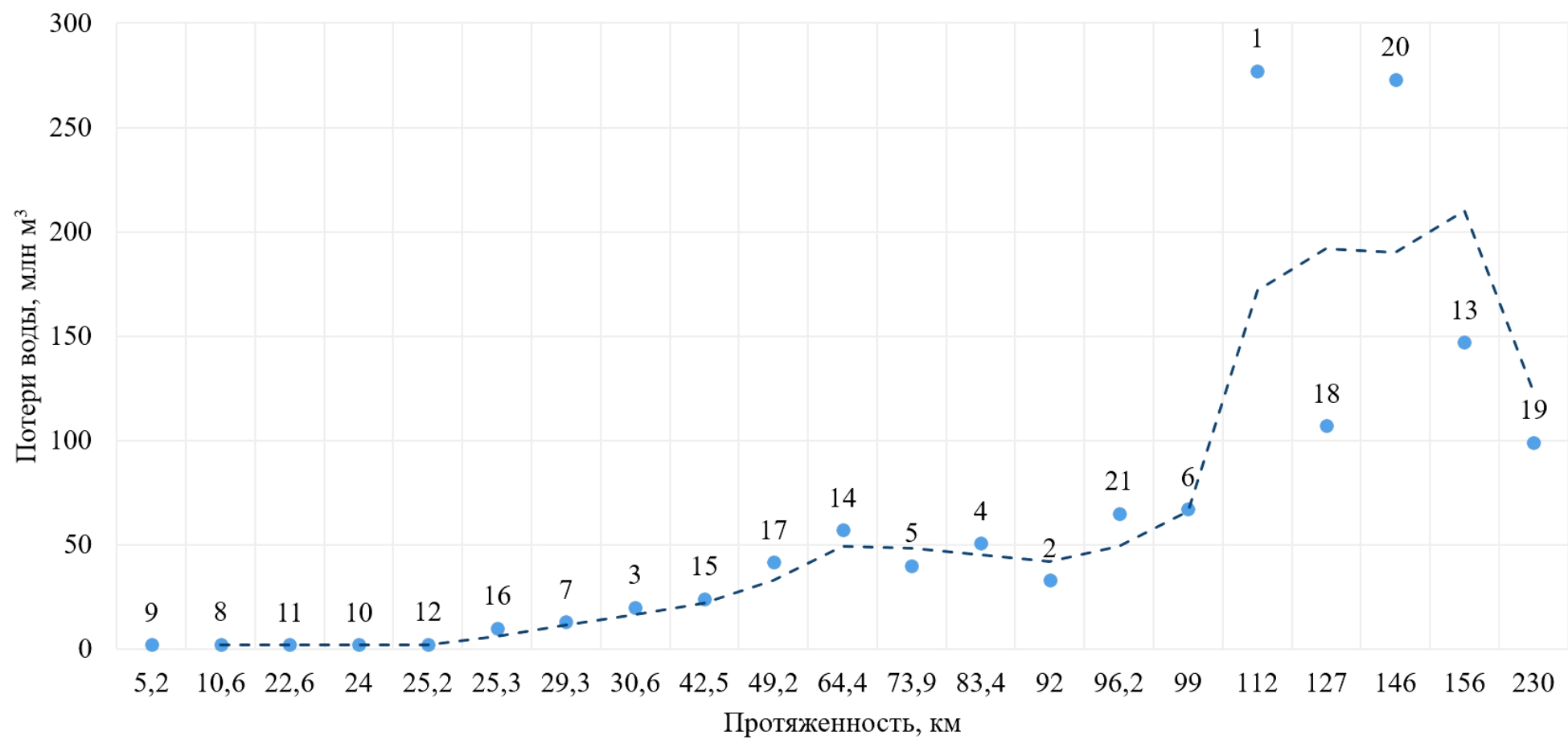


Рисунок 1.3 – Динамика потерь воды при транспортировке по каналам юга России

Согласно данным Государственного доклада «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2016 году» [75] потери воды при транспортировке в 2016 г. составляли 17,1 млн м³ и сократились по сравнению с предыдущим годом на 14,5 %. В 2015 г. эти потери были на уровне 15,4 млн м³, что на 10 % меньше, чем 2014 г.; в 2016 г. – 15,3 млн м³, то есть практически на уровне предыдущего года. При этом нужно отметить, что с ростом водопотребления (в том числе на нужды сельского хозяйства с целью орошения и обводнения) произвольно увеличиваются и потери воды на фильтрацию, особенно это отмечается в зонах с недостаточным и неустойчивым увлажнением [103, 105].

Согласно другим данным [75] в последние несколько лет наблюдается снижение потерь воды в сельском хозяйстве при орошении с 10,6 до 8,4 км³/год. При этом общий объем потерь воды с 2000-го года по настоящее время сократился более чем на 20 %.

Анализ данных [27, 82, 199] и выполненные исследования позволяют сделать вывод об осредненном процентном распределении потерь воды в оросительных системах (рисунок 1.4): потери на фильтрацию через ложе и откосы каналов – 67,1 %; эксплуатационные потери (технические и аварийные сбросы) – 9,1 %; утечки при авариях и повреждениях конструктивных элементов (12,2 %); утечки через водозаборные устройства, перегораживающие и уплотнительные элементы – 9,6 %; потери воды при испарении – 2,0 %.

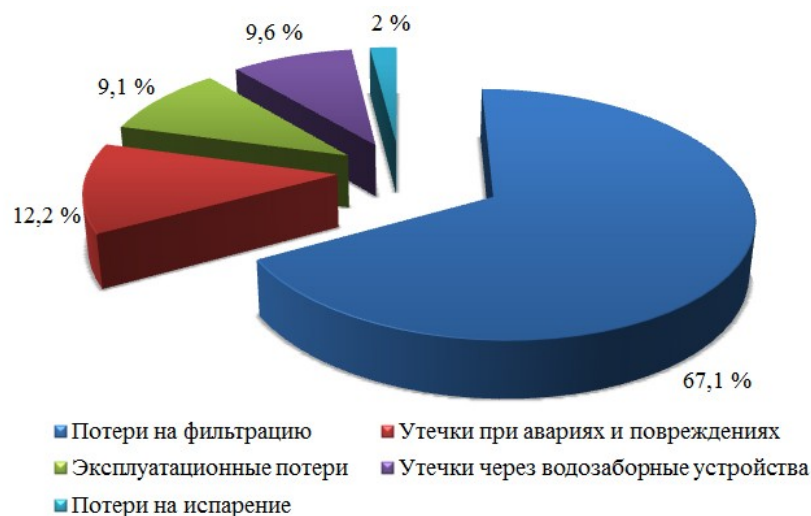


Рисунок 1.4 – Распределение потерь воды на оросительных каналах

Распределение фильтрационных потерь воды на каналах (по данным натуральных наблюдений и выполненных автором расчетов) в земляном русле и при наличии противофильтрационных облицовок приведено на рисунке 1.5.

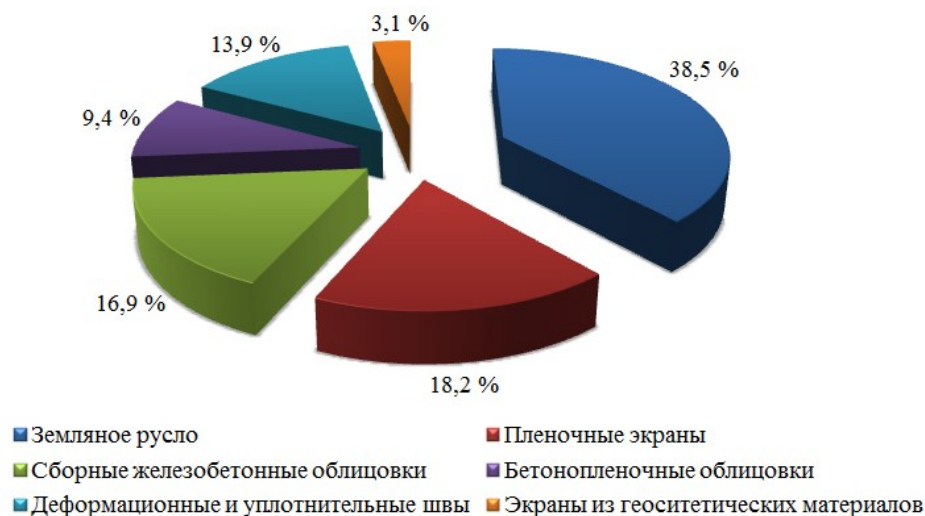


Рисунок 1.5 – Распределение потерь воды на каналах при наличии различных типов облицовок (по данным исследований)

Как видно из рисунка 1.5, наибольшие потери воды наблюдаются в земляном русле (порядка 38,5 %), а наименьшие – при наличии бетонопленочных облицовок (9,4 %) и применении геосинтетических геомембранных покрытий – 3,1 %.

По данным Департамента мелиорации Минсельхоза России, общее количество мелиоративных каналов на 2020 г. составляет 7988 с общей протяженностью 38 684 км (из которых 23 253 км – оросительные каналы и 15 431 – осушительные). Согласно данным Водной стратегии, объем потерь воды при транспортировке в Российской Федерации составляет до 8 м³/год. Непосредственно в орошаемом земледелии теряется до 4,8 м³/год из-за низкого технического уровня и значительной степени износа мелиоративных систем и гидротехнических сооружений. Общие потери воды, транспортируемой по каналам мелиоративных систем, составляют от 25 до 40 %.

По данным Экологического вестника Дона, на 2017 г. [239] потери при транспортировке в Ростовской области составили 704,93 млн м³, что на 90,17 млн м³ или 14,7 % больше предыдущего года (в 2016 г. – 614,76 млн м³).

Основное увеличение потерь в регионе, по сравнению с 2015 г., произошло за счет Донского филиала ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз» на 100,0 млн м³. В 2017 г. КПД Донского магистрального канала (ДМК) составлял 0,84, а в 2018 г. – 0,91. Потери воды обусловлены в основном фильтрацией и режимами работы канала при отсутствии технологических сбросов. В 2018 г. потери при транспортировке в Ростовской области составили 765,23 млн м³ [239], что на 8,6 % больше предыдущего года. Общий объем потерь в 2018 г. составляет 227501 тыс. м³.

В Ростовской области последующее увеличение КПД обусловлено проводимыми работами по реконструкции участков ДМК, устройством водонепроницаемых противофильтрационных покрытий [88]. При этом работа ДМК без функционирования сбросов также приводит к значительным потерям воды при ее транспортировке от водозабора до орошаемых участков.

Основными факторами, влияющими на объем потерь воды на фильтрацию, являются: тип, физико-механическая характеристика и мощность подстилающего основания, состав фракции, степень уплотненности и многие другие [8, 110, 196]. Другие факторы, влияющие на фильтрационные потери из оросительных каналов, приведены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Другие факторы, влияющие на фильтрацию из оросительных каналов

При своевременном проведении комплекса эксплуатационных и противофильтрационных мероприятий потери воды на фильтрацию могут быть снижены на 25–30 %, что приведет к увеличению расхода воды, подаваемой по оросительным системам, увеличению площади земель, которые могут быть мелиорируемы за счет сэкономленной воды на фильтрацию, и, соответственно, повышению урожайности сельскохозяйственных культур [25].

1.4 Опыт применения геосинтетических материалов для противофильтрационных покрытий

Ранее с 1930 по 1950 г. в отечественной практике в качестве противофильтрационных мероприятий использовались недорогие простейшие способы: кольматация, оглеение, нефтевание, уплотнение грунта, битумизация [125]. Такие способы снижали потери воды на фильтрацию в 3–5 раз, а срок их действия был ограниченным и составлял до 6 лет. Ввиду этого такие мероприятия не нашли широкого применения на каналах гидромелиоративных систем [29].

С 1950 по 1990 г. стали применяться более эффективные и долговечные конструкции облицовок на каналах из сборных плит и монолитного бетона, асфальтовых покрытий и противофильтрационных экранов из полиэтиленовых пленок. Бетонные облицовки отличались большей надежностью и долговечностью, чем простейшие способы. Однако слабым их элементом являлись швы, которые через 7–10 лет разрушались, что приводило к значительной их водопроницаемости. Асфальтобетонные покрытия не нашли применения по причине повреждаемости растительностью. Наибольшее применение в этот период получили пленочные экраны [174], которые обеспечивали снижение потерь на фильтрацию в 10–30 раз, а срок их службы составлял до 15–25 лет [82]. Существенным недостатком пленочных экранов была легкая повреждаемость материала при строительстве и эксплуатации ввиду малой толщины (0,2–0,4 мм) и недостаточной сопротивляемости прокалыванию и продавливания твердыми частицами грунта [125].

Только в конце 90-х годов в России стали использоваться более эффективные и надежные геосинтетические мембранные материалы, которые к тому времени уже

широко применялись для противофильтрационных целей за рубежом: в США, Германии, Франции и других странах ЕС, Канаде, Японии [125]. Наибольшее применение в качестве водонепроницаемых экранов нашли геомембраны толщиной 1–3 мм, а для дренажных целей – геотекстиль и дренажные маты.

Преимуществом геомембран перед пленочными материалами являются их высокие противофильтрационные свойства, которые на 2–4 порядка выше, чем у пленок, а их долговечность достигает 50–75 лет [125]. Геомембраны из полиэтилена высокой (HDPE) и низкой (LDPE) плотности характеризуются высокими гидроизоляционными свойствами (практически водонепроницаемы), высокой прочностью на сжатие и растяжение (до 26 МПа), большим относительным удлинением до 800 %, гибкостью и трещиностойкостью, долговечностью и устойчивостью к температуре от минус 50 до плюс 60 °С. Другим преимуществом полимерных геомембран является их высокая технологичность, что обуславливается значительной шириной рулона, а также они обладают хорошей свариваемостью в стыках, что обеспечивает высокую скорость производства работ [137].

Применение геомембран на объектах водохозяйственного и природоохранного комплекса набирает все большие обороты. Так, только с 2001 по 2005 г. по данным [60, 61], выполнены работы по гидроизоляции гидротехнических сооружений и зданий на более чем 50 объектах.

Для более широкого применения геосинтетических материалов (в том числе в гидротехническом строительстве) и используются следующие стандарты:

- ГОСТ Р 56586-2015 Геомембраны гидроизоляционные полиэтиленовые рулонные. Технические условия [73];
- ГОСТ Р 53225-2008 Материалы геотекстильные. Термины и определения [72];
- ГОСТ ISO 9862-2014 Материалы геосинтетические. Порядок отбора и подготовки образцов для испытаний [70];
- ГОСТ 33068-2014 (EN 13252:2005) Международный стандарт. Материалы геосинтетические для дренажных систем. Общие технические требования [68].

Из зарубежных нормативных документов, регламентирующих выпуск и применение геосинтетических материалов, следует отметить следующие:

- ISO 10318-2015-04-01. Международный стандарт. Геосинтетики [274];
- GRI GM13 «Методы испытаний. Свойства и частота испытаний для полиэтилена высокой плотности, гладких и текстурированных геомембран» [267];
- GRI GM17 «Методы испытаний. Свойства и частота испытаний для линейных полиэтиленов низкой плотности с гладкими и текстурированными геомембранами» [268] и др.

Применение геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве регламентировано нормативным документом СП 39.13330.2012 [205] для создания противofiltrационных устройств из полимерных материалов.

В 2022 г. был введен в действие Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 70090-2022 «Материалы геосинтетические бентонитовые рулонные для гидроизоляции», который распространяется на бентонитовые материалы, применяемые в том числе для противofiltrационных экранов гидротехнических, водохозяйственных, природоохранных сооружений, объектов агропромышленного комплекса и др.

Анализ использования геосинтетических материалов на российских объектах свидетельствует, что сейчас в гидроэнергетическом строительстве геосинтетики используются ограниченно в основном при устройстве фильтрующих и гидроизоляционных элементов грунтовых плотин [98]. Пока геосинтетики получили небольшое распространение в малой гидротехнике, преимущественно применяются на накопителях отходов, прудах-отстойниках, хвостохранилищах.

Согласно [59] геосинтетики могут быть использованы в качестве противofiltrационных элементов и переходных зон в грунтовых плотинах, фильтров в дренажных и водоотводящих системах, для крепления и оптимизации очертания откосов грунтовых сооружений, берегоукрепления и др.

В работах [138–140] описывается опыт строительства дамбы хвостохранилища высотой 39,5 м в условиях Крайнего Севера в Магаданской области. Дамба представляет собой каменно-набросную плотину с противofiltrационным эле-

ментом в виде диафрагмы и понура, выполненных из синтетических материалов (полиэтиленовой геомембраны толщиной 1,5 мм). Отмечается, что при устройстве диафрагмы проводились опытные работы. На геомембрану были уложены защитные прокладки из геотекстиля Дорнит, на которой после раскопки не было зафиксировано повреждений в виде разрывов. Однако было обнаружено несколько точечных проколов противофильтрационного элемента (полимерной геомембраны) остроугольными частицами грунта.

Следует отметить, что на юге России геосинтетические материалы на сегодняшний день недостаточно применяются для противофильтрационной защиты объектов водного хозяйства. Среди таких объектов можно привести водоемы в Краснодарском крае, где уложен поверхностный экран из геомембраны толщиной 1,0 мм, сверху которого устроено покрытие из геотекстиля для защиты геомембраны. В процессе эксплуатации водоемов были обнаружены небольшие повреждения, через которые происходила утечка воды.

Одним из примеров применения геосинтетических материалов является Пятигорский ипподром, где было построено два водоема-накопителя объемом 30000 и 350 м³, соответственно, на которых применены поверхностные противофильтрационные экраны из геомембраны без дополнительной защиты сверху. Назначение таких водоемов состоит в аккумуляции воды для полива в летнее время. Исследования этого объекта выполнялись ФГБНУ «РосНИИПМ». При оценке водного баланса водоемов был определен осредненный коэффициент фильтрации в диапазоне $1,24 \cdot 10^{-9} - 9,98 \cdot 10^{-10}$ см/с, что соответствует допускаемым значениям [125].

Кроме того, с целью проведения апробации новых противофильтрационных устройств на оросительных каналах в 2010–2011 гг. были разработаны предложения по созданию опытных участков на Большом Ставропольском канале IV очереди (БСК-4). Оценку водопроницаемости облицовки с геомембраной на БСК-4 было предложено проводить методом фильтромеров. Данный способ заключается в определении скорости фильтрации и осредненного коэффициента фильтрации в отдельных точках облицованного русла с помощью специальных приборов – фильтромеров. С целью изучения долговечности противофильтрационного эле-

мента из геомембраны предусмотрены специальные люки, где размещаются образцы материалов. Ввиду отсутствия образцов противofильтрационных геосинтетических материалов, техники и оборудования для укладки и соединения геомембран, опытная апробация так и не была выполнена.

На ДМК для ремонта откоса дамбы канала при оползании массива грунта в 2011 г. ФГБНУ «РосНИИПМ» предложено заложить два опытных участка длиной 1330 м различных типов противofильтрационных облицовок с использованием геомембран [125]. Предложения по конструктивному исполнению облицовки включали: противofильтрационный элемент из геомембраны ПЭНД толщиной 1,5 мм; защитную прокладку из нетканого геотекстиля плотностью 300 г/м² и пригрузочное покрытие из каменной наброски на откосах толщиной 0,3 м, грунтовый защитный слой по дну толщиной 1,0 м [125]. Запланированные в 2011 г. исследования так и не удалось выполнить ввиду наличия воды (даже в зимний период) на участках канала.

С 2012 г. по настоящее время проводится реконструкция крупнейшего канала России – Донского магистрального, которая предусматривает в том числе работы по расширению канала с 45-го по 112-й км, увеличение пропускной способности с 80 до 110 м³/с, устройство противofильтрационного экрана из геосинтетических бентонитовых материалов с защитным покрытием из каменной наброски толщиной по дну 0,70 м, а на откосах – 0,30 м. Исследование двух построенных участков протяженностью 2524 м, где уложен экран из бентоматов, выполнялись автором с 2013 по 2021 г. В задачи исследований входили фильтрационные расчеты на реконструируемом магистральном канале, разработка противofильтрационных мероприятий на наиболее опасных участках и натурные обследования реконструируемых участков ДМК с экраном из геосинтетических бентонитовых материалов. Результаты натурных исследований экранов из геосинтетических материалов на ДМК представлены в главе 6.

В работах [60, 137] по материалам XVI-го и XVII-го конгрессов Международной комиссии по большим плотинам достаточно подробно рассматривается зарубежный опыт применения геосинтетических материалов (геомембран) в каче-

стве противofильтрационных элементов при строительстве плотин, а также при ремонте грунтовых плотин и лицевой части из укатанного бетона.

Старение геомембран обусловлено воздействием окружающей среды, например, ультрафиолетовым излучением. Сведения о старении геомембран получают в результате ускоренных лабораторных опытов с гарантией качества на 50–60 лет. Проведенный мониторинг и анализ за состоянием геомембран на большом числе плотин, показывает, что качество экрана после 20–30 лет эксплуатации вполне удовлетворительное [273]. Это подтверждается натурными наблюдениями на плотинах в Италии и Франции в конце 50-х и начале 60-х годов, в том числе за плотиной Контрада-Сабетта высотой 32 м (1959 г.). При этом следует учитывать, что современные геомембраны имеют более лучшее качество, чем те, которые уложены 30 лет назад, а сроки старения геомембран уже сопоставимы со сроками эксплуатации плотины.

Большой опыт применения геомембран при строительстве и ремонте плотин накоплен «Carpi» (Швейцария) [197]. Из 39-ти бетонных плотин в мире, на которых при реконструкции применялись противofильтрационные устройства из геомембран, в 80 % использовалась идентичная запатентованная натяжная конструкция [197]. Геомембрана из ПВХ укладывается на разрушенную поверхность плотины и фиксируется посредством системы механического крепления, которое одновременно натягивает покрытие.

Примером применения полимерной геомембраны, закрытой защитным слоем, является насыпная плотина Бовилл (Албания) высотой 91 м, на которой бетонный экран был заменен при строительстве геомембраной из ПВХ [197]. Геомембрана из ПВХ толщиной 3 мм совмещалась с геотекстилем плотностью 700 г/м² термическим способом. После 9 лет эксплуатации общие протечки из водохранилища при НПУ практически равнялись нулю [197].

Типичным примером применения полимерных геомембран на мелиоративных системах служит канал Сеньора до Порта (Португалия) длиной 2500 м [197]. Пропускная способность канала снизилась по отношению к потребностям из-за образования трещин и повышенной шероховатости облицованного русла канала.

Его реконструкция проводилась с целью герметизации и повышения пропускной способности при наращивании стенок на 10 %. После проведения реконструкции и устройства геомембранного покрытия из ПВХ пропускная способность канала увеличилась на 90 % [197].

Прогнозы долговечности экспонированных геотекстилей и геомембран рассматриваются в статье R. M. Koerner и др. [281]. Основная идея авторов – применение «открытых» геотекстилей и полимерных геомембран. Новые результаты сравниваются с полученными ранее исследованиями прогнозирования жизненного цикла покрытия из геомембраны. Неэкспонированные (или покрытые) геомембраны из полиэтилена высокой плотности (HDPE) толщиной 1,5 мм были предварительно изучены. На полигоне проводились опыты при четырех повышенных температурах (от 55 до 85 °С) для достижения 50 % сохраняемой прочности и удлинения. Значение 50 % снижения характеристик геомембраны (называемое периодом полураспада на протяжении всего срока службы) в этих условиях составляло примерно 450 лет. Однако на открытые геомембранные облицовки влияет ультрафиолетовое излучение, повышенная температура и воздействие кислорода, что сокращает срок их службы. Лабораторные испытания [281] были проведены для семи различных геотекстилей и пяти типов геомембран. Каждый материал подвергался воздействию повышенных температур от 55 до 85 °С. В результате прогнозируемый период полураспада для геотекстиля варьируется от нескольких месяцев до 10 лет, а для геомембран – от 47 до 96 лет [197, 281].

Некоторые из работ N. Touze-Foltz и J. P. Giroud [309] посвящены изучению эмпирических уравнений для оценки скорости конвективного потока через композитные покрытия, включающие геомембрану и слой грунта с низкой проницаемостью. Конвективный поток обусловлен дефектами в геомембране и зависит от условий контакта между геомембраной и слоем почвы, для которых рассматриваются три типа условий контакта («отличное», «хорошее» и «плохое»). Методология получения эмпирических уравнений заключается в выборе математического выражения для эмпирических уравнений и значений для неизвестных таким образом, чтобы скорости потока, рассчитанные с использованием эмпирических урав-

нений, были максимально близки к скоростям, строго рассчитанным с использованием существующих аналитических решений. Это было достигнуто путем проведения численных расчетов для более чем 120 000 случаев, определяемых широким диапазоном значений параметров (условия контакта, тип и размер дефекта, толщина защитного слоя грунта и гидравлический напор).

Теоретический анализ моделирования геомембранного прокола на основе простой модели выполнен J. P. Giroud и др. [266]. Такой анализ показал, что стойкость геомембраны к проколу зависит от диаметра зоны контакта между геомембраной и защитным слоем, толщины геомембраны и ее физико-механических характеристик. В результате решения задачи [266] получено уравнение, позволяющее выразить сопротивление геомембранному проколу, измеренное при проведении испытаний, как функция характеристик геомембраны и диаметра повреждения. Прогнозы, сделанные с помощью уравнения [266], согласуются с данными выполненными ранее J. P. Giroud лабораторных испытаний.

Общая схема расчета скорости потока жидкости через противofильтрационное покрытие (геомембрана + грунтовое основание) дана для круглого отверстия и поврежденного нахлеста материала, которая может быть использована для интерпретации данных лабораторных испытаний и полевых исследований [311].

Исследования на закрытом накопителе площадью 16 га были проведены E. M. Gallagner и другими для оценки эффективности работы противofильтрационного экрана спустя 25 лет. Хотя мониторинг окружающей среды не выявил признаков крупномасштабного сбоя, в расчетном балансе воды были расхождения. Считалось, что это может быть связано с отверстиями для выпуска газа, которые были установлены через противofильтрационный элемент из геомембраны. Общее количество отверстий составляло 96 шт. Покрытие включает около 1 м почвогрунта на геомембране ПЭВД толщиной 0,375 мм. В 2013 г. была предпринята работа по исследованию противofильтрационного покрытия с целью принятия мер по улучшению взаимодействия геомембраны с защитными слоями. Все проведенные работы успешно завершены, но выявлен ряд повреждений в местах сопряжения геомембраны с другими элементами сооружения.

1.5 Обоснование применения бентонитовых материалов в качестве противofильтрационных покрытий каналов

Геосинтетические многослойные противofильтрационные материалы на основе бентонитовых гранул, глин или порошка уже достаточно широко используются за рубежом [94, 114] благодаря их положительным и особым свойствам. Они успешно применяются взамен традиционных покрытий – полиэтиленовой пленки, бетона и даже полимерной геомембраны.

Так, например, одним из основных достоинств геосинтетических покрытий на основе бентонита является способность регенерировать (самозалечивать) повреждения за счет гидратации (присоединения воды) бентонита и заполнения гелем полостей, образующихся в результате механических повреждений (например, проколов во время производства работ или при устройстве защитно-пригрузочных покрытий).

Геосинтетики на основе бентонита надежно противостоят высокому гидростатическому давлению, устойчивы в широком диапазоне pH , стойки к агрессивным жидкостям, выдерживают большое количество циклов «замораживание–оттаивание» и «гидратация–дегидратация» без изменения гидроизоляционных свойств, долговечны и экологически безопасны, изолируемая поверхность практически не требует специальной подготовки, возможность укладки в любое время года (кроме укладки в воду), могут укладываться на переувлажненную или мокрую поверхность [132, 185].

В настоящее время в России бентонитовые маты выпускаются различными компаниями, которые используют кальциевый (или натриевый) бентонит и другие добавки, которые позволяют значительно снижать коэффициент фильтрации при первом контакте с водой. Другим недостатком бентонитовых покрытий является неравномерность распределения гранул бентонита между слоями геотекстиля. Применение гранул кальциевой бентонитовой глины значительно сказывается на ухудшении свойств бентонитовых матов, технологичности их применения и долговечности противofильтрационного экрана.

На рисунке 1.7 дана сравнительная оценка геосинтетических материалов на основе бентонита по коэффициентам фильтрации, а на рисунке 1.8 – по прочности на растяжение.

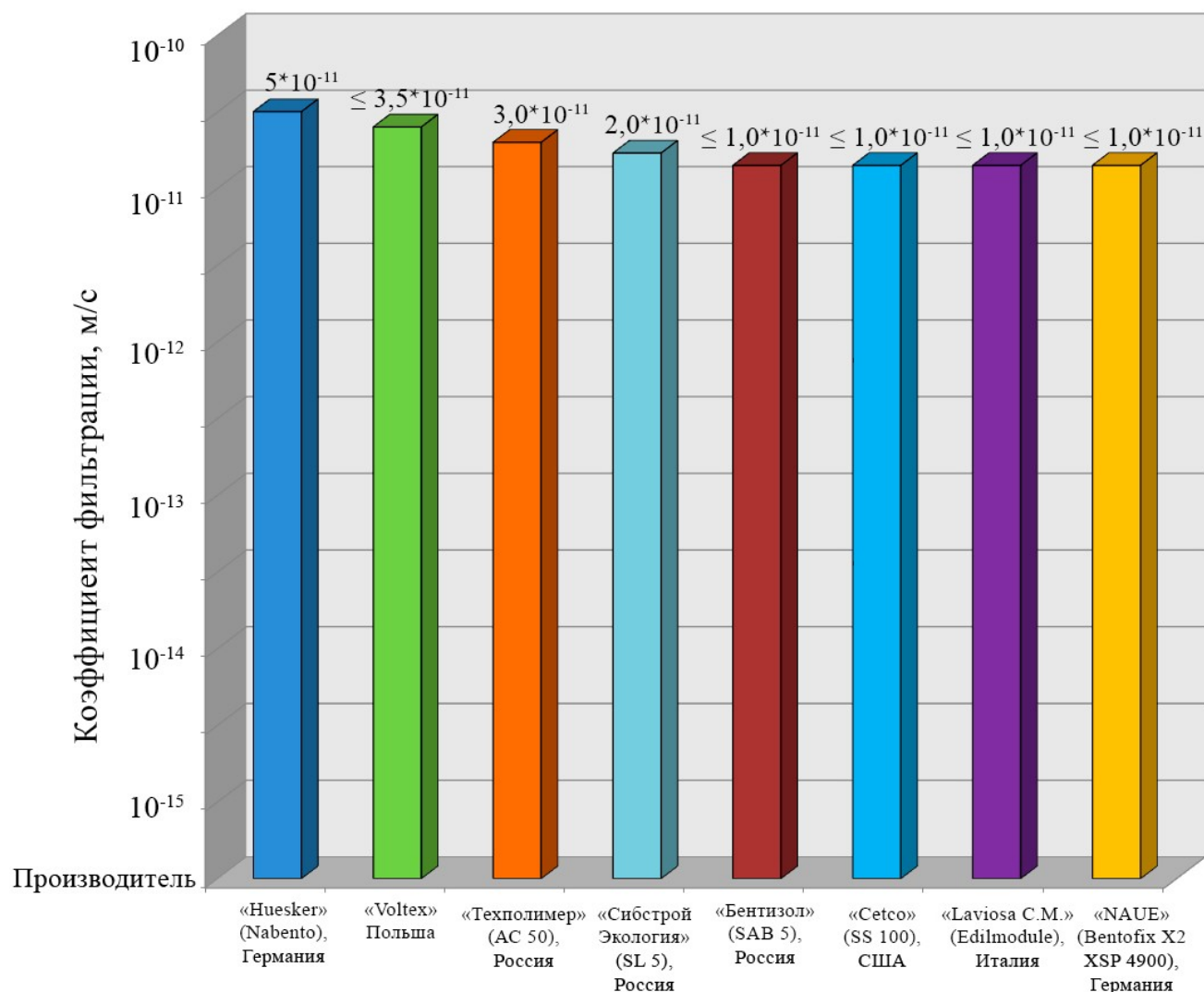


Рисунок 1.7 – Сравнительная оценка материалов геосинтетических бентонитовых (зарубежных и отечественных производителей) по коэффициентам фильтрации

За рубежом опыт применения геосинтетиков на основе бентонита уже насчитывает несколько десятилетий [183, 184]. Так, «NAUE» (Германия) еще в 1937 г. были разработаны и запатентованы бентонитовые маты, а в 1992 г. начинается их производство на американском рынке. В 2010 г. проводится расширение спектра материалов за счет начала производства комбинированных геосинтетических покрытий, используемых для противofiltrационных целей [183].

Как показано на рисунке 1.7, коэффициенты фильтрации бентонитовых материалов для зарубежных компаний «NAUE», «Laviosa», «Cetco» практически

одинаковы, а для российских – высокие значения у производителя «Бентизол», которые совпадают с зарубежными аналогами.

Геосинтетические материалы на основе бентонита «Bentofix X2», «Laviosa», «Бентизол» и «Техполимер» отличаются более высокими показателями прочности на разрыв (максимальным растягивающим усилием, достигающим вдоль полотнищ 12,0 Н/м) по сравнению с другими зарубежными и российскими производителями (рисунок 1.8), что характеризует устойчивость бентонитового мата к более высоким нагрузкам без нарушения целостности самого материала.

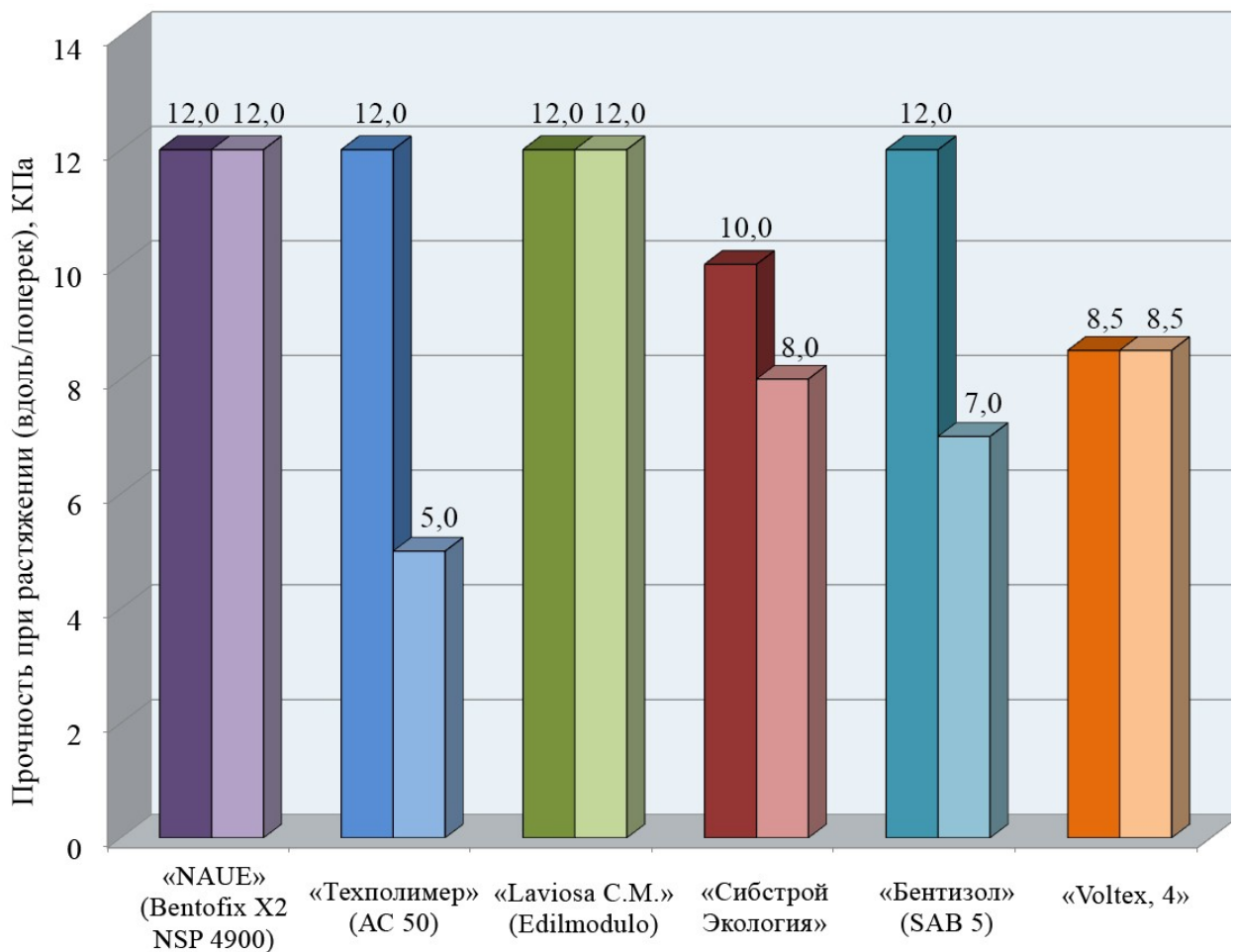


Рисунок 1.8 – Сравнительная оценка геосинтетических бентонитовых материалов (зарубежных и отечественных производителей) по прочности на растяжение

Противофильтрационный геосинтетический материал «Bentofix X2» имеет прочность на продавливание материала 2,0 кН (по данным производителя), что обеспечивает сохранение структуры материала в целом и слоя бентонита на длительный период при значительных точечных нагрузках. Аналогично для мате-

риала «SAB 5» прочность при статическом продавливании составляет 2,0 кН (по данным производителя). Относительное удлинение при разрыве бентонита «Bentofix X2» достигает значений 10,0 % вдоль и 6,0 % поперек полотна, а для материала «SAB5», соответственно, 20 и 10 %, что характеризует способность геосинтетического материала сохранять целостность при высоких нагрузках от пригрузочных и иных слоев.

Как правило, геосинтетические бентонитовые материалы изготавливаются из природного натриевого бентонита в виде порошка фракцией $\leq 0,063$ мм (85 %) и $\geq 0,063$ мм (15 %). За счет этого достигаются однородные противofильтрационные характеристики бентоматов по всей поверхности, моментальная гидратация при контакте с водой. Из-за отсутствия воздушных полостей в матах создается более высокое внутреннее давление, обеспечивающее более высокие противofильтрационные свойства материала.

Несущий и покрывающий геотекстильные материалы в бентонитовом мате «Bentofix X2» и «SABL5» скреплены иглопробивным методом с последующей термической обработкой, в результате чего образуется «термозамок», что способствует более высокой прочности на сдвиг нижнего и покрывающего геотекстильных материалов. Повышение прочности на сдвиг нижнего и верхнего слоя обеспечивает более высокую их надежность на крутых откосах. Другим важным преимуществом таких покрытий является то, что за счет более высокого внутреннего давления и высокой степени скрепления повышаются противofильтрационные характеристики [210].

Рассмотрим сравнительный анализ геосинтетических бентонитовых материалов, выпускаемых рядом отечественных и зарубежных производителей. С этой целью составлена таблица 1.3, где представлены основные технические характеристики материалов зарубежных компаний: «Bentofix» (Германия, «NAUE»), Voltex (Польша), «СЕТСО» (США), «Edilmodulo» (Италия) и отечественных производителей (Россия): «Бентизол», «Техполимер», «Геотехнологии».

Таблица 1.3 – Сравнение технических характеристик геосинтетических бентонитовых материалов

Характеристика противофильтрационного материала	Bentofix X2 NSP 4900, «NAUE»*, Германия	Бентотех АС 100, «ТехПоли- мер», Россия	Изобент АС 100, «Геотехноло- гии», Россия	«Бентизол», SAB 5, Россия	«Voltex L», Польша	Bentomat AS 100, «СЕТСО», США	«Edilmodulo», Laviosa С. М., Италия
Коэффициент фильтрации при давлении 200 кПа, м/с	$\leq 1 \times 10^{-11}$	$\leq 1,5 \times 10^{-11}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$	$\leq 3,5 \times 10^{-11}$	$\leq 2 \times 10^{-11}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$
Степень набухания, мг/2г	24	≥ 24	≥ 24	≥ 24	$\geq 3,6$	–	≥ 27
Поверхностная плотность бентонитового мата, кг/м ²	5,25	5,20	4,80	5,35	–	5,10	5,0
Прочность при растяжении (вдоль/поперек), кН/м	12/12	$\geq 12 / 5$	$\geq 6 / 4$	$\geq 12 / 7$	–	–	12/12
Относительное удлинение при разрыве, %	10/6	–	13/7,5	20/10	–	≥ 15	30/30
Прочность скрепления (тканый геотекстиль с слоем полиэтилена)	≥ 360	≥ 400	–	–	–	–	–
Срок службы, лет	$\geq 200^*$	50–70	–	–	–	≥ 50	–
Толщина материала при нагрузке 2 кПа, мм	6,0	6,4	6,0	5,7	8,1/3,6	6,4	6,0
Размер рулона (ширина × длина), м	4,85×40	5,2×25	5×40	5×40	5×40	–	5×45
Гранулы бентонита	натриевые с фракциями $\leq 0,063$ мм (85 %) и $\geq 0,063$ мм (15 %)	–	натриевые с фракциями $> 0,62$ мм	натриевые с фракциями $> 0,62$ мм	–	–	натриевые

Примечание – *показатель получен прогнозным путем экспонирования в течение 1 года

Согласно данным, представленным в таблице 1.3, можно сделать вывод, что по коэффициенту фильтрации при давлении 200 кПа бентонитовые маты «Bentofix» и «SAB5» имеют аналогичные показатели по сравнению с альтернативными материалами («Бентотех», «Votex», «Bentomat» и «Laviosa») в среднем в 2,0–3,5 раза. При этом низкое значение коэффициента фильтрации материала «Bentofix» и «SAB5» свидетельствует о высокой их противofильтрационной эффективности, которое на два порядка (и более) меньше марки бетона по водонепроницаемости W12 с коэффициентом фильтрации в состоянии водонасыщения $\leq 5 \times 10^{-9}$ м/с [189], или почти непроницаемым глинам с коэффициентом фильтрации $k_{\phi} = 10^{-6} - 10^{-7}$ м/с (или глине плотной (утрамбованной)) с $k_{\phi} = 10^{-5} - 10^{-8}$ м/с [208].

К другим преимуществам противofильтрационных материалов «Bentofix» и «SAB5» можно отнести их высокую поверхностную плотность (более 5,0 кг/м³), а также высокую прочность при растяжении вдоль и поперек полотнищ бентомата (12/7 кН/м). В то же время, геосинтетические покрытия «Bentofix», по сравнению с другими материалами, являются более долговечными, срок службы материала, по данным компании-производителя, составляет не менее 200 лет [108], что требует подтверждения в натурных условиях.

Таким образом, на основании проведенного сравнительного анализа установлено (см. таблицу 1.3), что бентоматы «Bentofix X2» NSP 4900 и «SAB5» имеют более высокие показатели по коэффициенту фильтрации, поверхностной плотности, прочности при растяжении и относительному удлинению.

Исходя из вышеизложенного, выбор противofильтрационного материала при реконструкции наиболее опасных участков ДМК в пользу геосинтетических бентонитовых покрытий является вполне обоснованным.

Далее рассмотрим геосинтетические покрытия на основе бентонита отечественного производства [185], которые уже на практике достаточно широко используются. Об этом свидетельствует опыт применения таких материалов при строительстве и проектировании ряда объектов [124, 185]: участка оросительного канала (ДМК), искусственного пруда в г. Ахтобе (Казахстан), дамбы водохрани-

лица в Чукотском автономном округе, прудов-испарителей в Астраханской области, искусственных водоемов в Московской области и других объектов водохозяйственного и природоохранного назначения.

Бентонитовые материалы [185] представляют собой покрытия геосинтетические бентонитовые рулонные, которые различаются по количеству гранул бентонита на 1 м^2 и наличию дополнительного слоя ламинации. Материал производится в виде полотен различных типоразмеров (от 1 м шириной до 40 и более метров длиной). Массовая доля монтмориллонита в бентоните должна быть не менее 70 %. Применение бентонита с включением полимерных добавок не допускается для данного вида геосинтетического материала [213].

На сегодняшний день [185] разработаны ряд нормативных и методических документов: стандарты организации (СТО 8729967.202-2020, СТО 8729967.003-2015, СТО 8729967.004-2015) [213], «Технологическая карта на устройство гидроизоляции материалами геосинтетическими бентонитовыми рулонными»; Альбомы типовых конструкций противofильтрационных экранов с применением геосинтетического материала с бентонитом для водохозяйственных и природоохранных сооружений и многие др. [185].

1.6 Обоснование необходимости разработки конструкций противofильтрационных покрытий каналов

Обзор научно-технической литературы и ранее проведенных исследований по применению геосинтетических материалов, как отечественных, так и зарубежных компаний, показывает целесообразность их использования для противofильтрационных покрытий каналов. При этом, если в зарубежных странах отмечается уже период широкого использования различных геосинтетиков для многих областей строительства (гидротехнических, природоохранных сооружений и т. д.), то в России многослойные геосинтетики пока используются ограниченно. Это свидетельствует о наметившемся отставании в области проектирования и строительства объектов с использованием геосинтетических материалов, а также в отсутствии не-

которых нормативных документов по проектированию и эксплуатации ГТС (в том числе каналов), где применяются такие противофильтрационные облицовки.

В то же время анализ современного состояния применения геосинтетических материалов свидетельствует о перспективности разработки и широкого использования различных покрытий, в том числе бентонитовых матов и бентонит-полимерных покрытий, которые могут служить прообразами материалов с заданными свойствами.

Создание материалов с заданными свойствами дает возможность разработать высокоэффективные конструкции противофильтрационных покрытий, обладающих повышенной надежностью и долговечностью.

При этом под заданными свойствами противофильтрационных геосинтетических материалов следует понимать такие их показатели, которые регламентируются исходя из условий их работы, требований, предъявляемых к сооружениям по показателям долговечности, эффективности и эксплуатационной надежности.

Для таких противофильтрационных покрытий заданные свойства должны задаваться еще при их изготовлении. К ним должны относиться только основные показатели, которые влияют на их эффективность, надежность и долговечность [95]. К примеру, геосинтетические материалы, применяемые для противофильтрационных целей, должны иметь заданные свойства по водонепроницаемости (коэффициенту фильтрации), прочности (при разрыве), возможности регенерации (самозалечивания) повреждений и др.

Кроме того, должны учитываться варианты составов геосинтетических материалов и их назначение, класс гидротехнического сооружения, условия применения. В случае использования бентонитовых матов без дублирующего слоя из геомембраны их коэффициент фильтрации может составлять 10^{-11} м/с, а при соединении геомембраны с бентонитовыми материалами (путем термоскрепления с нижним слоем геотекстиля) коэффициент фильтрации будет уже меньше на три порядка и составлять 10^{-14} м/с. Тогда в первом случае бентонитовый материал может применяться для гидротехнических сооружений III–IV класса, а во втором случае (когда применяется дублирующий противофильтрационный элемент) он

может применяться для наиболее ответственных сооружений I–II класса или сооружений, выполняемых в сложных инженерных условиях. В случае образования повреждений будет происходить гидратация бентонита и самозалечивание дефектов суспензией раствора. По существу, данное свойство бентонитового материала позволяет обеспечить практически полную герметичность противofильтративного покрытия в течение длительного периода, вплоть до окончания его срока службы. Отсюда, данное свойство материала можно отнести к заданному свойству по водонепроницаемости.

Таким образом, ранее проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы, а также некоторые соображения, изложенные в работе, свидетельствуют о необходимости разработки и последующего применения геосинтетических материалов с заданными свойствами для создания противofильтративных конструкций покрытий оросительных каналов, отличающихся высокой эффективностью, надежностью и водонепроницаемостью.

1.7 Постановка цели и задач диссертационного исследования

Выполненный в главе 1 обзор отечественных и зарубежных исследований в области создания противofильтративных покрытий на оросительных каналах, а также анализ полученных данных о фальтративных потерях воды и последствиях фальтративации из оросительных систем показали, что проблема совершенствования конструкций противofильтративных покрытий из геосинтетических материалов и развитие методов их расчета является актуальной.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить ряд нижеследующих задач:

- выполнить обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований в области применения геосинтетических материалов для противofильтративных целей на оросительных каналах;

- разработать новые конструктивно-технические решения (варианты) противofильтрационных покрытий оросительных каналов с применением геосинтетических материалов;
- оценить фильтрационные потери через покрытия оросительных каналов из полимерных геомембран и геосинтетических бентонитовых материалов;
- предложить фильтрационные и численные модели водопроницаемости противofильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов при наличии в них дефектов (повреждений);
- разработать и апробировать (на ЭВМ) методики расчета эффективности и водонепроницаемости противofильтрационных покрытий при повреждаемости и самозалечивании бентонитом;
- исследовать в лабораторных условиях коэффициент фильтрации и физико-механические характеристики покрытий из геосинтетических материалов на основе бентонита;
- выполнить натурные исследования и оценить современное техническое состояние противofильтрационных покрытий из геосинтетических материалов на оросительных каналах;
- оценить экономическую эффективность разработанных конструктивных решений в сравнении с аналогами и разработать методику выбора оптимального варианта конструкции противofильтрационного покрытия;
- сформулировать рекомендации по применению конструкций покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов при проектировании, строительстве и эксплуатации оросительных каналов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. На основании проведенного обзора как отечественных, так и зарубежных работ по применению полимерных материалов для противofильтрационных целей можно заключить, что в отечественной литературе имеются только отдельные публикации по проблеме исследований, которые затрагивают вопросы применения геосинтетических материалов на оросительных каналах, но вместе с тем в последние 5–10 лет появился целый ряд научных работ, посвященных вопросам применения новых геосинтетических материалов на каналах для создания противofильтрационных покрытий повышенной надежности.

2. В зарубежных публикациях многие из работ таких ученых как J. P. Giroud, N. Touze-Folts, R. M. Koerner и других посвящены исследованиям ПФЭ из геосинтетических материалов, в частности, полимерных геомембран. При этом основные вопросы касаются изучения водопроницаемости геомембран, практически отсутствуют исследования по моделям водопроницаемости геосинтетических бентонитовых материалов, в частности, с учетом самозалечивания повреждений ввиду их сложности. При этом значительное количество зарубежных исследований направлено на изучение долговечности (срока службы) полимерных материалов для плотин и накопителей. Вместе с тем в зарубежных публикациях отсутствуют исследования, направленные на разработку многослойных конструкций противofильтрационных покрытий оросительных каналов из геосинтетических бентонитовых материалов.

3. Зарубежные исследования долговечности противofильтрационных устройств гидротехнических сооружений дают завышенные результаты, поскольку основываются на очень непродолжительном периоде испытаний. Расчетные формулы для определения водопроницаемости покрытий учитывают много разнородных фактов, которые имеют дробные степени, некоторые из которых нарушают принципы теории размерности, и в конечном счете не подтверждаются натурными данными и лабораторными испытаниями на моделях. В зарубежных публикациях не найдены исследования сравнительной эффективности различ-

ных типов облицовок оросительных каналов, в том числе с применением геосинтетических и композитных материалов.

4. Опыт применения в нашей стране полимерных материалов в качестве противofильтрационных устройств гидротехнических сооружений составляет более 60 лет. Основными применяемыми материалами в конструкциях покрытий каналов, направленных на исключение потерь воды на фильтрацию, являлись полимерные пленки, бетонные и железобетонные покрытия, которые характеризуются относительно небольшим сроком службы, сложностью производства работ по их созданию и значительной повреждаемостью (для пленочных экранов). Покрытия из полимерных геомембран пока также ограничены в применении ввиду необходимости устройства дополнительных защитных слоев, низких температурных перепадов и применением защитных прокладок из геотекстиля для предотвращения прокалывания и продавливания от механизмов и пригрузочного слоя.

5. По данным на 2020 г., количество мелиоративных каналов в нашей стране составляет 7988 с общей протяженностью 38 684 км (из них оросительных 23 253 км), а общие потери воды в каналах гидромелиоративных систем по-прежнему остаются высокими, и по данным Водной стратегии Российской Федерации составляют $4,8 \text{ км}^3/\text{год}$ от общего объема воды, используемой на орошение и обводнение – порядка $10 \text{ км}^3/\text{год}$. Все это обусловлено низким техническим уровнем и значительной степенью износа гидротехнических сооружений (в том числе облицовок каналов). При этом осредненный коэффициент полезного действия каналов варьируется в пределах от 0,75 до 0,82.

6. Снижение фильтрационных потерь воды в оросительных каналах, уменьшение негативного воздействия вод, исключение подтопления, заболачивания и вторичного засоления приканальных территорий, а также увеличение коэффициента полезного действия каналов возможно за счет применения конструкций противofильтрационных покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов с заранее заданными свойствами.

Глава 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

2.1 Новый подход к созданию противofильтрационных покрытий каналов из материалов на основе бентонита

При создании противofильтрационных геосинтетических материалов (полимерных геомембран, геотекстилей, георешеток, геосеток и других геосинтетиков) и экранов на их основе используется традиционный подход, основанный на производстве однослойных покрытий, которые в последующем в различном сочетании применяются в конструкциях противofильтрационных устройств гидротехнических сооружений.

Для обеспечения большей надежности, долговечности и водонепроницаемости, полимерные геосинтетические материалы (геомембраны), как правило, сочетаются с неткаными геотекстильными полотнищами, которые защищают основной геомембранный слой от повреждений. Такие сочетания различных видов материалов основаны на принципе их послойного (последовательного) соединения в единую конструкцию противofильтрационного экрана.

Укладываемые друг на друга полотнища геосинтетических материалов позволяют создать многослойную конструкцию экрана, в которой каждый из слоев выполняет определенную функцию (для геомембран – гидроизоляцию, для геотекстилей – дренаж и защиту от механических повреждений, для георешеток и геосеток – устойчивость к просадкам грунтового основания).

Традиционный подход послойного выполнения противofильтрационных покрытий из однослойных геосинтетиков является наиболее распространенным и широко применяется при создании сооружений различного назначения, и, по нашему мнению, помимо преимуществ, имеет определенные недостатки.

1. При применении в конструкциях экранов нескольких видов однослойных геосинтетических не скрепленных между собой материалов (как правило, последующее полотнище укладывается поверх предыдущего) необходимо учитывать та-

кие физико-механические характеристики и свойства материалов, как коэффициент скольжения и (или) трения; коэффициент шероховатости; предельную нагрузку, действующую на материал; поверхностную плотность; сопротивление статическому продавливанию и прокалыванию и многие другие. Все эти факторы несколько ограничивают использование различных видов геосинтетиков в сочетании с другими материалами в единой конструкции экрана.

2. При создании многослойной конструкции экрана, состоящей из нескольких слоев геосинтетических материалов, значительно увеличиваются объемы работ, связанные с укладкой нескольких функциональных слоев, подготовкой грунтового основания и устройством защитного покрытия.

3. Процесс производства работ, направленный на укладку нескольких типов геосинтетических материалов, неизбежно приводит к механическому воздействию (техники, оборудования) на предыдущий функциональный слой, что чаще всего вызывает нарушение целостности предыдущего покрытия и образованию различного рода повреждений (проколов, порывов, проваров).

4. Последовательное соединение однослойных геосинтетических материалов в единую конструкцию не всегда обеспечивает должное их сцепление между собой, что может привести к сползанию некоторых полотнищ на крутых откосах и склонах, а, следовательно, и смещению (защемлению) защитных и покрывающих слоев противодиффузионного покрытия.

Учитывая вышеприведенные факторы, предлагается принципиально новый подход к созданию противодиффузионных покрытий оросительных каналов из геосинтетических материалов на основе бентонита и геомембран.

Основная цель такого подхода – создание многослойной конструкции противодиффузионного экрана с заданными свойствами, включающей несколько видов однослойных геосинтетических материалов, соединенных в единое покрытие, выполняющее несколько функций одновременно. Одной из отличительных особенностей геосинтетических покрытий с заданными свойствами (на основе бентонита) является их самовосстановление (регенерация) в процессе эксплуатации сооружений. Кроме того, такие материалы характеризуются многократной регенерацией

(самозалечиванием) от механических повреждений вышерасположенного слоя (камней, острых включений и др.). Укладка материала (состоящего из трех, иногда четырех однослойных геосинтетиков, например, геомембраны, двух слоев геотекстиля и слоя бентонита) производится единым слоем, в котором каждый элемент не только выполняет заданную функцию, но и совмещен с предыдущим механическим скреплением с учетом физико-механических и технических характеристик. В этом случае исключается процесс многократного прохода механизмов по дну и откосам сооружения при его экранировании, а также по уже выполненным покрытиям, следовательно, можно сделать выводы о минимальной вероятности механического повреждения гидроизоляционного слоя от машин и механизмов.

Производство таких противофильтрационных материалов основано на принципе заводского термоскрепления нескольких геосинтетиков в единое покрытие с заранее заданными свойствами. Такие свойства задаются в зависимости от назначения производимого материала: водонепроницаемости (для исключения фильтрации воды и загрязненного фильтрата на оросительных каналах, водоемах и накопителях); водопроницаемости (с целью фильтрации жидкости и механической очистки фильтрата); дренажа – для исключения фильтрации в нижележащие горизонты и одновременного отвода воды и загрязненного фильтрата через композитное полотнище; комбинированного применения – с целью исключения фильтрации и для обеспечения устойчивости сооружения (например, в конструкциях дополнительно используется плоская полимерная георешетка, термоскрепленная с геотекстилем и геомембраной).

Для исключения образования повреждений в процессе соединения противофильтрационных бентонитовых материалов они соединяются внахлест (в отличие от геомембран не требуется процесс сварки отдельных полотнищ) с использованием дополнительного герметизирующего элемента в виде бентонита.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования, а также опыт применения геосинтетических материалов на каналах позволяет сделать вывод, что многослойные покрытия на основе бентонита в настоящее время являются самыми надежными противофильтрационными элементами водопроводящих гид-

ротехнических сооружений, обеспечивают их эксплуатационную надежность, безопасность и долговечность.

С целью применения геосинтетических материалов в конструкциях противофильтрационных покрытий оросительных каналов автором было разработано более 10 конструктивно-технических решений (на основе патентов на изобретения РФ, некоторые из которых приведены в приложении А), практические применение которых позволит значительно снизить потери воды на фильтрацию.

2.2 Зарубежный и отечественный опыт создания противофильтрационных покрытий на каналах

За рубежом в таких странах, как: Франция, Германия, Китай и других накоплен значительный опыт, и с 1990-х годов идет активное применение геосинтетических материалов в конструкциях противофильтрационных экранов на объектах водохозяйственного и природоохранного комплексов. Применяемые конструкции противофильтрационных устройств, как правило, выполняются из двух и трехслойных материалов на основе геомембран и геотекстилей. Наибольшее внимание уделяется исследованиям старения полимерных геомембран в конструкциях каналов и водоемов с применением защитных покрытий и без.

В Германии разработки конструктивных покрытий для противофильтрационных целей направлены в основном на накопители отходов различного назначения, где ключевым элементом является противофильтрационный экран в основании сооружения. В отличие от каналов, к таким сооружениям предъявляются более «жесткие» требования по составу и эксплуатационным показателям конструкции противофильтрационного экрана. Отличительной особенностью является и тот факт, что экраны на накопителях не подвержены постоянному и (или) периодическому воздействию движущегося водного потока, и устраиваются с защитными слоями из грунта, дренажом и другими (в том числе дублирующими) покрытиями, стойкими к кислым и щелочным средам.

Широкую популярность при реконструкции как плотин, так и других гидротехнических сооружений (оросительных каналов, лотков и др.) в Европе получи-

ли полимерные геомембраны [299], которые в 70 % случаев выполнялись из ПВХ, а в 30 % – из полиэтилена, гипалона, полипропилена. Геомембраны из ПВХ рекомендуется использовать в комбинации с геотекстилями, которые могут обеспечивать защитную («противопркольную») и дренирующую функции.

При облицовке каналов геомембранами такие покрытия имеют некоторые преимущества перед традиционными экранами, выполняемыми из бетона, каменной кладки и асфальтобетона, в том числе:

- способность противостоять влиянию «жесткой» воды, динамическому воздействию, температурным перепадам, процессам замораживания–оттаивания, зарастанию растительностью, заилению и размыву, обеспечивать водонепроницаемость в течение длительного времени;

- незначительная шероховатость поверхности геомембран обеспечивает наибольший расход, по сравнению с традиционными облицовками, где шероховатость со временем возрастает [127];

- применение противofильтрационного элемента из геомембран (толщина геомембраны, как правило, в пределах 1,0–5,0 мм) не уменьшает сечение канала, по сравнению с бетонной или железобетонной облицовкой.

Швейцарскими учеными А. Scuero и G. Vaschetti [300] при реконструкции всех типов плотин, каналов и водохранилищ рекомендуется использовать геомембраны для восстановления покрытий откосов, защиты от повреждений, вызываемых замерзанием и оттаиванием, а также при проведении ремонта швов и трещин. Современные технологии, разрабатываемые за рубежом [300], позволяют устраивать противofильтрационные покрытия, в том числе под водой. В конструкциях экранов геомембраны служат для обеспечения водонепроницаемости на набросных плотинах из укатанного бетона, что сокращает сроки и снижает стоимость их строительства. В каналах и гидротехнических туннелях низкая шероховатость геомембран способствует увеличению расхода воды.

Геомембранные покрытия на каналах могут устраиваться открытыми для уменьшения площади живого сечения и с целью наименьшей шероховатости облицовок. Открытое покрытие из геомембран (ввиду повышенной гладкости по-

лимерного материала) не обрастает мхом и растительностью и ремонтируется устройством заплат. Для предотвращения образования складок геомембранные полотнища натягиваются с помощью анкеров.

Типовым примером служит канал «Senhoro do Porto» (Португалия) длиной 2500 м, шириной от 4,1 до 5,1 м и средней глубиной 3,2 м [300]. Вследствие снижения пропускной способности на канале из-за повышения шероховатости облицовки была проведена герметизация трещин и наращивание откосов на 10 %. Первоначальный расход воды составлял 13 м³/с, который впоследствии снизился из-за потерь через крупные трещины железобетонной облицовки, расположенные на выходном участке канала. Цель реконструкции заключалась в повышении водонепроницаемости и модернизации канала, увеличении расхода до 20 м³/с.

В качестве основных двух вариантов реконструкции рассматривалась облицовка из армированного бетона (толщиной 15 см) и открытая натяжная геомембрана из ПВХ. Выполненные гидравлические расчеты показали, что вариант противofильтрационного покрытия из геомембраны позволит обеспечить повышение пропускной способности на 50 %, чем вариант с бетонной облицовкой. Таким образом, пропускную способность канала при его реконструкции можно было увеличить, по сравнению с первоначальным вариантом, с 13 до 20 м³/с. После 10 % увеличения высоты откосов канала и устройства открытого натяжного покрытия из геомембраны, пропускная способность канала увеличилась на 90 % [300].

В Португалии имеются сотни километров оросительных каналов, которые обслуживают около 40 мелиоративных территорий общей площадью порядка 150 000 га [289]. В настоящее время около 80 % этих каналов имеют недостаточную гидроизоляцию, а потери воды могут достигать 80 % от подаваемого объема [289]. Существующие каналы обычно облицованы неармированным бетоном, а железобетон и сборные плиты используются реже. Сборные полимерномодифицированные битумные или ПВХ геомембраны в основном используются при восстановлении и ремонте плотин и дамб. Фактически большая часть потерь воды в каналах с бетонными покрытиями происходит из-за деформаций грунта в основании, которые приводят к растрескиванию облицовок.

В каналах, облицованных бетоном, применяется три основных типа соединений, а использование сборных бетонных плит приводит к большому количеству стыков, которые требуют тщательной герметизации, чтобы ограничить потери воды до 25–50 л/(м²/сут). Применение открытых конструкций противofильтрационных покрытий на каналах из геомембран позволяет более наглядно обнаруживать разрывы и проколы. Основными недостатками открытых облицовок из геомембран являются более повышенная подверженность механическим повреждениям и истиранию, ускоренное старение материала под воздействием ультрафиолета, негативное воздействие отрицательных температур и др. [289].

Значительная часть потерь воды в каналах, выполненных с бетонными облицовками, происходит не из-за свойств материала, а из-за деформаций грунта основания. В таком случае потери воды в бетонных покрытиях являются следствием трещин и низкой эффективности стыковых соединений. В долгосрочной перспективе из-за растрескивания эффективность бетонных облицовок каналов может снизиться до 70 % [289].

В Португалии расширяется использование сборных покрытий из геомембран в течение последних 20 лет в основном для восстановления старых облицованных бетоном каналов. Обосновывается такое решение тем, что покрытия из геомембран имеют некоторые преимущества, по сравнению с другими облицовками: не требуется дорогостоящее оборудование для производства работ, а большие площади можно покрыть довольно быстро. При тех же обстоятельствах средние потери воды в каналах с геомембранными облицовками могут составлять 7 л/м² в сутки, а для каналов с бетонными покрытиями – 109 л/м² в сутки и более [289].

Значительный вклад в области создания противofильтрационных устройств каналов достигнут Департаментом гидротехники и водного хозяйства в Техническом университете Мюнхена (Technische Universität München). Исследования проводились на двух типах покрытий: композитной из поливинилхлорида и геомембраны из полиэтилена высокой плотности. В случае, когда применялся геокомпозит, геомембрана обеспечивала водонепроницаемость, а геотекстиль – защиту от проколов, более высокую стабильность и улучшенные физико-механические ха-

рактеристики. Практический опыт авторами статьи [301] показал, что геокомпозитные конструкции предпочтительнее экранов, выполняемых из геомембран, в том числе с применением отдельных защитных слоев из геотекстиля.

Один из наиболее крупных каналов Германии протяженностью 51 км частично выполнен в бетонной противофильтрационной облицовке, имеет трапециевидальную форму, ширину 11 м по дну и 31 м по верху, глубину 6,5 м, скорость потока – 1,0 м/с. Состояние канала с годами ухудшалось, что привело к утечкам через откосы и повлияло на безопасность моста, пересекающего канал [300, 301]. Для проведения его реконструкции была выбрана система, которая представляла собой дренированную облицовку, состоящую из геомембраны толщиной 2,0 мм, термически скрепленной с геотекстилем плотностью 200 г/м². Конструкция применяемой противофильтрационной облицовки на участке канала приведена на рисунке 2.1.

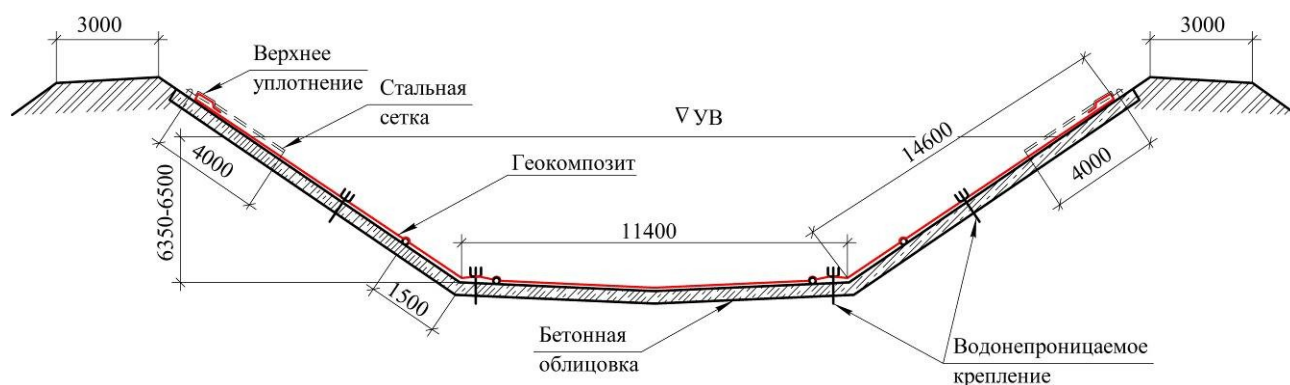


Рисунок 2.1 – Конструктивное решение облицовки участка оросительного канала [300, 301]

Монтаж геокомпозитной системы произведен в 2000 г., общая площадь реконструкции составила 34 560 м². Для контроля водонепроницаемости применяемой конструкции противофильтрационного экрана была установлена система с волоконно-оптическими кабелями, которая активируется за счет перепадов температур, возникающих при фильтрации воды. Такая система была размещена в нижней части откосов на существующем бетоне под геокомпозитом, и позволяет определять вероятные места утечек. До 2018 г. техническое обслуживание облицовки канала не требовалось, т.к. водонепроницаемость покрытия не изменялась.

Аналогичный положительный опыт реконструкции каналов за рубежом апробирован в 2012 г. на участке канала «Тесаро», который подает воду на 25,3 км в верхний пруд, впадающий в озеро «Пукаки» в Новой Зеландии [300]. Канал имеет пропускную способность 130 м³/с, скорость течения 1,2 м/с, глубина колеблется от 5,3 до 6,4 м, ширина – от 33 м до 37 м. Канал был введен в эксплуатацию в 1977 г. и выполнен в земляном русле. Основная цель реконструкции заключалась в исключении фильтрации и увеличении срока службы до 50 лет.

Работы по восстановлению канала «Тесаро» включали облицовку трех выбранных наиболее опасных участков геомембранной системой. Поперечный разрез восстановленных участков канала представлен на рисунке 2.2 [300].

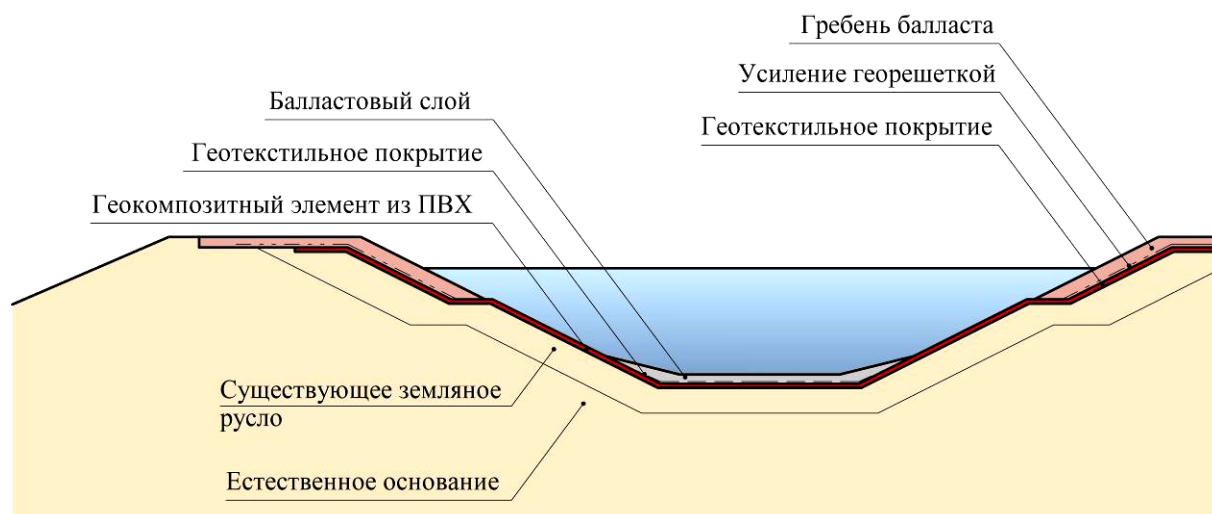


Рисунок 2.2 – Участок реконструкции канала «Тесаро» с противофильтрационной облицовкой [300]

Примыкающие друг к другу водонепроницаемые листы противофильтрационного покрытия были соединены термосваркой с последующим закреплением булыжником местного происхождения в верхней части откосов и на берме. Нетканый геотекстиль плотностью 1000 г/м² был помещен поверх полимерной геомембраны, чтобы защитить противофильтрационный элемент от повреждений во время укладки пригрузочного (балластового) слоя [300]. На другом участке канала применялась конструкция с защитным слоем из каменной наброски, исполнение которой представлено на рисунке 2.3.

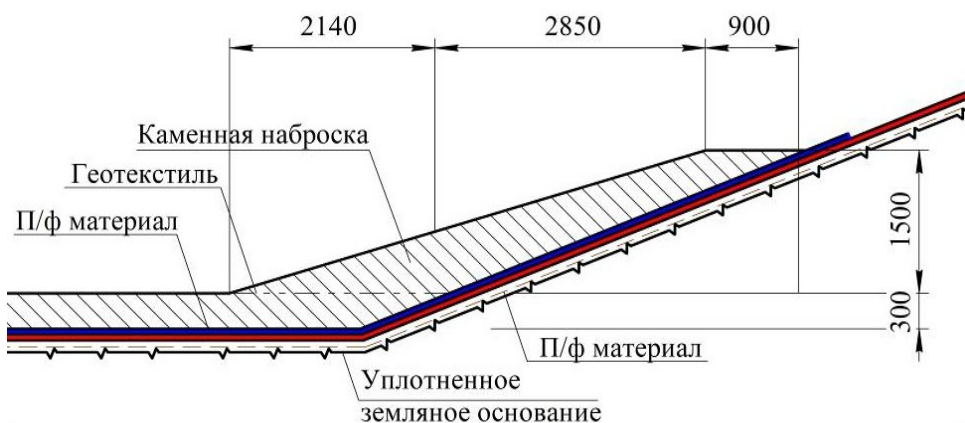


Рисунок 2.3 – Конструкция противофильтрационного покрытия на втором участке реконструкции [300]

Конструктивное решение облицовки третьего участка реконструкции канала представляет собой комбинированное покрытие с креплением противофильтрационного элемента в траншее, заполненной бетоном, применение двух защитных слоев из геотекстиля плотностью более 1000 г/м^2 и материала для защиты от промерзания (рисунок 2.4).

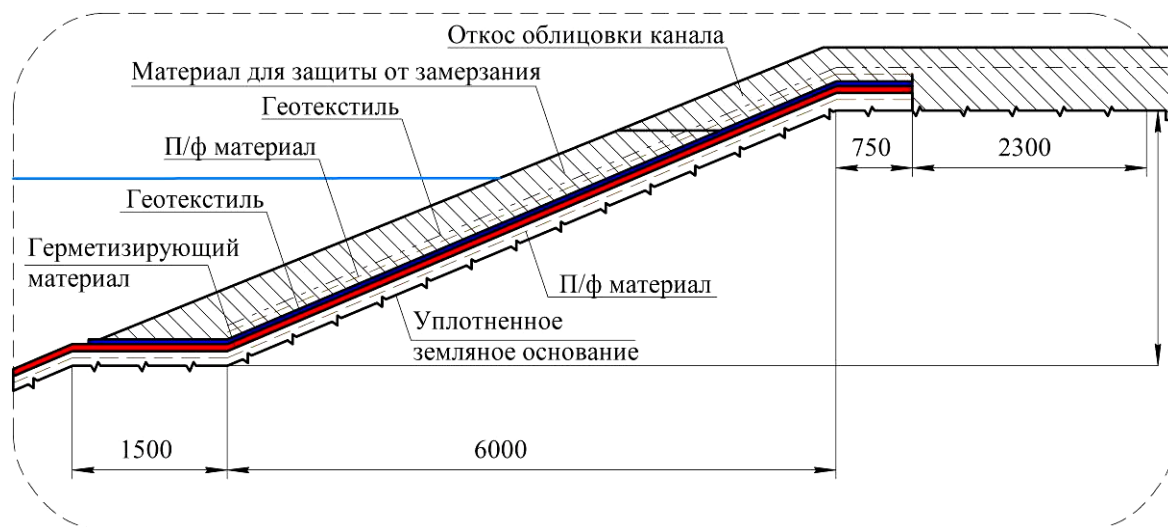


Рисунок 2.4 – Конструктивное решение облицовки канала «Тесаро» на третьем участке реконструкции [300]

В России и странах СНГ накоплен определенный опыт применения противофильтрационных покрытий на каналах и водоемах, в том числе Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко, А. Г. Алимовым [9], И. М. Елшиным, Г. В. Абелишвили [5], С. В. Сольским, О. И. Гладштейном, А. Ф. Зоценко [86], В. В. Козловым [99], В. П. Камсковым, В. Б. Резником и многими другими.

Отечественными учеными [10, 129] разработан ряд новых и усовершенствованных конструкций противофильтрационных облицовок с использованием геосинтетических и геокомпозитных материалов [129], применение которых позволит уменьшить потери воды на фильтрацию, обеспечить КПД каналов в пределах нормативных значений 0,93–0,95. Для конструкций облицовок [129], выполняемых с защитным покрытием из грунта или в земляном русле предусматривается закрепление откосов полимерной эмульсией с целью обеспечения устойчивости, водостойкости и наименьшей гидравлической шероховатости. Для армирования грунта в конструкции экрана используется геосетка. Такую конструкцию применяют по дну канала при слабых основаниях. Требования к противофильтрационному элементу в конструкции экрана: толщина – 6,0 мм, коэффициент фильтрации – $5 \cdot 10^{-9}$ см/с, плотность – 4,5 кг/м².

По мере эксплуатации каналов состояние облицовок ухудшается из-за динамического воздействия воды и наносов, транспортируемых водным потоком, перепадов температур вследствие попеременного замораживания и оттаивания и многих других факторов. В результате образования трещин и разрушения швов происходят утечки, которые приводят к потерям воды. Поэтому важным вопросом становится водонепроницаемость облицовок и их ремонт [64].

А. Г. Алимовым [12] по натурным исследованиям, проведенным на каналах Северо-Крымской, Северо-Рогачинской и других оросительных системах, было установлено, что наибольшие потери на фильтрацию (до 98 %) приходятся на стыковые соединения. В связи с этим для уплотнения использовались герметики с различными конструкциями стыков, которые изготовлены из эластичных материалов (тиокола, силикона и др.). Необходимо отметить, что конструкции стыков, изготовленных из эластичных материалов, являются достаточно дорогими.

Проведенные исследования на канале Р-1 Каховской ОС с облицовкой из сборных железобетонных плит (НПК) по пленке [125] показали, что фильтрационные потери составили до 320 л/(сут. м²), которые превышают допустимые нормы в несколько раз. Натурными исследованиями на канале БСК-3 [125] установлено, что после проведения инъекции на участке канала (ПК 247–ПК 425) коэффициент

фильтрации (K_f) получен равным $1,55 \cdot 10^{-6}$ см/с. Эти данные показывают, что K_f также не удовлетворяет условиям допустимых значений [112].

Таким образом, как в зарубежном, так и в отечественном опыте создания противофильтрационных устройств на каналах все большее применение находят геосинтетические материалы. Особенно значительный опыт накоплен в Швейцарии, Германии, Франции, США, Японии, Испании и других странах. Более масштабное применение противофильтрационных покрытий из геосинтетиков (в том числе на основе бентонита) на оросительных каналах в нашей стране сдерживается недостаточным опытом разработки конструкций облицовок и последующей их опытной апробацией в натуральных условиях, несовершенством методов расчета долговечности, водонепроницаемости и надежности, отсутствием единой нормативно-методической документации по дальнейшей эксплуатации и ремонту.

2.3 Многослойные конструкции противофильтрационных покрытий каналов из геосинтетических материалов

В процессе исследований автором были разработаны и запатентованы новые конструктивные решения на противофильтрационные покрытия (дренажно-фильтрующие, рулонные и крупнотоннажные), которые могут применяться при строительстве и реконструкции каналов.

Конструктивно-техническое решение в виде полимерного композитного покрытия на основе бентонита (по пат. № 2634549) может быть использовано для противофильтрационных целей (на каналах мелиоративных систем и водоемах без устройства дополнительных защитных слоев). Покрытие (рисунок 2.5) включает нижнее полимерное полотнище, выполненное с профилированными каналами, расположенными по всему периметру через равные расстояния. Для исключения фильтрации через возможные отверстия (в случае повреждаемости полимерного полотнища), профилированные каналы заполнены бентонитом, который при взаимодействии с водой гидратирует и регенерирует поврежденные участки. Верхнее (покрывающее) полотнище выполнено из эластичного полимерного материала и соединено с нижележащим покрытием экструзионной сваркой.

Для возможности применения композиционного материала в сложных инженерных условиях он выполнен со слоем полимерной плоской георешетки, соединенной с основанием нижнего геотекстильного полотна методом экструзии.

Научная новизна конструктивно-технического решения заключается в разработке единой комбинированной конструкции с дублирующими противофильтрационными элементами, обеспечивающей повышенную водонепроницаемость.

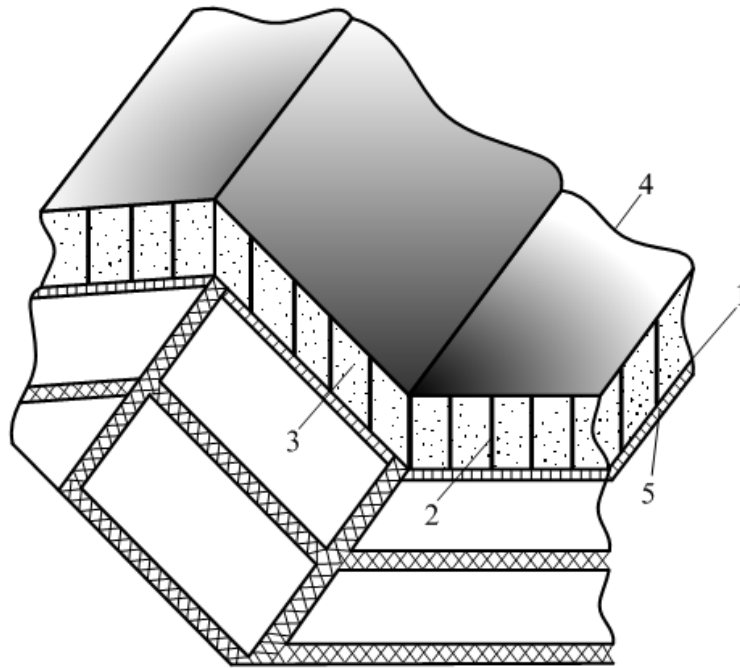


Рисунок 2.5 – Конструктивная схема полимерного геосинтетического покрытия на основе бентонита:

- 1 – нижнее полимерное полотно; 2 – профилированные каналы; 3 – бентонит;
4 – верхнее полимерное полотно; 5 – полимерная плоская георешетка

Применение в композитном материале двух полимерных полотен позволит уменьшить шероховатость облицовок, а при опорожнении каналов бентонитовый слой будет оставаться герметичным и увлажненным, что позволит снизить процесс высыхания и образования трещин на бентоните.

Для возможности укладки полимерного композитного материала вручную, покрытие выполнено в виде рулонов со следующими типоразмерами (варианты): ширина – 3 м, длина – 30 м и ширина – 5 м, длина – 50 м. После укладки на объекте соединение отдельных полотен производится сваркой методом горячего клина. Устройство дополнительных защитных и подстилающих слоев не требует-

ся, кроме подготовки грунтового основания, заключающегося в удалении растительности, камней, других крупных и острых включений.

Разработанное полимерное композитное покрытие на основе бентонита может применяться без устройства дополнительных защитных слоев, тем самым обеспечивается минимальная шероховатость облицовки (и как следствие максимальная пропускная способность на оросительных каналах).

Другим разработанным автором решением является противофильтрационное композитное покрытие [159], предназначенное для применения в гидротехническом и мелиоративном строительстве при устройстве противофильтрационных элементов на работающих каналах без их опорожнения.

Основная цель, на достижение которой направлено техническое решение, – обеспечение надежной противофильтрационной защиты создаваемых сооружений, а также устройство водонепроницаемого покрытия на действующих гидромелиоративных объектах без их предварительного опорожнения.

Конструктивное решение полимерного композитного покрытия на основе бентонита проиллюстрировано на рисунке 2.6 [159].

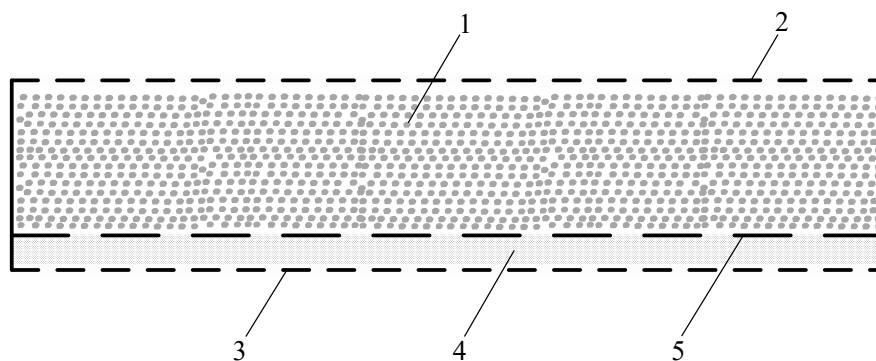


Рисунок 2.6 – Конструктивное решение полимерного бентонитонаполняемого покрытия [159]:

- 1 – бентонит; 2 – тканый геотекстиль, с нанесенной жидкой композицией;
- 3 – нетканый геотекстиль, с нанесенной жидкой композицией; 4 – мелкозернистый песок;
- 5 – полотнище нетканого геотекстиля

Противофильтрационное композитное покрытие выполнено следующим образом. Бентонит (в порошкообразном состоянии или в гранулах) размещен между двумя слоями геотекстиля тканого и нетканого, на который в свою очередь нанесена жидкая композиция на основе полиэтилена (толщиной слоя композиции 0,2–0,4 мм), закрепляющая тканый (верхний) и нетканый (нижний) геотекстили,

а также препятствующая образованию повреждений и интенсивной фильтрации через полотнища геотекстиля. Для исключения всплытия композитного полотнища под водой оно выполнено со слоем мелкозернистого песка (с модулем крупности $M_{кр} \leq 1,5$, толщиной слоя 3–5 мм), который в свою очередь для исключения перемешивания отделен от слоя бентонита полотнищем нетканого геотекстиля. Соединение отдельных покрытий производится в заводских условиях методами иглопробивания и термоскрепления.

Противофильтрационное композитное покрытие работает следующим образом. Противофильтрационный материал из рулонов укладывают на действующих каналах без их опорожнения, при этом исключается не только всплытие полотнищ (что не достигалось в аналогах противофильтрационных материалов), но и преждевременная гидратация бентонита за счет применения тканого и нетканого геотекстиля, обработанного жидкой композицией на основе полиэтилена. При образовании повреждений в композитном полотнище происходит гидратация бентонита, за счет чего обеспечивается герметичность всей конструкции экрана.

2.3.1 Комбинированные конструкции из геосинтетических материалов на основе бентонита

На оросительных каналах, выполняемых в сложных инженерных условиях (например, при наличии суффозионно-карстовых и других явлений), а также на сооружениях повышенной опасности, требуется создание конструкций противофильтрационных устройств, обеспечивающих практически полную гидроизоляцию. К таким конструктивным решениям могут быть отнесены комбинированные экраны с применением дублирующих противофильтрационных и защитных слоев.

Под комбинированной конструкцией экрана следует понимать многослойные противофильтрационные устройства (покрытия и облицовки), включающие несколько (как правило, два и более) гидроизоляционных дублирующих слоев, защитных и (или) подстилающих покрытий с целью обеспечения повышенной эксплуатационной надежности и безопасности.

К комбинированным противофильтрационным конструкциям с заранее заданными свойствами можно отнести разработанное автором конструктивно-техническое решение (варианты) по патенту [158], которое может быть использовано при создании противофильтрационных экранов на оросительных каналах, водоемах и других сооружениях. В данном конструктивном решении в качестве противофильтрационного элемента используется полимерная высокопрочная мембрана, укладываемая на песчаное основание (толщиной 0,2–0,3 м), с последующим устройством защитного покрытия из тканого геотекстиля высокой плотности (1000–1200 г/м²). Поверх защитного покрытия из геотекстиля устраивается пригрузочный слой (для оросительных каналов из бетона или каменной наброски; для водоемов из грунта толщиной 0,4–0,5 м).

Для обеспечения повышенной водонепроницаемости в разработанном автором конструктивном решении [158] рекомендуется использовать дублирующие противофильтрационные элементы в сочетании полимерной мембраны и Набentonита, что позволит увеличить фильтрационную безопасность оросительных каналов. Для сооружений, устраиваемых на просадочных грунтах, предусмотрено устройство дополнительных геосинтетических слоев из полимерной геосетки и полотнищ из геотекстильных материалов.

Варианты создания конструктивно-технического решения применительно к противофильтрационным покрытиям каналов проиллюстрированы рисунком 2.7.

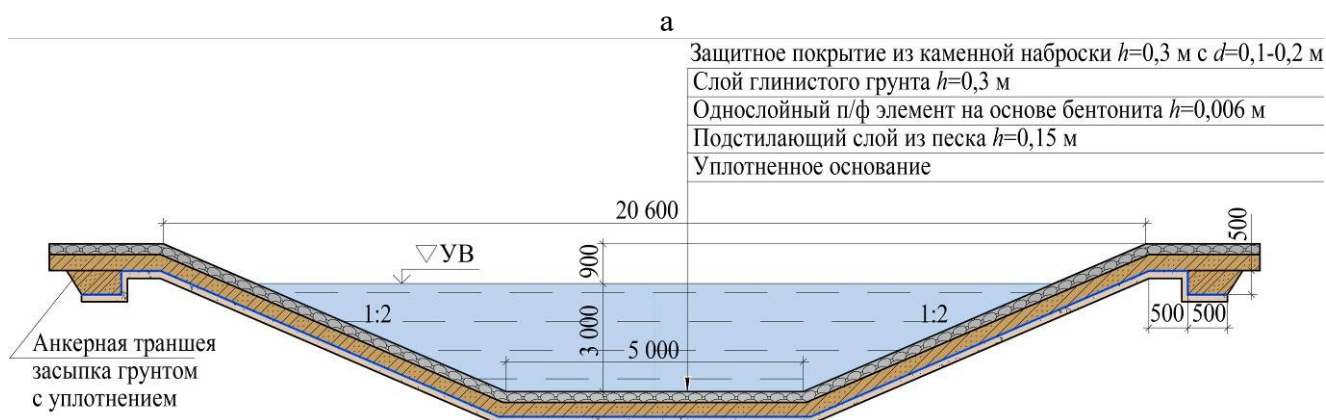


Рисунок 2.7 – Варианты применения противофильтрационных конструкций на основе бентонита, лист 1

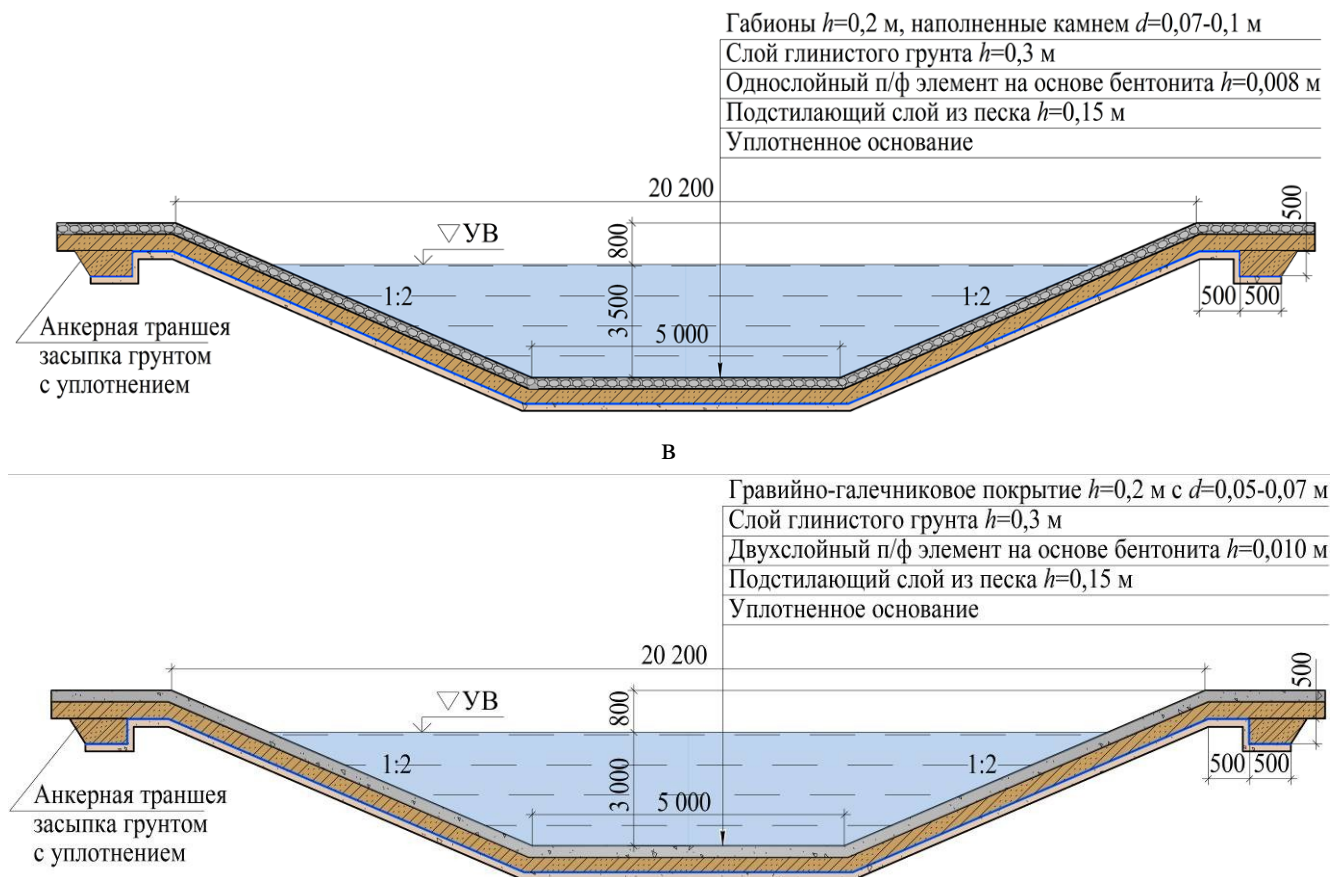


Рисунок 2.7 – Варианты применения противодиффузионных конструкций на основе бентонита, лист 2:

а – с защитным покрытием из каменной наброски;

б – с защитным покрытием из габионов; в – с защитным покрытием из гравийно-галечникового материала

В конструктивно-технических решениях, представленных на рисунке 2.7, каменная наброска (или гравийно-галечниковый слой) выполняет функцию пригрузочного устройства, и одновременно защищает противодиффузионный элемент от возможных повреждений и деформаций.

Вариант исполнения разработанной автором конструкции противодиффузионного покрытия на участке оросительного канала (включающего противодиффузионный комбинированный экран повышенной надежности, состоящий из геосинтетического бентонитового материала, который продублирован дополнительным противодиффузионным элементом из полимерной геомембраны, термоскрепленной с нижним полотнищем тканого геотекстиля) представлен на рисунке 2.8.

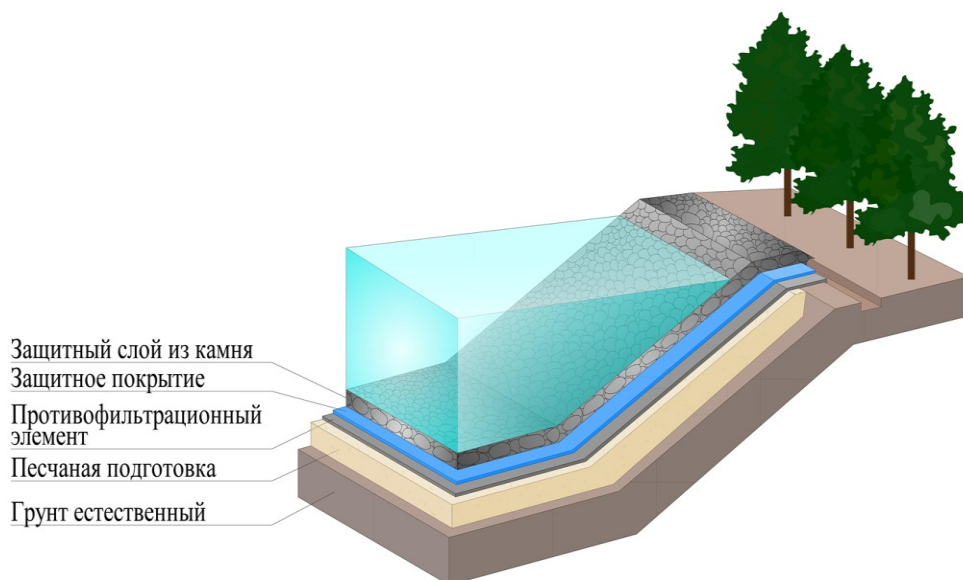


Рисунок 2.8 – Вариант исполнения разработанного комбинированного конструктивно-компоновочного решения

При создании противофильтрационных покрытий на каналах с крутыми откосами может возникать оползание защитного каменного (или грунтового) материала, что в свою очередь будет приводить к оголению противофильтрационного элемента, его преждевременному старению, разрушению и повреждаемости. Для таких сооружений, выполняемых с крутыми откосами (например, как на опытном участке Азовского магистрального канала с заложением откосов 1:2), возможно использование разработанной автором конструкции берегоукрепительного и противофильтрационного покрытия (рисунок 2.9) [162].

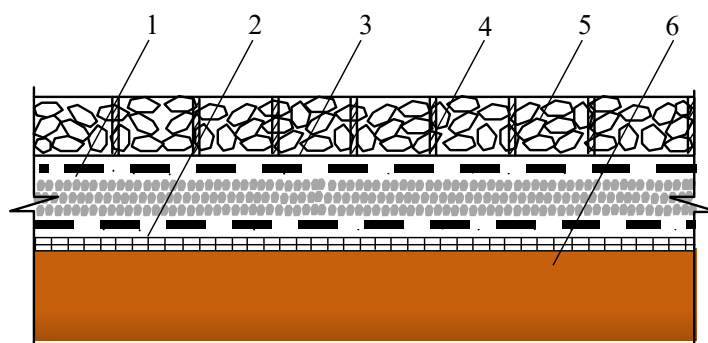


Рисунок 2.9 – Конструкция берегоукрепительного и противофильтрационного покрытия:

1 – противофильтрационный материал; 2 – полимерная геосетка;
3 – матрацно-тюфячные габионы; 4 – ячейки; 5 – камень; 6 – грунт основания

Берегоукрепительное и противофильтрационное покрытие включает противофильтрационный геосинтетический бентонитовый материал, армированный в ос-

новании геосеткой, с устройством поверх защитного покрытия из матрацно-тюфячных габионов. При этом противофильтрационный материал соединен с полимерной геосеткой термоскреплением, а матрацно-тюфячные габионы выполнены с ячейками, которые заполняются каменным материалом с последующим закрытием габионного тюфяка сетчатой крышкой [162].

Применение разработанного противофильтрационного покрытия позволит также защитить откосы каналов от механических и фильтрационных деформаций.

При устройстве противофильтрационных экранов с использованием композитных материалов на объектах водохозяйственного назначения (в том числе оросительных каналах) может быть использовано разработанное автором конструктивно-компоновочное решение по способу устройства и создания комбинированного противофильтрационного экрана [164] (рисунок 2.10).

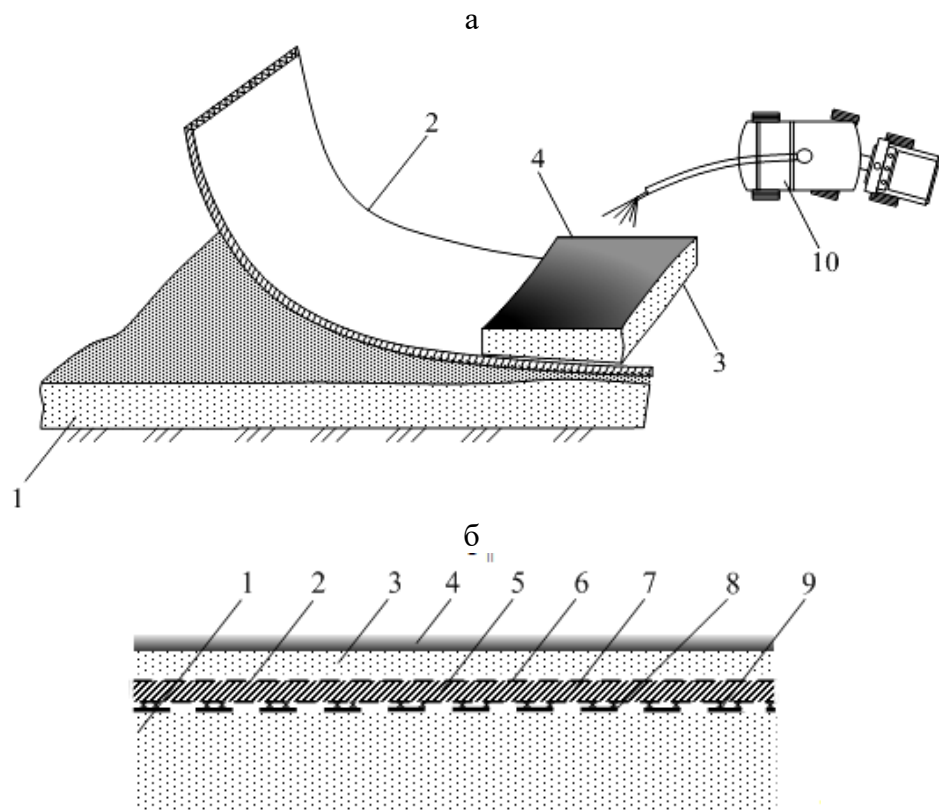


Рисунок 2.10 – Способ и устройство создания комбинированного противофильтрационного экрана [164]:

а – способ создания противофильтрационного экрана; б – конструктивная схема покрытия; 1 – грунтовое основание; 2 – противофильтрационный материал; 3 – защитный грунтовый слой; 4 – закрепитель грунта; 5 – гранулированный бентонит; 6 – покрывающий геотекстиль; 7 – армирующий геотекстиль; 8 – полимерная геосетка; 9 – термоскрепление; 10 – оборудование с полимерным закрепителем

Выполняется подготовка грунтового основания (при использовании для основания экрана естественной поверхности производят срезку растительного слоя, удаление с экранируемой поверхности остроугольных и недопустимых по крупности частиц грунта ($d \geq 10$ мм), корней и других крупных включений), укладка противofильтрационного материала, его соединение, контроль целостности покрытия, отсыпка защитного слоя грунта с последующим его уплотнением и обработкой защитного уплотненного грунтового слоя водонепроницаемым жидким закрепителем на полимерной основе. Обработка защитного грунтового слоя позволяет повысить его устойчивость, предотвратить сползание и обеспечивает повышенный противofильтрационный эффект [164].

Комбинированное противofильтрационное покрытие (см. рисунок 2.10б) включает: подготовленное грунтовое основание; противofильтрационный геосинтетический материал, состоящий из гранулированного бентонита; покрывающего и армирующего слоев геотекстильного материала; полимерную плоскую геосетку, термоскрепленную с нижним полотнищем геотекстиля. Поверх геосинтетического материала отсыпан защитный грунтовый слой, обработанный и закрепленный водонепроницаемой полимерной эмульсией.

Применение данного технического решения позволит обеспечить повышенную противofильтрационную эффективность и эксплуатационную надежность (в том числе при возведении экранов в сложных инженерных условиях) за счет использования в конструкции полимерного закрепителя грунтового слоя и геосинтетического материала, усиленного армирующим элементом.

2.3.2 Противofильтрационные и дренажно-фильтрующие покрытия оросительных каналов

При устройстве противofильтрационных экранов в сложных инженерных условиях на них действует ряд сил, включая подпор грунтовыми водами, что может привести к последующему отрыву, всплытию и дрейфу противofильтрационного полотнища. В данном случае возникает необходимость устройства мощного защитного покрытия (например, из камня, габионов, плит), которое в свою очередь

может нарушить целостность противofильтрационного экрана или привести к разрушению защитного слоя водным потоком. Необходимо отметить, что под действием гидростатического давления противofильтрационное покрытие будет подниматься, что может привести к нарушению герметичности швов с последующим выходом фильтрационного потока. Все это и обуславливает ограниченность применения геосинтетических материалов и других противofильтрационных элементов при подпоре и инфильтрации грунтовыми водами. Наглядным примером могут служить обследуемые участки ДМК в Ростовской области.

Для дренирования облицовок каналов, выполняемых в сложных инженерных условиях с противofильтрационными экранами, может быть использовано разработанное с участием автора конструктивно-технологическое решение по способу дренирования геокомпозитных покрытий [165]. Целью данного решения является повышение эффективности работы геокомпозитных покрытий в сложных инженерных условиях, в частности, при подпоре грунтовыми водами и инфильтрации.

Способ дренирования осуществляется следующим образом. При выполнении противofильтрационного экрана в сложных инженерных условиях (например, при инфильтрации) производится устройство дренирующих элементов для свободного отвода грунтовых вод через противofильтрационное покрытие. Для этого под геосинтетический материал укладывают патрубок с перфорированной полимерной полкой, на который монтируется цилиндрический колпак с отверстием. В свою очередь дренирующий элемент в виде пустотелого цилиндра с клапаном оборудован лепестковой диафрагмой, выполненной из эластичного полимерного материала с утяжелителями.

Дренирование облицовки осуществляется следующим образом. При отсутствии подпора грунтовыми водами или меньшем давлении при подпоре (рисунок 2.11), чем гидростатическое давление в канале (при $P_{гс} > P_{под}$, где $P_{гс}$ – гидростатическое давление, Па; $P_{под}$ – давление подпора, Па), лепестковая гибкая диафрагма в пустотелом цилиндре с клапаном препятствует фильтрации воды из канала (за счет прижатия полимерных лепестков с утяжелителями гидростатическим давлением к нижней части полки) [165].

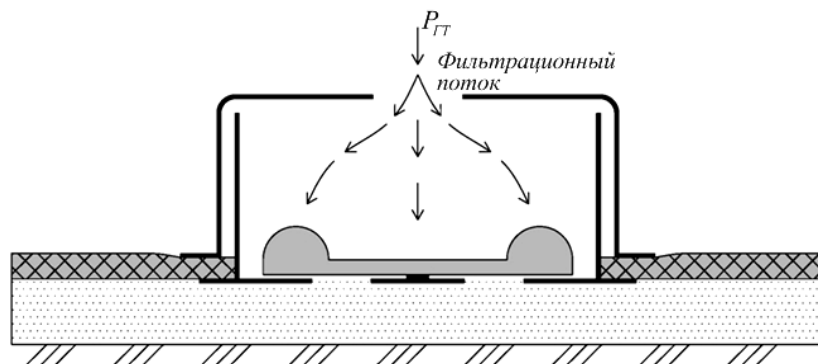


Рисунок 2.11 – Схема работы клапана при отсутствии подпора грунтовыми водами

При подпоре грунтовыми водами (рисунок 2.12) диафрагма в покрытии отжимается фильтративным потоком и обеспечивается свободный отвод грунтовых вод через клапан в канал, что способствует снижению избыточного давления на облицовку до безопасных значений, исключая его выпор [165].

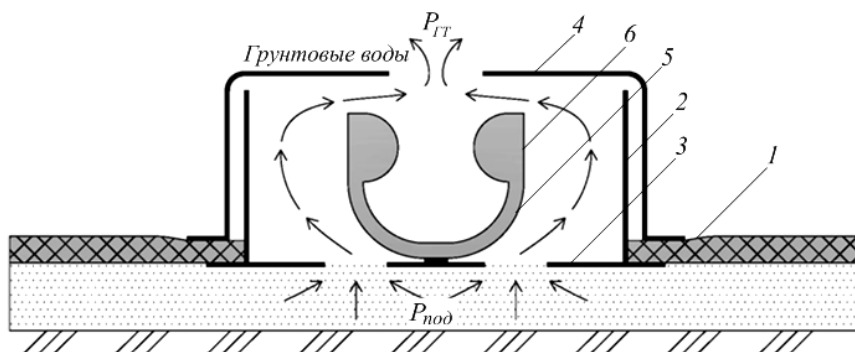


Рисунок 2.12 – Схема работы клапана при подпоре грунтовыми водами:
 1 – противофильтрационный материал; 2 – патрубок; 3 – перфорированная полка;
 4 – цилиндрический колпак; 5 – лепестковая диафрагма; 6 – утяжелитель

Применение данного способа позволит значительно повысить эффективность работы противофильтрационных покрытий каналов, выполняемых из геосинтетических материалов при подпоре грунтовыми водами.

Научная новизна [165] заключается в разработке принципиально нового конструктивно-технологического решения с последующим расчетным обоснованием условий работы отдельных его элементов (клапанов из геосинтетических материалов), обеспечивающих функционирование устройства.

Для повышения противофильтрационного эффекта и отвода грунтовых вод может использоваться разработанное О. А. Бaeвым многослойное противофильтрационное и дренажное покрытие по патенту на изобретение № 2718805 [166].

Многослойное противофильтрационное и дренажное покрытие [166] включает элемент, выполненный из бентонитовых матов, уложенных на подготовленное грунтовое основание; дренирующий элемент, представленный композитным материалом, состоящим из двух слоев нетканого геотекстиля, между которыми расположены полимерные перфорированные дренажные трубки, при этом нижнее полотнище геотекстиля соединено с полимерным слоем из геомембраны, а защитное покрытие представлено двойным дублирующим песчаным слоем. Соединение двух слоев нетканого геотекстиля в дренажном элементе выполнено нитями, а полимерной геомембраны с геотекстилем – термоскреплением.

Применение такого решения позволит создавать комбинированные экраны, обеспечивающие не только высокий противофильтрационный эффект, но и одновременный отвод грунтовых вод через систему дренажных устройств.

При возведении противофильтрационных облицовок на оросительных каналах, выполненных в сложных инженерных условиях (при высоком стоянии и значительных колебаниях уровня грунтовых вод), может использоваться конструктивно-технологическое решение по способу дренирования облицовки канала (заявка на изобретение РФ 2020137948 от 18.11.2020) [167].

Данное конструктивно-техническое решение включает следующие элементы: бетонные плиты с отверстиями, заполненными фильтрующим материалом; запорное устройство из жесткого материала цилиндрической формы с пластиной; полимерный экран из геомембраны. Под облицовкой в верхней части на откосе выполнен дренажный мат из двух–четырёх слоев нетканого геотекстиля, а в нижней части устроен приямок, который сообщается с отверстиями (бетонных плит), заполненных крупнозернистым наполнителем, обернутым тканым геотекстилем. Запорные устройства выполнены сверху дренирующих элементов и закреплены на уступах облицовки, имеют боковые отверстия для отвода грунтовых вод, а сверху их выполнена геосетка, к которой прикреплен геотекстиль. Внутри запорных элементов помещена жесткая круглая пластина (обратный клапан), к которой прикреплен упругий резиновый элемент, прижимающийся при впуске клапана к дренирующему элементу под действием гидростатического давления в канале, превышающего давления грунтовых вод $P_{гс} > P_{гв}$, исключая утечки воды

через дренарующий элемент облицовки. При снижении уровня воды в канале ниже уровня грунтовых вод при $P_{гс} < P_{гв}$ будет срабатывать запорное устройство за счет поднятия круглой пластины (клапана) потоком грунтовых вод, проходящим через боковые отверстия цилиндра. При этом экран под облицовкой выполнен из геомембраны толщиной 2,0–3,0 мм, а дренажный мат из нетканого геотекстиля толщиной 6,0–10,0 мм. Дренарующие элементы в отверстиях облицовки заполнены гравийно-галечниковым материалом и обернуты тканым геотекстилем [167].

Кроме того, с участием автора разработано конструктивное решение по способу дренирования противофильтрационных покрытий [167] (рисунок 2.13).

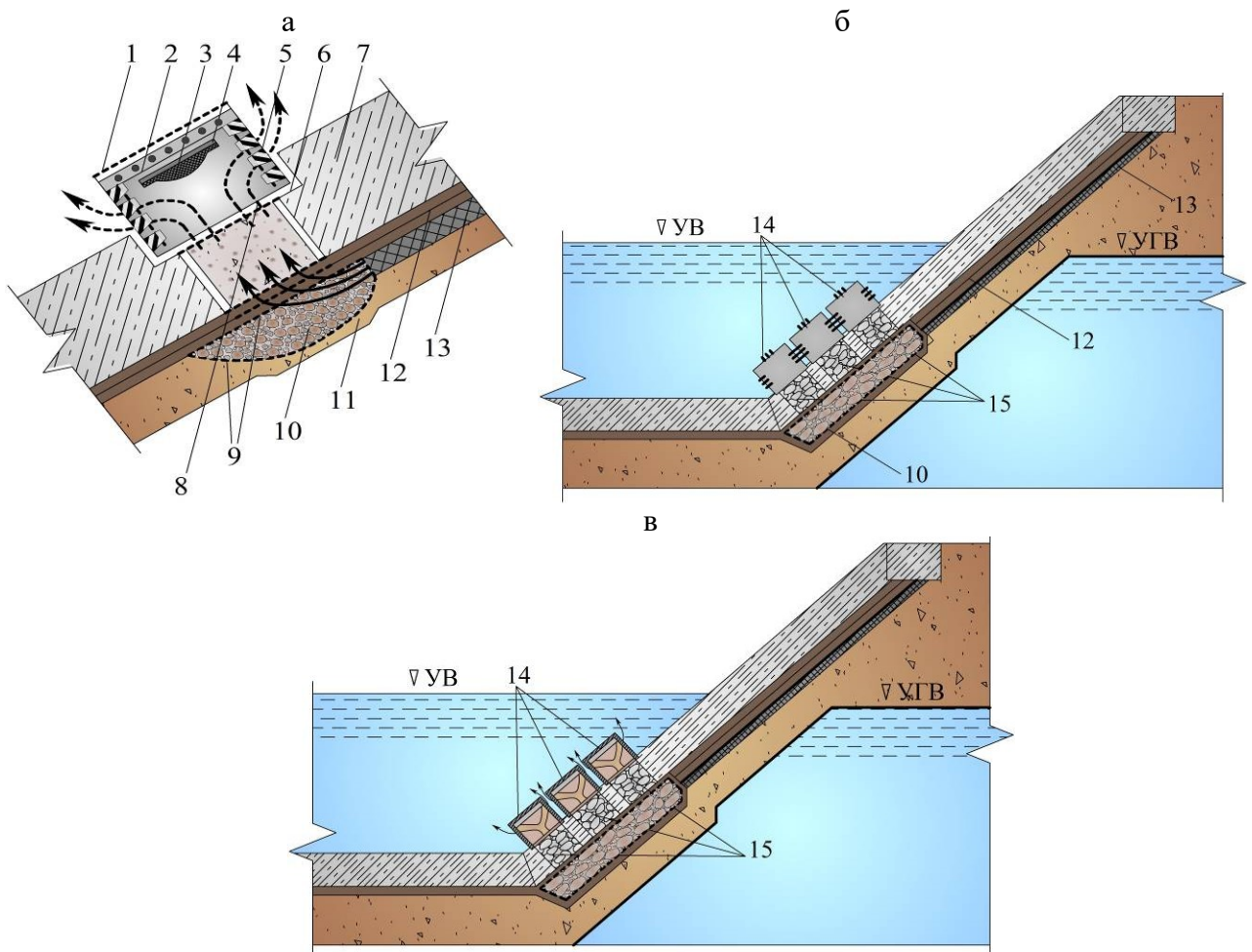


Рисунок 2.13 – Способ и устройство дренирования облицовок каналов с применением геосинтетических материалов [167]:

- а – схема работы дренирующей облицовки при открытии запорного устройства ($P_{гс} < P_{гв}$);
 б – схема работы дренирующей облицовки при закрытии запорного устройства (при $P_{гс} > P_{гв}$);
 в – схема сработки запорного устройства при его открытии (при $P_{гс} < P_{гв}$); 1 – полимерная геосетка; 2 – нетканый геотекстиль; 3 – упругий элемент (накладка); 4 – жесткая пластина; 5 – отверстия на боковой стенке цилиндра; 6 – уступ в облицовке; 7 – бетонная облицовка; 8 – запорные элементы; 9 – тканый геотекстиль; 10 – гравийно-галечниковый наполнитель; 11 – приямок; 12 – геомембрана; 13 – дренажный мат; 14 – дренарующий элемент; 15 – фильтрующий элемент

Дренирование облицовки на оросительном канале производится следующим образом. При уровне воды в канале, превышающем уровень грунтовых вод, когда гидростатическое давление $P_{гс}$ больше давления грунтовых вод $P_{гв}$ ($P_{гс} > P_{гв}$), запорный элемент в виде обратного клапана полностью закрыт. В этом случае обратный клапан с упругой накладкой будет опущен вниз запорного цилиндра и перекроет свободный выход грунтовых вод через фильтрующие элементы (заполненные гравийно-галечниковым заполнителем и обернутые тканым геотекстилем), выполненные в облицовке, которая в свою очередь для исключения потерь воды на фильтрацию устроена с противofильтрационным элементом из полимерной мембраны (толщиной 1,0–3,0 мм). При уровне воды в канале меньше, чем уровень грунтовых вод (когда гидростатическое давление воды в канале будет меньше давления грунтовых вод $P_{гс} < P_{гв}$), запорный элемент с обратным клапаном будет подниматься потоком грунтовых вод до верха запорного устройства. В результате будет происходить открытие отверстий, устроенных на боковой стенке цилиндра, через которые будет свободно поступать поток грунтовых вод.

Преимуществом разработанного конструктивно-компоновочного решения является повышение эффективности работы дренажных устройств на облицовках оросительных каналов, свободный отвод грунтовых вод при их подпоре через дренирующие элементы, исключение образования размывов и деформаций защитных и пригрузочных устройств облицовки.

2.3.3 Технологические решения для определения фильтрационных потерь на каналах

Устройство противofильтрационных комбинированных экранов, как правило, сопровождается созданием защитных покрывающих и пригрузочных слоев из различных грунтовых и каменных материалов, что в свою очередь позволяет защищать противofильтрационный полимерный или бентонитовый элемент от различного рода повреждений. При этом такие повреждения неизбежно образуются в процессе строительства противofильтрационных экранов (чаще на полимерных покрытиях) от передвижения по ним машин и механизмов. Образование

дефектов также связано с устройством защитных пригрузочных слоев, в процессе укладки или уплотнения которых возможны продавливания (прокалывания) противofильтрационного элемента.

Процесс сварки полимерных геомембран иногда сопровождается наличием проваров и недоваров отдельных полотнищ, которые чаще всего сразу после укладки покрываются защитными покрытиями, что собственно и затрудняет процесс контроля целостности (сплошности) противofильтрационных устройств.

После устройства комбинированных противofильтрационных экранов с защитными покрытиями и в процессе эксплуатации сооружений практически отсутствует возможность контроля их водонепроницаемости или определения фильтрационных потерь. Оценка повреждаемости противofильтрационного элемента в натуральных условиях также затруднена в связи с необходимостью проведения скрытых работ. Весь процесс по определению потерь воды на фильтрацию сводится к устройству системы наблюдательных скважин или созданию серии устройств в виде фильтромеров на некоторых участках каналов. Последние характеризуются сложностью производства работ, не выпускаются серийно промышленностью и ограничены в применении. Особенно данный процесс затруднен для водоемов и накопителей различного назначения, которые, как правило, находятся круглогодично в эксплуатации.

С целью контроля сплошности противofильтрационных покрытий, выполняемых из полимерных материалов на каналах гидромелиоративных систем, автором разработано новое техническое решение в виде способа контроля целостности полимерного противofильтрационного экрана [161], применение которого позволит не осуществлять скрытые работы и не проводить комплекс мероприятий, направленных на поиск мест повреждения в гидроизоляционном элементе.

Цель данного конструктивно-технологического решения заключается в повышении точности контроля целостности противofильтрационных экранов, выполняемых из полимерных геомембран и других материалов на основе полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида.

Способ контроля целостности полимерного противофильтрационного экрана осуществляется следующим образом. В период строительства производят измерение электрического сопротивления между противофильтрационным покрытием и основанием экрана известными методами и приборами (например, мегаомметром). Далее к противофильтрационному экрану прикрепляют электрод, который периодически переносят в новую угловую точку по размеченным квадратам со стороной 1×1 м, а электрод, заглубленный в основание экрана, остается стационарным. При этом переносной электрод плотно закрепляют к экрану путем прижатия в горизонтальном положении с помощью специальных клеящихся лент в двух–четырёх местах. Для повышения точности и эффективности контроля сплошности противофильтрационного элемента, заделку краев экрана производят после осуществления всех работ по контролю целостности покрытия.

Разработанный способ контроля целостности полимерного противофильтрационного экрана характеризуется повышенной точностью и эффективностью, может применяться при контроле сплошности покрытий, выполненных из электроизоляционных материалов на основе полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и других полимеров, применяемых на каналах.

Для определения фильтрационных потерь на оросительных каналах известны различные конструктивно-компоновочные решения [155, 157], заключающиеся в устройстве водонепроницаемых перемычек с последующим наполнением отдельного отсека, его промачивании и оборудовании приборами для учета фильтрации и испарения. Такие конструктивные решения характеризуются сложностью производства работ по их выполнению, а также необходимостью полной остановки канала при устройстве в его русле водонепроницаемых перемычек или установке фильтромеров.

С целью определения фильтрационных потерь из облицованных оросительных каналов (без их предварительной остановки и опорожнения, а также для повышения точности измерения) автором разработано технологическое решение по [160].

Вблизи действующего оросительного канала устраивается изолированный измерительный отсек, выполненный с подводом и сбросом воды, с вертикальными

Способ определения фильтрационных потерь осуществляется следующим образом. Вблизи действующего канала без его предварительной остановки и опорожнения создается изолированный измерительный отсек с заданными параметрами (длиной 30–50 м, шириной 2,0–3,0 м), на котором выполняется подвод и сброс воды из канала, что тем самым позволяет создавать условия в отсеке, близкие к условиям эксплуатации канала без его остановки и опорожнения. При подводе воды из канала происходит заполнение измерительного отсека водой и выдерживается длительное его промачивание. В свою очередь измерительный отсек выполнен из полимерных водонепроницаемых перемычек в виде противофильтрационного элемента из бесшовной полимерной геомембраны с двумя защитными прокладками из геотекстиля высокой плотности. Для поддержания противофильтрационного элемента в устойчивом положении, а также исключения оползания вертикальных стенок выполнено крепление плоскими щитами с обратной отсыпкой грунта. При этом противофильтрационный элемент с двумя защитными прокладками выполнен в виде зуба на глубину 0,5 м с каждой из сторон.

На изолированном отсеке в местах подвода и сброса воды выполнены плоские затворы (из водонепроницаемого материала с герметичными уплотнителями), регулирующие уровень воды в отсеке. Водонепроницаемость затворов и герметичность стыковых соединений является одним из необходимых условий поддержания постоянного уровня воды в измерительном отсеке.

После проведения всех операций по выполнению измерительного отсека проводятся замеры объема потерь воды на фильтрацию в условиях установившегося фильтрационного режима. Для измерения уровня воды, измерительный отсек оборудуется уровнемерами, удельный фильтрационный расход определяется по следующей расчетной зависимости [160]:

$$q_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{L_{\text{отс}}} = \alpha \frac{\Delta h}{t} \cdot b, \quad (2.1)$$

где q_{ϕ} – удельный фильтрационный расход, (л·с)/(сут·м); Q_{ϕ} – суммарный фильтрационный расход из измерительного отсека длиной $L_{\text{отс}}$, л/сут; $L_{\text{отс}}$ – длина отсе-

ка, м; α – коэффициент соответствия размерностей, $\alpha = 8,64 \cdot 10^4$ (л·с)/(сут·мм·м²); Δh – падение уровня воды в отсеке, мм; t – время, в течение которого происходит падение уровня воды на величину Δh , с; b – ширина канала по дну, м.

Для максимальной точности измерений поверх изолированного отсека может быть натянут светопрозрачный тент из полиэтиленовой пленки, что позволит частично исключить потери воды на испарение.

Научная новизна заключается в разработке нового способа [160], технологии его создания и краткой методологии проведения исследований по определению фильтрационных потерь из каналов посредством изолированного отсека.

Преимущество разработанного способа (по патенту [160]) заключается в том, что замеры потерь воды на фильтрацию осуществляются без предварительной остановки и опорожнения канала путем устройства изолированного отсека.

2.4 Конструкции противофильтрационных и защитных покрытий из геосинтетических материалов

Помимо представленных в п. 2.3 конструктивно-технических и компоновочных решений по патентам на изобретения, автором также были разработаны конструкции противофильтрационных покрытий для оросительных каналов с применением геомембран и различных защитно-пригрузочных устройств [28].

На рисунке 2.15 приведена конструктивная схема противофильтрационного экрана из профилированной геомембраны без дополнительного защитного слоя из геотекстиля [28], применимая для каналов гидромелиоративных систем.

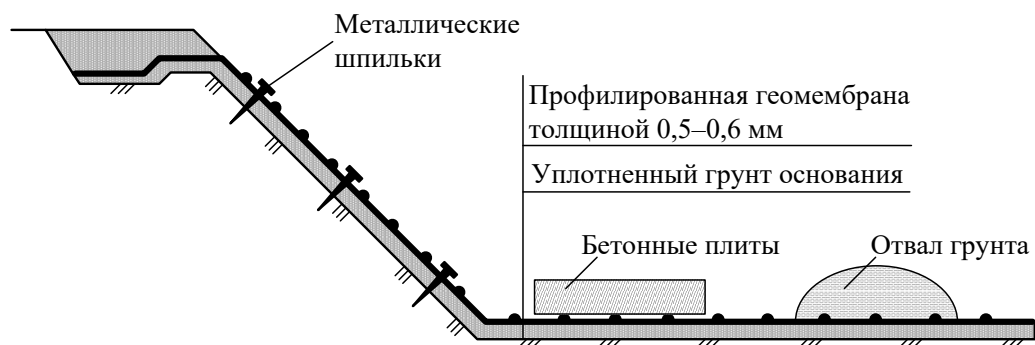


Рисунок 2.15 – Конструкция ПФП канала из профилированной геомембраны

Крепление профилированной геомембраны к основанию производится на откосах металлическими шпильками, по дну – пригрузом из бетонных плит или грунта. Геомембрана укладывается на подготовленное уплотненное грунтовое основание или песчаную «подушку» с минимальной толщиной слоя $t = 200\text{--}250$ мм. Применение данной конструкции позволит снизить шероховатость русел на каналах, сократить потери воды на фильтрацию при ее транспортировке.

Конструктивная схема противофильтрационного экрана из профилированной геомембраны с защитным слоем грунта (рисунок 2.16) рекомендуется для применения на каналах с малыми расходами (до $3\text{--}5$ м³/с), небольшими скоростями течения (до $0,4$ м/с), в частности, для подачи воды по внутриводосточным распределителям или временным оросителям.



Рисунок 2.16 – Конструкция противофильтрационного экрана из профилированной геомембраны с защитным покрытием из грунта

При использовании защитного покрытия из грунта или иных материалов рекомендуется устройство защитных слоев из геотекстиля. При этом геомембрана должна быть уложена на подготовленное уплотненное основание.

В представленном конструктивном решении (рисунок 2.17) профилированная геомембрана укладывается на подготовленное грунтовое основание.



Рисунок 2.17 – Противофильтрационный экран из профилированной геомембраны с защитным покрытием из бетона

Крепление на крутых откосах осуществляется с помощью шпилек, рекомендуемая толщина защитного слоя из бетона принимается в пределах $t = 100–150$ мм. Для обеспечения водонепроницаемости и герметичности противофильтрационного элемента рекомендуется применение защитных прокладок [115].

При использовании геосинтетических бентонитовых материалов в качестве противофильтрационных элементов на оросительных каналах могут применяться разработанные автором конструктивные схемы экранов с использованием дополнительных защитных и пригрузочных слоев (рисунок 2.18).

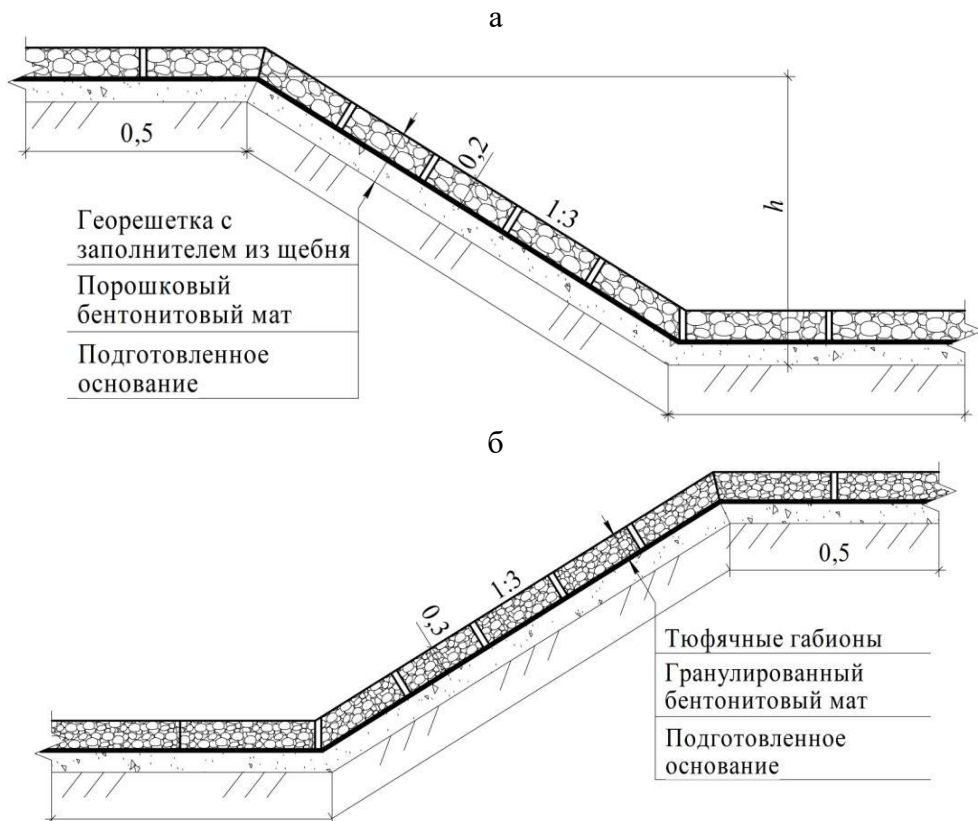


Рисунок 2.18 – Конструкции противофильтрационного покрытия канала с использованием бентонитовых материалов:

- а – защитное покрытие из георешетки, заполненное каменным материалом;
б – защитное покрытие из габионов

В зависимости от скорости течения воды в канале, его технических характеристик, в качестве пригрузочного слоя для бентоматов рекомендуется применение георешетки с последующим ее заполнением камнем (см. рисунок 2.18а) с диаметром фракции 10–15 см, с толщиной защитного слоя не менее 20 см (по результатам натуральных исследований предотвращает прорастание корней). При устройстве облицовок на крутых откосах с заложением ($m = 1:1–1:2,5$) рекомендуется приме-

нение матрацно-тюфячных габионных конструкций с последующим их соединением и креплением на бровке канала (см. рисунок 2.18б).

В процессе создания противофильтрационных и защитных покрытий на каналах в некоторых случаях существует необходимость выполнения дренажных устройств с целью отвода грунтовых вод. Для таких целей могут применяться разработанные конструктивные решения, включающие сочетание гидроизоляционных и дренажных геосинтетических материалов (рисунок 2.19).

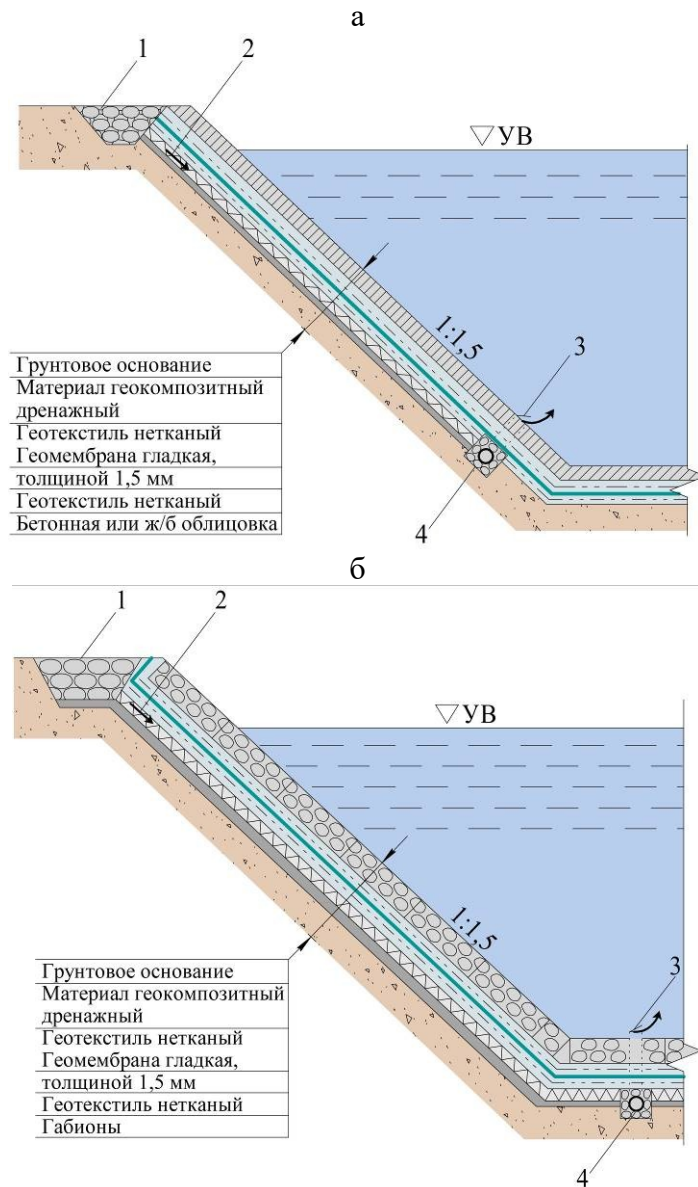


Рисунок 2.19 – Конструкция облицовки с противофильтрационным и дренажным покрытием (варианты):

- а – конструкция экрана с защитным бетонным покрытием и дренажным элементом на откосе канала; б – конструкция экрана с защитным покрытием из габионов и дренажным элементом по дну канала; 1 – приемок для сбора ливневых и талых вод; 2 – отвод ливневых и талых вод; 3 – обратный клапан; 4 – дренажная труба с отводом в канал

На рисунках 2.20 и 2.21 приведены разработанные варианты конструкций (схем) комбинированных экранов для оросительных каналов с применением противофильтрационных элементов и дренирующих устройств.

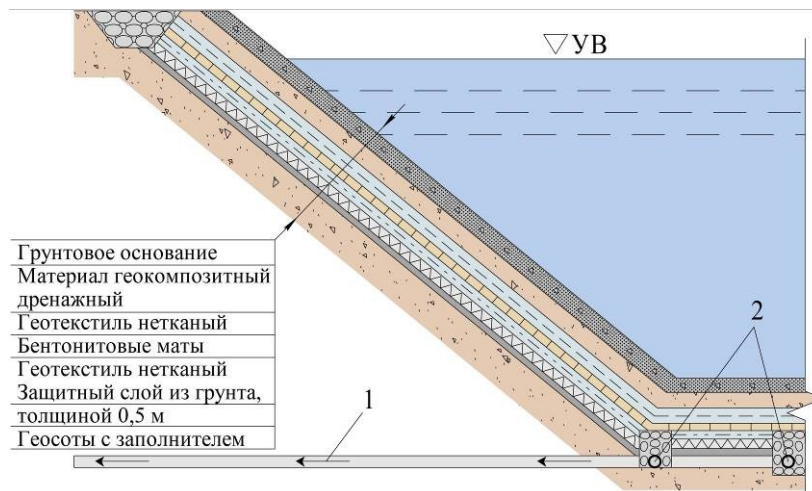


Рисунок 2.20 – Комбинированная многослойная конструкция покрытия оросительного канала:

1 – отвод воды из дренажа; 2 – дренажные трубы

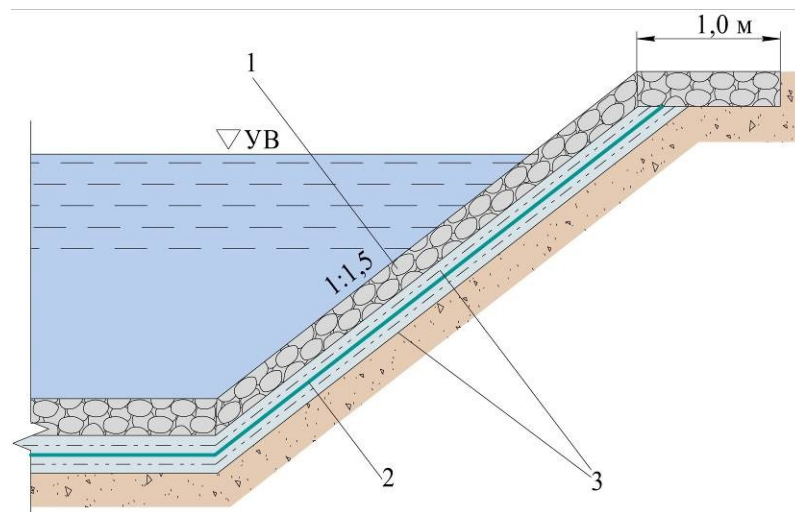


Рисунок 2.21 – Крепление дна и откосов канала габионными конструкциями матрацно-тюфячной формы с противофильтрационным экраном:

1 – габионная конструкция матрацно-тюфячной формы; 2 – геомембрана гладкая; 3 – геотекстиль нетканый

Участки оросительных каналов, характеризующиеся полигональной или параболической формой русла, могут быть экранированы по конструктивному решению (рисунок 2.22), в котором в качестве защитного элемента применяются матрацно-тюфячные габионы, укладываемые по форме русла канала.

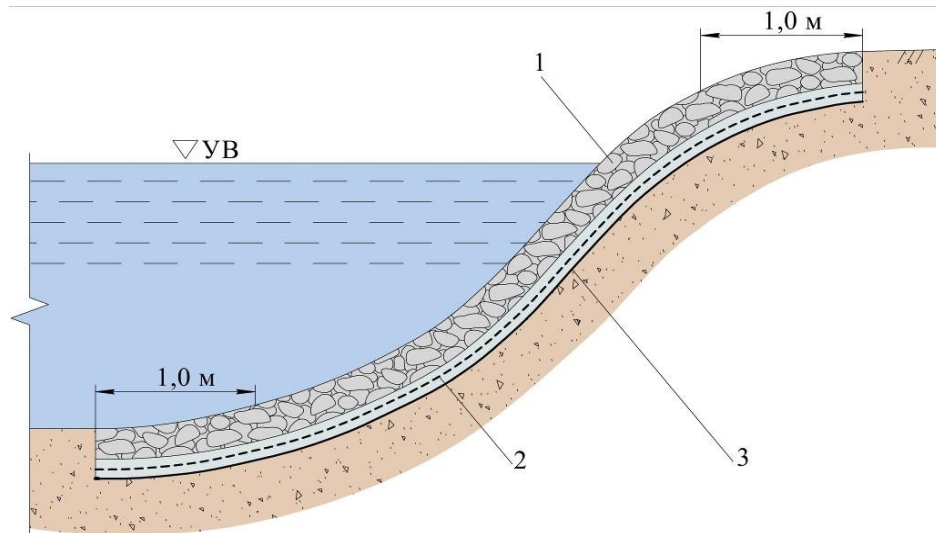


Рисунок 2.22 – Крепление русла габионными конструкциями матрацно-тюфячной формы с обратными фильтрами из геотекстиля: 1 – защитная габионная конструкция матрацно-тюфячной формы; 2 – обратный фильтр из геотекстиля нетканого; 3 – геосинтетический двухслойный противofильтрационный материал

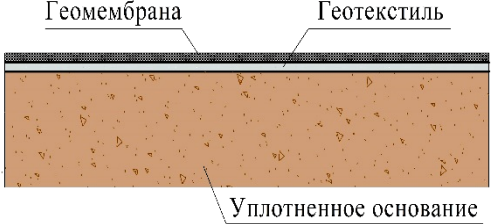
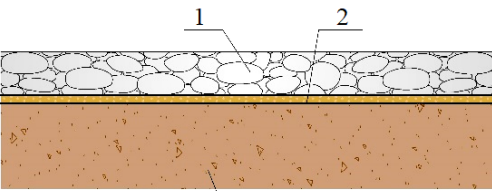
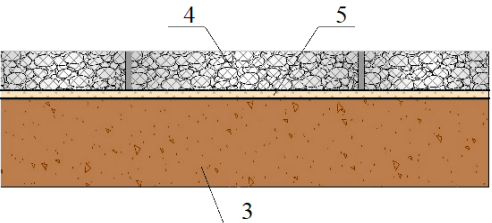
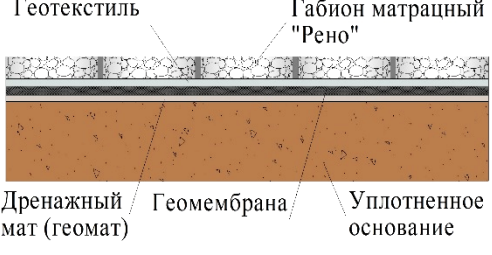
В качестве ПФЭ используется двухслойный геосинтетический материал, выполненный из геомембраны, термоскрепленной с полотнищем геотекстиля. За счет такого решения обеспечивается защита русел каналов от фильтрационных деформаций и снижаются потери воды на фильтрацию. Тканый геотекстиль предотвращает повреждаемость ПФЭ от защитного покрытия из габионов.

Разработанные конструктивные решения противofильтрационных устройств с применением водонепроницаемых и дренажных покрытий обладают повышенными характеристиками по показателям водонепроницаемости и надежности, и уже находят применение на некоторых реконструируемых каналах.

В таблице 2.1 представлены варианты разработанных автором конструкций противofильтрационных облицовок оросительных каналов из геосинтетических материалов, условия и области их применения. Рекомендуемые температуры воздуха при устройстве противofильтрационных покрытий с использованием полимерных геомембран должны составлять от минус 5 до плюс 45 °С.

Некоторые из разработанных конструктивных решений внедрены в проектную практику реконструкции и модернизации противofильтрационных покрытий оросительных каналов, водоемов и других ГТС, что подтверждается актами внедрения (приложение Б).

Таблица 2.1 – Рекомендуемые конструкции противофильтрационных облицовок оросительных каналов, области и условия их применения

Конструктивная схема облицовки	Тип облицовки	Область и условия применения
 <p>Геомембрана Геотекстиль Уплотненное основание</p>	<p>Поверхностный экран</p>	<p>Рекомендуется к применению на участках каналов для снижения шероховатости русла и при повышенных скоростях течений воды (от 2 м/с и более). В качестве ПФЭ могут быть применимы полимерные геомембраны, термоскрепленные в заводских условиях с геотекстилями (с двух или одной стороны), толщина и параметры определяются по ГОСТ Р 56586-2015. Минимальная рекомендуемая толщина полимерного покрытия – 0,2 см</p>
 <p>1 2 3</p>	<p>Закрытый противофильтрационный экран на основе геосинтетического бентонитового материала (апробированные в натуральных условиях варианты конструкций)</p>	<p>Конструкции рекомендуются к применению для создания противофильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов. В качестве защитных устройств рекомендуется использовать: каменную наброску (размер фракции определяется в зависимости от скорости течения и коэффициента заложения откосов); габионы (в том числе матрацного типа) с последующим их креплением на берме канала. На оросительных каналах (со средней скоростью течения до 0,5 м/с, пологим заложением откосов – от 1:2,5 и более) в качестве защитного покрытия может быть использован щебень с размером фракции 70–120 мм</p>
 <p>4 5 3</p>	<p>Цифрами обозначено: 1 – каменная наброска; 2 – ПФЭ на основе бентонита; 3 – уплотненное основание; 4 – габионы; 5 – ПФЭ на основе бентонита и геомембраны</p>	<p>При устройстве облицовок на пучинистых грунтах необходимо учитывать степень морозной пучинистости подстилающих грунтов, глубины промерзания и уровни грунтовых вод согласно ГОСТ 28622-2012. Конструктивное решение противофильтрационной облицовки включает: укладку на пучинистое основание гидромата, предназначенного для отвода и (или) задержания излишних вод, устройство песчаного морозозащитного слоя и укладку водонепроницаемого элемента с последующим устройством пригрузочного слоя из габионов</p>
 <p>Геотекстиль Геомембрана Уплотненное основание Дренажный мат (геомат) Габион матрацный "Рено"</p>	<p>Конструкция облицовки канала на пучинистых грунтах</p>	<p>При устройстве облицовок на пучинистых грунтах необходимо учитывать степень морозной пучинистости подстилающих грунтов, глубины промерзания и уровни грунтовых вод согласно ГОСТ 28622-2012. Конструктивное решение противофильтрационной облицовки включает: укладку на пучинистое основание гидромата, предназначенного для отвода и (или) задержания излишних вод, устройство песчаного морозозащитного слоя и укладку водонепроницаемого элемента с последующим устройством пригрузочного слоя из габионов</p>

Продолжение таблицы 2.1

Конструктивная схема облицовки	Тип облицовки	Область и условие применения
	<p>Комбинированная облицовка с защитным покрытием из георешетки, заполненной камнем</p>	<p>Конструкция с защитным покрытием из георешетки, заполненной каменным материалом, рекомендуется к применению на оросительных каналах трапецидального сечения (по ГОСТ 58331.1-2018), выполненных с крутыми откосами (коэффициент заложения менее 1:1,5). Размер каменного заполнителя принимается с учетом геометрических параметров ячейки георешетки, уклонов и скоростей течения.</p>
	<p>Конструкция геосинтетического экрана с защитным покрытием из бетона (железобетона)</p>	<p>При устройстве противофильтрационных облицовок на каналах с прямоугольной формой живого сечения рекомендуется устройство защитного покрытия из бетона и (или) железобетона толщиной не менее 0,1 м. Для исключения повреждаемости полимерного элемента используется геотекстиль</p>
	<p>Конструктивно-техническое решение противофильтрационного экрана, выполняемого на просадочных грунтах. Цифрами обозначено: 1 – каменная наброска; 2 – слой геотекстиля; 3 – противофильтрационный элемент; 4 – грунт; 5 – естественное основание</p>	<p>При создании оросительных каналов на просадочных основаниях (с максимальной величиной просадки более 0,5 м) рекомендуется к применению конструктивно-техническое решение, заключающее в устройстве компенсаторов деформаций, выполняемых в виде складок противофильтрационного геосинтетического материала, раскрывающихся в случае просадки основания</p>
	<p>Компоновочное решение дренирования облицовки канала (по пат. № 2762413) Цифрами обозначено: 1 – бетонная облицовка; 2 – противофильтрационный элемент; 3 – дренирующий элемент; 4 – обратный клапан; 5 – гравийно-галечниковый заполнитель; 6 – прямик</p>	<p>При устройстве противофильтрационных покрытий на оросительных каналах в условиях инфильтрации (при подпоре облицовки грунтовыми водами) возможно создание дренирующе-разгрузочных устройств, предназначенных для снижения гидростатического давления, действующего на противофильтрационный элемент, и свободного выпуска грунтовых вод непосредственно в оросительный канал</p>

Разработанные конструктивно-технические решения с применением геосинтетических материалов на основе бентонита могут применяться в сложных инженерных условиях производства работ, где традиционные противofильтрационные покрытия (из бетона, геомембран и др.) могут быть не применимы. Например, геомембранные экраны могут истираться наносами и повреждаться механизмами в процессе обслуживания каналов, а закрытого типа – от устройства пригрузочных слоев (например, из каменного покрытия или бетонных плит). В разработанных конструкциях комбинированных экранов за счет устройства дублирующих противofильтрационных слоев и защитно-пригрузочных элементов потери воды на фильтрацию будут минимальными.

В таблице 2.2 приведены сравнительные характеристики разработанных комбинированных конструкций противofильтрационных покрытий каналов с применением геосинтетиков на основе бентонита с грунтопленочными, бетонными (железобетонными), бетонопленочными и полимерными облицовками.

Таблица 2.2 – Сравнительные характеристики вариантов конструкций противofильтрационных покрытий каналов

Конструкция облицовки	Коэффициент фильтрации, см/с	Срок службы, лет	Вероятность безотказной работы конструкции*
Грунтопленочная	$0,21 \cdot 10^{-9}$	12–15	0,93
Бетонная (железобетонная)	$1,0 \cdot 10^{-6}$	20–25	0,95
Бетонопленочная	$1,0 \cdot 10^{-8}$	25–30	0,96
Конструкции из полимерных геомембран	$1,0 \cdot 10^{-9}$	40–45	0,97
Конструкции из геосинтетиков на основе бентонита	$1,0 \cdot 10^{-10}$	50–65	0,98

Примечание – *показатель безотказной работы конструкции облицовки принимается по расчетным данным автора.

Представленные в таблице 2.2 показатели (по коэффициентам фильтрации, сроку службы и надежности вариантов покрытий каналов) получены по результатам расчета, основанного на накопленных автором и другими исследователями [82, 92] среднестатистических значениях, а также натурных обследованиях технического состояния различных типов облицовок оросительных каналов.

Рекомендации по применению разработанных противofильтрационных конструкций на оросительных каналах приведены в приложении В.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Предложенный новый подход к созданию противofильтрационных покрытий на каналах гидромелиоративных систем из геосинтетических бентонитовых материалов основан на использовании новых и усовершенствованных конструктивно-технических решений, обладающих повышенной надежностью и долговечностью (с расчетным прогнозным сроком службы, составляющим 50–65 лет), водонепроницаемостью с суммарным коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-10}$ см/с и самозалечиванием дефектов при повреждаемости.

2. Применяемые ранее в отечественной практике конструкции и технические решения противofильтрационных устройств из пленочных материалов на каналах характеризуются значительной повреждаемостью, которая, как правило, образуется при устройстве защитных и пригрузочных слоев из грунтовых и бетонных покрытий, а также при эксплуатации и техническом обслуживании каналов (удалении наносов, растительности). Многослойные конструкции противofильтрационных покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов для оросительных каналов ранее разрабатывались ограниченно. Конструкции противofильтрационных устройств, разрабатываемые за рубежом, в основном предназначались для накопителей различного назначения и водоемов, и в конструктивном исполнении малоприменимы для каналов, в связи с необходимостью устройства пригрузочных и защитных слоев, исключающих их размывы и оползание. Более обширные исследования конструкций в отечественной и зарубежной практике проведены для плотин, где применение нашли натяжные геомембраны и другие геосинтетические и композитные материалы.

3. Разработанные новые конструкции противofильтрационных покрытий отличаются повышенной прочностью, герметичностью и возможностью самозалечивания дефектов и повреждений при эксплуатации. Практическая новизна большинства предлагаемых конструктивных решений подтверждена патентами на изобретения, а двух конструкций – опытной апробацией в натуральных условиях на участке оросительного канала.

4. С целью применения геосинтетических материалов в конструкциях противофильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых в сложных инженерных условиях (при инфильтрации воды, наличии суффозионных, карстовых и других явлений), автором разработаны новые конструктивно-технологические решения дренажно-фильтрующих устройств, обеспечивающих безопасный отвод избыточных вод в канал через противофильтрационные облицовки и защитные покрытия.

5. Для контроля сплошности эксплуатируемых противофильтрационных покрытий, выполняемых из полимерных материалов на каналах гидромелиоративных систем, могут применяться разработанные технические решения в виде способа контроля целостности полимерного противофильтрационного экрана (патент № 2621540), основанного на методе электрических сопротивлений и способа определения фильтрационных потерь с помощью изолированного отсека (патент № 2616081), устраиваемого без остановки и опорожнения канала.

6. На основании обобщения опыта создания противофильтрационных покрытий на оросительных каналах были разработаны конструкции облицовок с использованием геосинтетических материалов для различных условий применения. Разработанные варианты конструкций (при соответствующем технико-экономическом обосновании) могут использоваться при проектировании сооружений, выполняемых на пучинистых и просадочных грунтах (с максимальной величиной просадки основания до 0,5 м), в условиях подпора грунтовых вод и инфильтрации воды в канал. Некоторые из разработанных конструкций с использованием геосинтетических бентонитовых материалов были приняты в качестве типовых и нашли применение при реконструкции участков облицовки Донского магистрального оросительного канала.

Глава 3. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ ИЗ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Общие вопросы и описание методов теории фильтрации

3.1.1 Развитие исследований в области фильтрации из оросительных каналов

Необходимо отметить, что отечественная фильтрационная школа получила масштабное развитие еще в СССР в связи с большими объемами проектирования и строительства гидротехнических сооружений различного назначения, в том числе и «ирригационных каналов». Была создана мощная теоретическая и прикладная база, позволяющая: рассчитывать и прогнозировать фильтрационные явления на гидроузлах (научная школа «МИСИ» имени В. В. Куйбышева, ныне «НИУ МГСУ»), оценивать потери воды из оросительных систем (Новочеркасская научная школа «ЮЖНИИГиМ» (ныне «РосНИИПМ») и «НГМА имени А. К. Кортунова» (ныне «НИМИ»)), моделировать фильтрацию из накопителей различного назначения (Ленинградская школа «Научно-мелиорационного института» (позднее «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)), решать задачи в области фильтрации гидротехнических сооружений, движения подземных вод, проводить экспериментальные и многие другие исследования на базе образовательных («Институт природообустройства имени А. Н. Костякова»; «Санкт-Петербургский политехнический университет» и др.), научно-исследовательских (НИИ «ВОДГЕО»; «ВНИИ-ГиМ имени А. К. Костякова, «САНИИРИ» и др.) и проектно-изыскательских институтов («Союзгипроводхоз», «Союзводпроект», «Гидропроект» и др.).

Еще в 1925 г. профессором Г. К. Ризенкампом были рассмотрены вопросы фильтрации воды через смоченную поверхность «ирригационных каналов», гидравлические расчеты магистральных, распределительных, оросителей и других типов каналов. Своими исследованиями, частично отраженными в его фундаментальной работе «Основы ирригации» (1925 г.), он внес значительный вклад в создание и развитие оросительных каналов, мелиоративных систем и гидротехнических сооружений различного назначения.

Автором диссертационной работы сделана попытка кратко обобщить исследования отечественных ученых, направленных на развитие теории фильтрации в области оросительных каналов и гидромелиоративных систем, а также выявить основные достижения и некоторые недостатки, полученные различными авторами за более чем 80 летний период становления фильтрационной школы применительно к каналам мелиоративного назначения.

Обобщенная блок-схема отечественных ученых, занимающихся вопросами фильтрации на мелиоративных системах (и оросительных каналах различного назначения), приведена на рисунке 3.1.

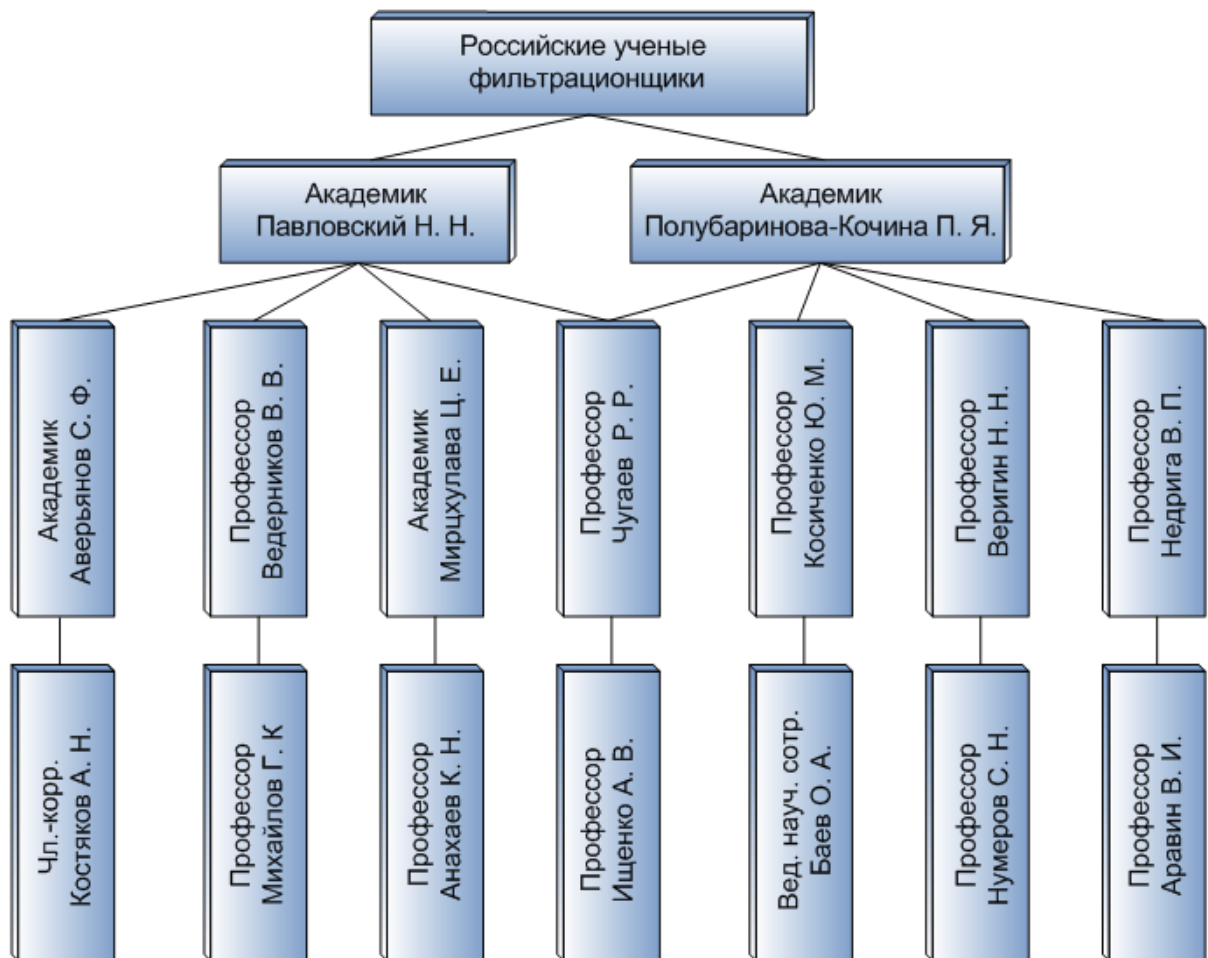


Рисунок 3.1 – Отечественные ученые, внесшие вклад в развитие теории фильтрации на оросительных системах

В данной схеме представлены ученые, которые, по мнению автора, внесли наибольший вклад в развитие теории фильтрации и водопроницаемости оросительных каналов, а также предложили ряд мероприятий и конструктивных реше-

ний, обеспечивающих снижение потерь воды на фильтрацию и уменьшение негативного воздействия вод на прилегающие (приканальные) территории.

Академик Н. Н. Павловский являлся одним из создателей советской гидротехники, который своей неутомимой деятельностью и творческой работой способствовал ее дальнейшему росту, когда гидротехническое строительство стало на одно из первых мест в мире. Н. Н. Павловский был создателем и основоположником гидромеханической теории напорной фильтрации [152]. Поставив задачу математической физики, он в своих научных работах представил точное решение основных случаев движения грунтовых вод и на базе своей теории использовал предложенный им экспериментальный метод электрогидродинамических аналогов (ЭГДА), который в последующем нашел широкое применение.

Академик П. Я. Полубаринова-Кочина в своей работе [173] проводит конформное отображение многоугольника на полуплоскость с помощью формулы Кристоффеля–Шварца. Она реализует доказательство подынтегрального выражения формулы, если переменная ζ перейдет к переменной ζ_1 с помощью формулы дробно-линейного преобразования с действительными коэффициентами. Ею внесены существенный вклад в развитие теории фильтрации в точной гидродинамической постановке, слоистых грунтах и многое др.

Учитывая, что Н. Н. Павловский и П. Я. Полубаринова-Кочина используют теоретические способы [152, 173], которые дают точные решения фильтрационных задач, эти решения считаются наиболее рациональными. Что касается использования экспериментального метода ЭГДА, то нужно учитывать, насколько данный метод применим к тем или иным задачам, и будет ли он отвечать всем требованиям к измерительной технике (приборам).

Академик С. Ф. Аверьянов рассматривал фильтрацию из оросительного канала при стоке конечной глубины залегания водоупора [8], где решение такой задачи получено методом конформного отображения с использованием формулы Кристоффеля–Шварца. Им детально рассмотрен действительный режим грунтовых вод при подпертой фильтрации из системы каналов и испарение с поверхно-

сти, а также режим грунтовых вод при свободной фильтрации из каналов оросительных систем.

Профессор В. В. Ведерников рассмотрел различные методы решения задач фильтрации из каналов без подпора, а также трапецеидальные русла каналов с подпором [49]. Кроме того, автором получены решения задач по расчету систематического дренажа, а также дренажа при конечной глубине водопроницаемого слоя.

В некоторых литературных источниках [111, 285] отмечается, что полученные ранее В. В. Ведерниковым решения задач фильтрации и систематического дренажа имеют определенные недостатки, которые могут повлиять на погрешность расчетов.

Академиком Ц. Е. Мирцхулава детально представлены вопросы надежности и прочности гидромелиоративных сооружений, особенно на каналах и других объектах. Им приведена количественная оценка надежности комплекса крупного оросительного канала, а также потока его отказов, допускаемые (неразмывающие) скорости течения с позиции теории надежности и многие другие вопросы, изложенные в его фундаментальных работах [141, 142].

Членом-корреспондентом ВАСХНИЛ А. Н. Костяковым выполнены научные исследования, направленные на создание и регулирование водного режима при орошении из открытых каналов, регулирующей сети, рассмотрены основные способы орошения. В одной из фундаментальных работ «Основы мелиорации» (1960 г.) А. Н. Костяковым приводится ряд мероприятий, направленных на уменьшение фильтрационных свойств грунтов на оросительных каналах, типы «анти-фильтрационных одежд» каналов, их преимущества и недостатки.

Профессор Н. Н. Веригин [51] представил методы прогноза гидрохимического (солевого) режима почвогрунтов и грунтовых вод, основанные на принципах геохимической гидродинамики и результатах ее применения в области орошения и осушения земель. Рассмотрена конвективная диффузия и массообмен при фильтрации воды в почвогрунтах и методах прогноза этих процессов. Наряду с этим, приведен солевой режим подземных вод вблизи водоемов, принимающих в себя коллекторно-дренажные воды и промышленные стоки.

Профессор С. Н. Нумеров [23, 24] получил обширные результаты исследований в области теории фильтрации гидромеханическим методом, теории функций комплексного переменного. Он также рассматривал земляные плотины трапецеидальной формы на непроницаемом основании при наличии дренажа. По вычислениям С. Н. Нумерова построены графики зависимостей f_1 , f_2 , f_3 и α .

Профессор Р. Р. Чугаев представил потери напора при установившемся движении жидкости и определении гидравлических сопротивлений по длине потока и местных потерь [228], привел решение равномерного движения воды в каналах трапецеидального сечения, на водосливах с широким порогом. Им изложены новые способы расчета прямых водосливов со стенкой практического профиля.

Профессор В. П. Недрига [144] получил теоретические решения фильтрационных и гидравлических расчетов в каналах, разработал и запатентовал ряд конструктивных решений (устройства для моделирования фильтрационных задач, противофильтрационное устройство и др.), некоторые из которых в последующем нашли практическое применение. В своих работах уделял значительное внимание методам фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений.

Профессор Г. К. Михайлов рассматривал методы теории функций комплексного переменного при движении грунтовых вод, направленные на решение следующих задач: напорное движение грунтовых вод под гидротехническими сооружениями, движение грунтовых вод через дренированную земляную плотину, неравномерное движение грунтовых вод, метод фрагментов, метод последовательного отображения шпунтов.

Профессор В. И. Аравин [24] проводил исследования плановой неустановившейся фильтрации, изучал анизотропную фильтрацию, неравномерную фильтрацию в призматическом пласте прямоугольного сечения с прямым уклоном поверхности водоупора, фильтрацию в призматическом прямоугольном грунтовом русле при наличии инфильтрации с поверхности земли, неравномерную фильтрацию в призматических грунтовых руслах любой формы, неустановившуюся фильтрацию в прямоугольном массиве ограниченной длины.

Профессором Ю. М. Косиченко выполнены исследования по решению ряда задач фильтрации из оросительных каналов [110, 128], в частности: через щели пленочного экрана с использованием интеграла Кристоффеля–Шварца, расчет фильтрации через пленочное отверстие с использованием p -аналитических функций комплексного переменного. Кроме того, получена приближенная оценка пространственной фильтрации через короткую щель пленочного экрана, напорно-безнапорной фильтрации при наличии дренирующего слоя, а также учета неполного насыщения грунта основания через щели.

Профессор К. Н. Анахаев получил решения задач фильтрации методом Жуковского, годографа скорости, интеграла Кристоффеля–Шварца и ряда других. Им решены задачи фильтрации с неопределенными граничными условиями. Он приводит развитие теории гидромеханического метода расчета свободной фильтрации из водотоков криволинейного профиля [17], а также точное решение задачи напорно-безнапорной фильтрации. Наряду с этим, К. Н. Анахаев получил решение задачи свободной фильтрации из водотоков обратным методом [19].

Необходимо отметить, что полученные В. И. Аравиным, Ю. М. Косиченко и К. Н. Анахаевым решения дают близкие значения к точным способам, поскольку они использовали развитие методов гидромеханического подхода, а также p -аналитические функции комплексного переменного и анизотропной фильтрации.

Профессор А. В. Ищенко в своих работах рассматривал обоснование рациональных конструкций противofильтрационных устройств ГТС и облицовок оросительных каналов. Им разработаны (более 60) и теоретически обоснованы конструктивно-технические решения противofильтрационных завес и облицовок [89], устраиваемых на накопителях промышленных отходов, каналах и водоемах, представлена гидравлическая модель фильтрации через бетонную облицовку канала при наличии трещин и деформационных швов [92].

Ранее выполненные автором диссертации и другими исследователями расчеты по зависимостям Нумерова С. Н. и Ищенко А. В. (применительно к услови-

ям фильтрации из оросительных каналов) свидетельствуют о возможных погрешностях в представленных ими решениях.

Ведущим научным сотрудником О. А. Баевым получено теоретическое решение задач фильтрации через малые повреждения противофильтрационных покрытий оросительных каналов [27, 29], выполняемых из геосинтетических материалов (геомембран) методом конформных отображений. Разработана методика расчета и фильтрационная модель водопроницаемости и самозалечивания противофильтрационных экранов оросительных каналов, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов [112]. Разработана обобщенная методика выбора оптимального варианта конструкции противофильтрационной облицовки при строительстве и реконструкции оросительных каналов.

Более детальный обзор исследований (отечественных и зарубежных ученых) в области теории фильтрации и разработки конструктивных решений для защиты от негативного воздействия вод представлен в главе 1.

3.1.2 Описание методов решения задач фильтрации

Существующие методы расчета задач фильтрации (в том числе через повреждения противофильтрационных экранов) можно разделить на следующие:

- экспериментальные, основанные на данных лабораторных исследований;
- теоретические, основанные на строгих аналитических решениях (например, методами теории функций комплексных переменных и др.);
- экспериментально-теоретические, основанные на использовании универсального закона фильтрации;
- численные, заключающиеся в приближенном решении задач фильтрации с использованием, как правило, ЭВМ.

Рассмотрим более подробно вышеприведенные методы исследования [111].

Экспериментальные методы основываются на данных экспериментальных исследований на аналоговых установках (метод электрогидродинамических – ЭГДА) или физических моделях (фильтрационных лотках, колонках и др.).

Так, В. П. Недригой по результатам исследований с помощью метода ЭГДА получены нижеследующие эмпирические формулы для определения коэффициента эффективности противотриационного экрана из полимерной пленки при наличии в нем круглых отверстий:

- при диаметре повреждений $d \leq 3$ см:

$$\eta = 0,008 \cdot d/\omega, \quad (3.1)$$

- при диаметре повреждений $d \geq 3$ см:

$$\eta = d/\omega [0,0107(d - 3) + 0,024], \quad (3.2)$$

где ω – площадь противотриационного покрытия, м².

Теоретические методы основываются на строгих аналитических решениях, например, с использованием предложенного Н. Н. Павловским [152] метода конформных отображений, который позволил найти наиболее точные зависимости для расчета экранов при наличии повреждений в виде непрерывных прямолинейных щелей с защитным покрытием и без него. При решении задачи рассматривались два фрагмента области фильтрации – с защитным покрытием, решение производится с использованием интеграла Кристоффеля–Шварца [152].

Для одиночной щели экрана с защитным покрытием [148]:

$$q_{щ} = \frac{k_1 \pi (h_0 + \delta_0)}{\operatorname{arch}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_0}{L} / \sin \frac{\pi m}{2L}\right)}. \quad (3.3)$$

Данная зависимость близко соответствует формуле, полученной позднее В. П. Недригой [145].

Для случая поверхностного экрана на основании с большой глубиной заложения дренирующего слоя ($T > L$) расчетные формулы получены Н. Н. Павловским в нижеследующем виде [152]:

$$q_{щ} = \frac{k_2 \pi (h_0 + T)}{\ln\left(\exp \frac{\pi T}{L} / \sin \frac{\pi T}{2L}\right)}; \quad (3.4)$$

$$q_{щ} = \frac{k_2 \pi (h_0 + T)}{\operatorname{arch}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi T}{L} / \sin \frac{\pi T}{2L}\right)}. \quad (3.5)$$

Полученные [152] формулы (3.4) и (3.5) близко соответствуют зависимостям В. В. Ведерникова [49], найденным им еще в 1939 г.

Рассмотрим наиболее известные зависимости для расчета пленочных экранов каналов с повреждением в виде плоской щели и при наличии защитного слоя.

Зависимость В. П. Недриги (1976 г.) [145]:

$$q_{\text{щ}} = \frac{2\pi k H}{\text{Arch} \frac{2ch(2\pi\delta_0/l)}{1 - \cos(\pi m/l)}}, \quad (3.6)$$

где H – напор в противofильтрационном экране, м; $q_{\text{щ}}$ – удельный фильтрационный расход через непрерывную щель, м²/сут; k – коэффициент фильтрации защитного слоя, м/сут; h_0 – глубина воды в канале, м; δ_0 – толщина защитного покрытия, м; m – ширина щели, м; l – расстояние между щелями, м.

Зависимость Ю. М. Косиченко (1980) [125]:

$$q_{\text{щ}} = kH \frac{2K(\lambda)}{K(\lambda')}, \quad (3.7)$$

где $K(\lambda), K(\lambda')$ – полные эллиптические интегралы 1-го рода при модуле λ и λ' .

Далее приведем расчетные зависимости, используемые для расчета водопроницаемости противofильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых из геосинтетических материалов (геомембран) при наличии дефектов [286]:

1. Формула Ю. М. Косиченко, О. А. Баева (2014 г.) [131]:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \quad (3.8)$$

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

2. Формула А. В. Ищенко (2010 г.) [92]:

$$q_0 = \frac{\pi^2 k_1 (h_1 + H_k) r_0}{\text{arsh}(1/\sqrt{\alpha_0 - 1})}, \quad (3.9)$$

где $h_x = \frac{A_0 (h_0 + \delta_0) - B_0 H_k}{A_0 + B_0}$.

3. Формула J. P. Giroud (1997 г.) [266]:

$$q_0 = 0,976 \cdot C_{q_0} [1 + 0,1 \cdot (h/t_s)^{0,95}] \cdot d^{0,2} \cdot h^{0,9} \cdot k_s^{0,74}. \quad (3.10)$$

4. Формула В. Н. Жиленкова для полимерного экрана с защитным слоем и подстилающим основанием [81]:

$$q_0 = 4r_0 \frac{k_1 H}{1 + \sigma}, \quad (3.11)$$

где $H = h_0 + \delta_0 + \delta_2$, $\sigma = k_1/k_2$.

5. Формулы N. Touze-Foltz, R. K. Rowe (1999 г., 2007 г.) [310, 311] для определения фильтрационного расхода (Q , м³/сут) и напора ($h(r)$, м):

$$Q = \pi r_0^2 \cdot k_s \cdot i_s - 2\pi r_0^2 \cdot \theta \cdot a [A_q I_e(ar_0) - B_q K_1(ar_0)], \quad (3.12)$$

$$h(r) = A_q I_0(ar_0) + B_q K_0(ar_0) - C, \quad (3.13)$$

где $A_q = \frac{(h_w + C)K_1(aR_0)}{K_1(aR_c)I_0(ar_0) + K_0(ar_0)I_1(aR_0)}$; $C = H_1 + H_2 - h_1$;

$$B_q = \frac{(h_w + C)I_1(aR_c)}{K_1(aR_0)I_0(ar_0) + K_0(ar_0)I_1(aR_0)}; \quad a = \sqrt{k_s / (H_L + H_f) \cdot \theta}.$$

В формулах приняты следующие обозначения: k_1 – коэффициент фильтрации защитного покрытия, м/сут; r_0 – радиус отверстия в геомембране, м; h_1 – пьезометрический напор в отверстии, м; k_2 – коэффициент фильтрации основания, м/сут; H_k – капиллярный вакуум, м; h_k – высота капиллярного поднятия, м; α – параметр, определяемый по табличным данным (по функции $F_1(\alpha_1)$ [107]); A_0 и B_0 – постоянные параметры интегрирования уравнений; n – количество отверстий на площади A ; C_{q_0} – коэффициент качества контакта экрана с основанием; t_s – толщина слоя грунта под экраном, м; d – диаметр круглого дефекта в геомембране, м; k_s – коэффициент фильтрации слоя грунта под экраном, м/с; i_s – уклон трения; θ – гидравлический параметр, м²/с; R_0 – радиус влияния отверстия в геомембране, м; H_L – толщина 1-го слоя, м; H_f – толщина 2-го слоя, м; K_0 , K_1 , I_0 , I_1 – модифицированные Бесселевы функции; C – напор при фильтрации через круглое отверстие, м; h_w – потери напора, м.

Более сложные задачи водопроницаемости противofильтрационных экранов связаны с формированием осесимметричного движения фильтрационного потока через круглые повреждения экрана в виде малых отверстий – проколов. Здесь решение проводится аналогично как для плоских задач с последующим преобразованием их к осесимметричному движению.

Экспериментально-теоретические методы, которые основываются на использовании универсального закона фильтрации [24]:

$$v_{\phi} = k \cdot I^{1/n_0}, \quad (3.14)$$

где v_{ϕ} – средняя скорость фильтрации, м/с; k – коэффициент фильтрации грунта основания, м/с; I – градиент фильтрации; n_0 – показатель, который может изменяться от 1,0 до 2,0.

При $n_0 = 1,0$ уравнение (3.14) приобретает известный вид закона Дарси для ламинарной фильтрации, при $n_0 = 2,0$ – для турбулентной фильтрации [15], а при $1,0 < n_0 < 2,0$ – для переходного режима фильтрации.

В работах [250, 266] получено аналитическое выражение среднего гидравлического градиента для расчета фильтрации через противofильтрационное покрытие из геосинтетических материалов (геомембран) с дефектами на основе универсального закона фильтрации (3.14) в виде:

$$I_{avg_0} = 1 + 0,1(h/t_s)^{0,95}, \quad (3.15)$$

где I_{avg_0} – средний гидравлический градиент; t_s – толщина малопроницаемого основания под геомембраной, м.

Численные методы, позволяющие путем численного решения различных уравнений (например, Лапласа) для определенных граничных условий решать двух- и трехмерные задачи фильтрации. В последнее время для таких целей используются различные программные продукты.

Рассмотрим далее в диссертационной работе гидромеханические, гидравлические и численные методы решения задач фильтрации применительно к противofильтрационным покрытиям каналов из геосинтетических материалов.

3.1.3 Допущения и предпосылки при решении задач водопроницаемости противofильтрационных покрытий

При расчетах водопроницаемости противofильтрационных экранов из геосинтетических материалов принимаем следующие допущения и предпосылки:

- расчетные формы повреждений в противofильтрационных элементах принимают в виде прямолинейных щелей в местах соединений или круглых отверстий малого диаметра (проколов);
- движение фofильтрационного потока принимаем установившимся и подчиняющимся ламинарному движению потока (закону Дарси);
- грунт основания считаем однородным с постоянным коэффициентом фofильтрации во всех направлениях;
- движение фofильтрационного потока через защитный слой грунта считают напорным, а в подэкрановом основании – напорно-безнапорным;
- толщиной геосинтетического элемента (полимерной геомембраны) в виду малости пренебрегаем;
- считаем, что ПФЭ из геомембраны вследствие гибкости плотно прилегает к грунтовому основанию под действием напора воды;
- капиллярное растекание потока учитывается высотой капиллярного вакуума грунта (H_c , м).

3.2 Фofильтрационная модель водопроницаемости облицовки канала через систему дефектов в геомембране

За рубежом большое распространение получили методы расчета водопроницаемости геомембранных противofильтрационных экранов с дефектами. Исследования J. P. Giroud, R. Bonaparte, K. Badu-Tweneboah [263, 266] основаны на экспериментально-теоретических зависимостях степенного вида с использованием эмпирических коэффициентов по данным полевых исследований, отражают качество контакта между геомембраной и грунтом основания.

Целью исследования является разработка фильтрационной модели водопрооницаемости полимерного противофильтрационного экрана нарушенной сплошности с системой щелей, и на ее основе получение новых расчетных зависимостей.

На рисунке 3.2 представлена структурная схема разработанной методологии расчета водопрооницаемости геосинтетического экрана из геомембраны нарушенной сплошности в виде системы протяженных щелей [285].

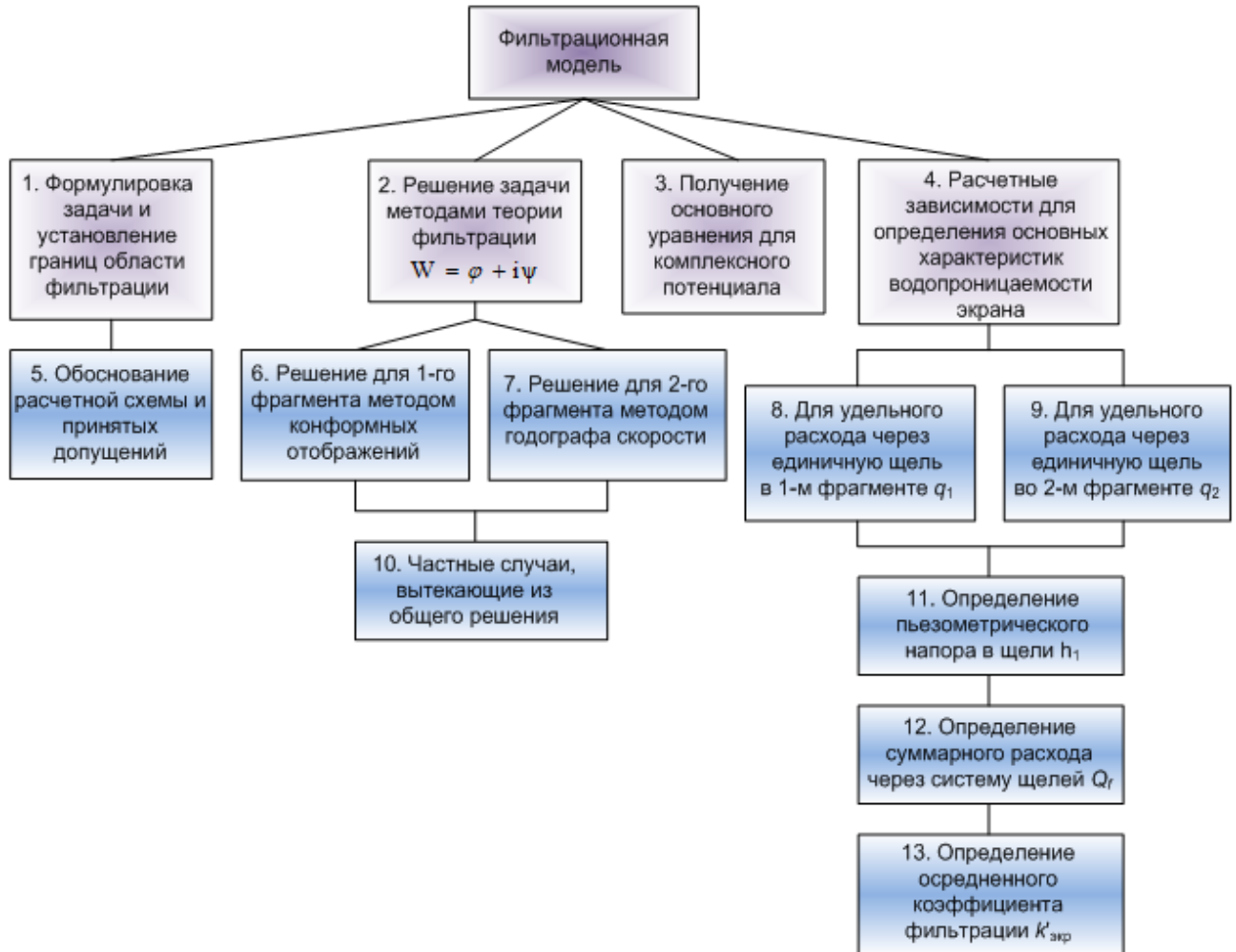


Рисунок 3.2 – Структурная схема методологии расчета водопрооницаемости противофильтрационного экрана через систему щелей в геомембране [285]

Задачи исследования:

- получить аналитическое решение водопрооницаемости противофильтрационного экрана с системой щелей методами теории фильтрации, основанными на теории функций комплексного переменного;

- найти расчетные зависимости для определения основных характеристик водопрооницаемости;

- сравнить полученные зависимости с формулами отечественных и зарубежных ученых и оценить их применимость для практических расчетов;
- с целью практического использования результатов расчетов по разработанной фильтрационной модели построить график изменения приведенного фильтрационного расхода через щель противофильтрационного покрытия, и составить таблицу значений осредненных коэффициентов фильтрации экрана в зависимости от параметров системы щелей.

Данная модель включает следующие структурные блоки: блок 1 – формулировка задачи водопроницаемости через систему щелей экрана и установление граничных условий в физической области фильтрации (блок состоит из подблока 5 по обоснованию расчетной схемы и принятых допущений); блок 2 – решение задачи методами теории фильтрации, который разделяется на подблоки 6 и 7 по решению поставленной общей задачи для первого и второго фрагментов методом конформных отображений и годографа скорости; блок 3 – получение основного уравнения для комплексного потенциала; блок 4 – расчетные зависимости для определения основных характеристик водопроницаемости щелей экрана, состоящий из подблоков 8, 9, 11–13, где определяются сначала удельные расходы через единичную щель в I-ом и II-ом фрагменте q_1 и q_2 , а затем определяются пьезометрический напор в щели h_1 , суммарный расход через систему щелей Q_f и осредненный коэффициент фильтрации $k'_{\text{экр}}$. Пьезометрический напор h_1 может рассчитываться методом итераций (последовательного приближения) или определяться непосредственно по формулам. В подблоке 10 находятся частные случаи, вытекающие из общего решения. Так, например, когда подстилающее основание сложено более проницаемыми грунтами при $k_2 > 10k_1$, то тогда его не учитывают в расчетах.

Методика исследования водопроницаемости системы щелей полимерного экрана в фильтрационной модели основывается на гидромеханическом подходе решения задачи, широко используемом в теории фильтрации [128, 234]. При этом используется метод конформных отображений и метод годографа скорости.

На рисунке 3.3 представлена расчетная модель системы щелей в полимерном экране из геомембраны [285].

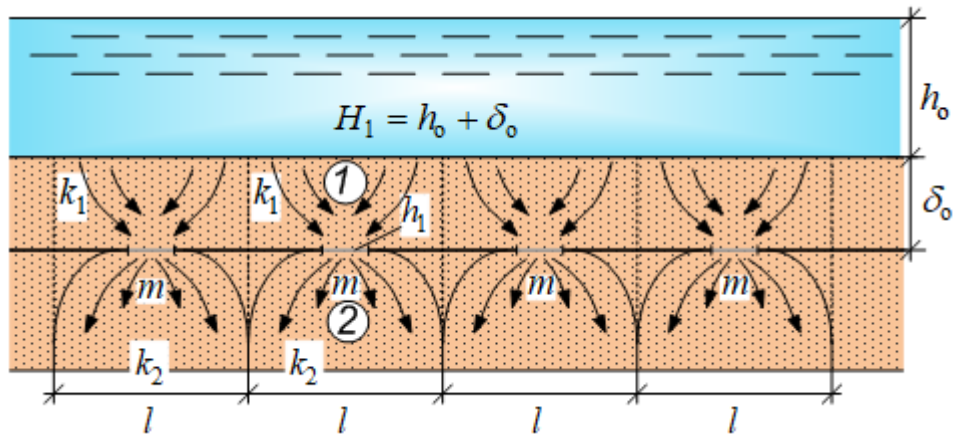


Рисунок 3.3 – Расчетная схема системы щелей экрана из геомембраны

Расчетная схема математической модели (см. рисунок 3.3) включает систему щелей малых размеров в экране, расположенных через расстояние l , защитный слой толщиной δ_0 и подстилающее основание неограниченной мощности, в которых формируются множества областей фильтрации в защитном слое – при движении фильтрационного потока из канала к каждой щели, в подстилающем основании – при движении фильтрационного потока из каждой щели в грунтовое основание на бесконечность с их взаимовлиянием.

Особенностью водопроницаемости противofильтрационного экрана в данном случае является фильтрация через каждую щель с формированием самостоятельного фильтрационного потока. Поэтому для решения такой задачи целесообразно рассматривать отдельный фрагмент области фильтрации с условным его выделением по граничной линии тока в защитном слое справа и слева (фрагмент 1), а в подстилающем основании (где движение потока будет напорно-безнапорным) с учетом взаимодействия с рядом расположенной областью по общей линии тока (фрагмент 2), движение фильтрационного потока предполагается на бесконечность [285].

На рисунке 3.4 приведена схема конформных отображений для первого фрагмента области фильтрации.

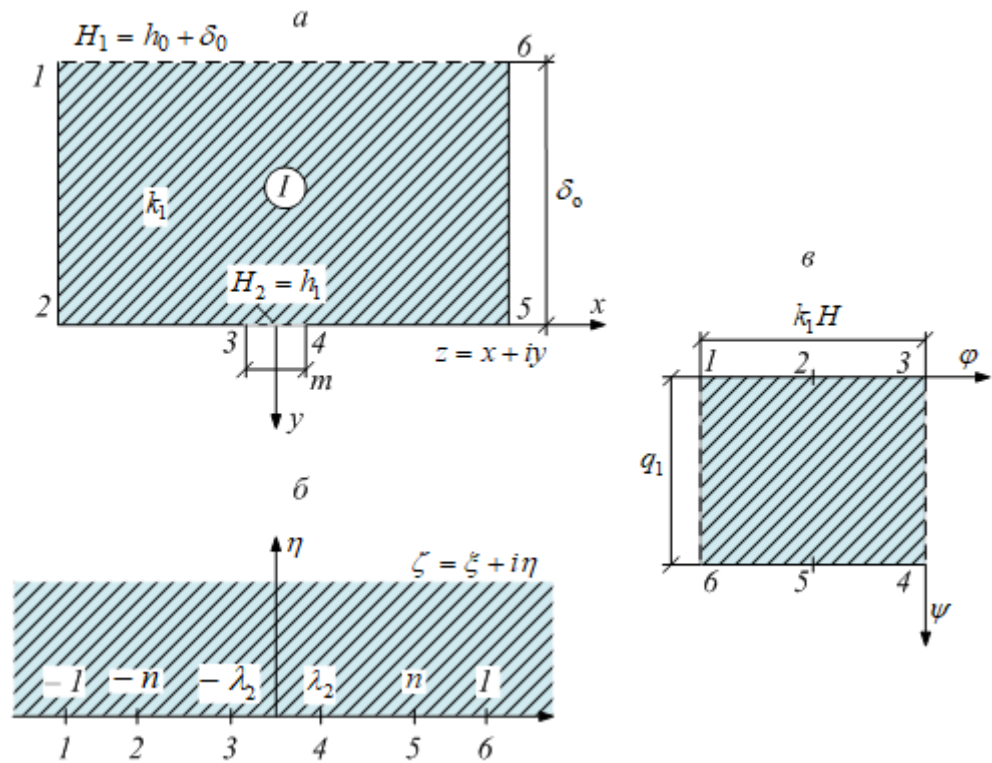


Рисунок 3.4 – Схемы конформных отображений для первого фрагмента области фильтрации [285]:

а – область фильтрации z ; б – вспомогательная полуплоскость ζ ;
в – область комплексного потенциала W

Для решения поставленной задачи в гидромеханической постановке отдельно рассмотрим 1-й фрагмент в защитном слое грунта, а затем 2-й фрагмент в подстилающем грунтовом слое, при этом устанавливаем связь между фрагментами на границе щели с помощью неизвестного параметра h_1 , представляющего пьезометрический напор в щели.

Физическая область (см. рисунок 3.4а) представляет собой прямоугольник с проницаемыми границами 1–6 и 3–4, где устанавливаются, соответственно, напоры $H = h_0 + \delta_0$ и $H_2 = h_1$. Непроницаемыми границами являются линии 1–2–3 и 6–5–4, которые являются граничными линиями тока. В пределах области фильтрации 1–2–3–4–5–6 движение потока будет чисто напорным, которое происходит под действием напора $H = H_1 - H_2 = h_0 + \delta_0 - h_1$, где h_0 – глубина воды, м; δ_0 – толщина защитного слоя, м; h_1 – пьезометрический напор в щели экрана, м.

Рассмотрим теперь решение для I-го фрагмента с помощью конформных отображений [131].

Отообразим многоугольник действительной области фильтрации на верхнюю полуплоскость с использованием интеграла Кристоффеля–Шварца:

$$\begin{aligned} z &= A \int_0^{\zeta} (\zeta^2 - 1)^{-1/2} \cdot (\zeta^2 - n^2)^{-1/2} \cdot d\zeta + B = \\ &= A \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(\zeta^2 - 1) \cdot (\zeta^2 - n^2)}} + B = A\lambda \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1 - \zeta^2) \cdot (1 - \lambda^2 \zeta^2)}} + B, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где $\lambda = \frac{1}{n} > 1$.

Полученное выражение (3.16) представляет собой эллиптический интеграл 1-го рода при модуле λ .

Так как в уравнении (3.16) $\lambda_1 > 1$, проведем замену переменных, приняв:

$$\zeta = \frac{t}{\lambda}, \quad d\zeta = \frac{1}{\lambda} dt. \quad (3.17)$$

Тогда уравнение (3.17) можно записать в нижеследующем виде:

$$z = A \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{\left(1 - \frac{t^2}{\lambda^2}\right) \cdot (1 - t^2)}} + B = AF(t, \lambda_1) + B, \quad (3.18)$$

где $\lambda_1 = \frac{1}{\lambda} < 1$ – модуль эллиптического интеграла; $F(t, \lambda_1)$ – эллиптический интеграл 1-го рода при модуле λ_1 .

Из соответствия точек 2 и 5 в уравнение (3.18) найдем постоянные A и B :

$$A = \frac{l}{2K(\lambda_1)}, \quad B = 0 \quad (3.19)$$

Из соответствия точки 1 получим следующие выражения:

$$A = \frac{\delta_0}{K'(\lambda_1)} = \frac{l}{2K(\lambda_1)}, \quad (3.20)$$

или:

$$\frac{l}{\delta_0} = \frac{K(\lambda_1)}{K'(\lambda_1)}, \quad (3.21)$$

где $K(\lambda_1)$, $K'(\lambda_1)$ – полные эллиптические интегралы 1-го рода при модуле λ_1 и дополнительном модуле $\lambda_1' \sqrt{1 - \lambda_1^2}$.

Подставляя комплексные постоянные A и B в формулу (3.18), получим:

$$z = \frac{l}{2K(\lambda_1)} F(t, \lambda_1), \quad (3.22)$$

или, заменяя $t = \lambda \zeta$:

$$z = \frac{l}{2K(\lambda_1)} F(\lambda \zeta, \lambda_1). \quad (3.23)$$

Откуда из (3.23) обратная функция выражается через эллиптический синус:

$$z = \lambda_1 \operatorname{sn} \left(\frac{mK(\lambda_1)}{l}; \lambda_1 \right). \quad (3.24)$$

Из соответствия точки 4 (при условии $z = m/2$, $\zeta = \lambda_2$) и выражения (3.24) определим параметр λ_2 :

$$\lambda_2 = \lambda_1 \operatorname{sn} \left(\frac{mK(\lambda_1)}{l}; \lambda_1 \right). \quad (3.25)$$

Отобразив полуплоскость ζ на область комплексного потенциала W (см. рисунки 3.4 б и 3.4в) находим:

$$W = C \int_0^{\zeta} (\zeta^2 - 1)^{-1/2} \cdot (\zeta^2 - \lambda_2^2)^{-1/2} d\zeta + D = \frac{C}{\lambda_2} \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1 - \zeta^2) \cdot (1 - \lambda_2^2 \zeta^2)}} + D. \quad (3.26)$$

Выполнив промежуточные расчеты и преобразования, были найдены постоянные интеграла Кристоффеля–Шварца, а также приближенная формула [285] для определения расхода через щель экрана из геомембраны:

$$q_1 = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln[4 \operatorname{cth}(\pi m / 4 \delta_0)]}. \quad (3.27)$$

Данная формула (3.27) применима при условии $m/l \leq 0,01$, а при $m/\delta_0 \leq 0,25$ упрощается и выражается через элементарные логарифмические функции аналогично формуле Ю. М. Косиченко для экрана из пленки [133]:

$$q_1 = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(16 \delta_0 / \pi m)}. \quad (3.28)$$

В предельном случае, когда $m = l$, из уравнений (3.21) и (3.25) будем иметь:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \lim_{m \rightarrow l} \operatorname{sn} \left\{ \frac{mK(\lambda_1)}{l}, \lambda_1 \right\} = \lambda_1 \operatorname{sn} \{ K(\lambda_1), \lambda_1 \} = \lambda_1. \quad (3.29)$$

Удельный расход фильтрации через защитный слой грунта (без экрана) можно записать в следующем виде:

$$q_1 = 2K_1 H \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_1')} \quad (3.30)$$

Отсюда, согласно соотношению (3.21), найдем $q_1 = k_1 l \frac{H}{\delta_o}$, что полностью соответствует формуле Дарси [111], если учесть за площадь живого сечения l , а за градиент напора $I = H/\delta_o$ [146]. Таким образом, можно считать, что формула удельного расхода фильтрации через щель экрана дает правильные результаты, а, следовательно, имеет физически верную структуру, которая в предельном случае подтверждается классическим законом Дарси, основополагающим для фильтрационных задач.

Тогда формула фильтрационного расхода через щель экрана примет вид:

$$q_1 = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_o - h_1)}{\ln \left(\exp \frac{\pi \delta_o}{l} / \sin \frac{\pi m}{2l} \right)} \quad (3.31)$$

Используя обратные представления экспоненциальной и логарифмической функций при больших значениях аргументов [131, 233], зависимость (3.32) может быть записана в следующем виде:

$$q_1 = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_o - h_1)}{\text{Arsh} \left(\text{ch} \frac{\pi \delta_o}{l} / \sin \frac{\pi m}{2l} \right)} \quad (3.32)$$

Основной показатель водопроницаемости экрана – осредненный коэффициент фильтрации с защитным слоем может определяться по формуле [111]:

$$k'_{\text{экp}} = \frac{Q_f \cdot \delta_o}{(h_0 + \delta_o) \cdot F_o} \quad (3.33)$$

где $Q_f = \sum_{i=1}^n (q_1 \cdot \bar{l}_{и})$ – суммарный расход ($\text{м}^3/\text{сут}$) через герметичный экран с системой щелей на площади F_o .

Подставляя выражение (3.30) в (3.33), получим наиболее общую и точную зависимость для определения осредненного коэффициента фильтрации экрана с системой щелей [285]:

$$k'_{\text{экp}} = \frac{2k_1 \cdot \delta_o \cdot K(\lambda_2) \cdot \bar{l}_{\text{щ}} \cdot n}{F_o \cdot K(\lambda'_2)}, \quad (3.34)$$

где k_1 – коэффициент фильтрации защитного слоя экрана, м/сут;

$\bar{l}_{\text{щ}}$ – среднестатистическая длина щели экрана, м;

F_o – площадь экрана, м².

Из зависимости (3.34) и с учетом приближенной формулы (3.28), найдем осредненный коэффициент фильтрации экрана с системой щелей без учета подстилающего основания:

$$k'_{\text{экp}} = \pi k_1 \frac{\delta_o \cdot \bar{l}_{\text{щ}} \cdot n}{F_o \cdot \ln(1.6\delta_o/\pi m)}. \quad (3.35)$$

Зависимость (3.35) для определения показателя водопроницаемости экрана $k'_{\text{экp}}$ является упрощенной и приближенной, которой можно пользоваться при условии $m/\delta_o \leq 0,25$.

Осредненный коэффициент фильтрации экрана с учетом влияния проницаемости подстилающего основания найдем из (3.35) в следующем виде:

$$k'_{\text{экp}} = \frac{\pi k_1 \delta_o (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot l_{\text{щ}} \cdot n}{F_o \operatorname{Arsh}\left(\operatorname{ch} \frac{\pi \delta_o}{l} / \sin \frac{\pi m}{2l} \cdot (h_0 + \delta_o)\right)}. \quad (3.36)$$

Далее производится решение для второго фрагмента в подстилающем экране грунтовым основании, где наблюдается напорно-безнапорная фильтрация и при близком расположении щелей происходит их взаимное влияние.

Таким образом, получены решения задач водопроницаемости через систему щелей для одного из фрагментов области фильтрации, включающих задачу водопроницаемости через щель экрана с защитным слоем грунта и задачу водопроницаемости через щель экрана с подстилающим грунтовым основанием.

Формула для определения фильтрационного расхода для 2-го фрагмента была получена в следующем виде [133, 285]:

$$q_2 = \frac{2\pi k_2 (h_1 + H_c)}{\text{Arch} \left[\frac{\alpha + \beta(2 - \alpha)}{\alpha(1 + \beta)} \right]}, \quad (3.37)$$

Для определения пьезометрического напора в щели экрана из геомембраны из условия неразрывности потока приравниваем расходы через 1-й и 2-й фрагменты $q_1 = q_2$ по приближенным формулам (3.27) и (3.37), откуда получим:

$$h_1 = \frac{\sigma(h_0 + \delta_o) \text{Arch} \left[\frac{\alpha + \beta(2 - \alpha)}{\alpha(1 + \beta)} \right] - 2H_c \cdot \ln[4\text{cth}(\pi m / 4\delta_o)]}{\sigma \text{Arch} \left[\frac{\alpha + \beta(2 - \alpha)}{\alpha(1 + \beta)} \right] + 2 \ln[4\text{cth}(\pi m / 4\delta_o)]}, \quad (3.38)$$

где $\sigma = k_1/k_2$, α и β – параметры, определяемые из системы уравнений при промежуточных расчетах.

Для расчета пьезометрического напора в щели полимерного экрана с защитным слоем грунта h_1 может также использоваться зависимость, подобная полученной ранее в работах Ю. М. Косиченко [82, 133].

На основании вышеизложенных теоретических выводов для практического применения могут быть использованы следующие упрощенные формулы для определения суммарного расхода через полимерный экран с системой щелей [285]:

- с использованием зависимости (3.27):

$$Q_f = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot \bar{l}_{щ} \cdot n}{\ln(4\text{cth}(\pi m / 4\delta_o))}; \quad (3.39)$$

- с использованием зависимости (3.28):

$$Q_f = \frac{\pi k_1 (h_0 + \delta_o - h_1) \cdot \bar{l}_{щ} \cdot n}{\ln(16\delta_o / \pi m)}; \quad (3.40)$$

- с использованием зависимости [282]:

$$Q_f = k'_{\text{экр}} \frac{h_0 + \delta_o - h_1}{\delta_o} \cdot F_o, \quad (3.41)$$

где $k'_{\text{экр}}$ – осредненный коэффициент фильтрации, рассчитываемый по формулам (3.34) или (3.35), м/сут.

Для сопоставления результатов были выполнены расчеты водопроницаемости экрана нарушенной сплошности с системой щелей по формулам В. П. Недриги и В. В. Ведерникова, также полученным в первом случае для системы щелей в пленочном экране, а во втором случае – для системы дрен на водоупоре, а также J. P. Giroud – для геомембран с дефектами в виде протяженных щелей [285, 309].

При расчете используем решения для общего случая, когда учитывается влияние подстилающего основания с напором в щели h_1 при $k_2 < k_1$, и для частного случая без учета влияния основания при $h_1 = 0$ и $k_2 \leq 10k_1$.

Исходные данные: $h_0 = 3,0$ м; $\delta_0 = 0,5$ м; $k_1 = 1,0$ м/сут; $k_2 = 0,3$ м/сут; $l = 3,0$ м; $H_c = 0,5 \cdot h_0 = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5$ м; $m = 0,001 - 0,1$ м; $\bar{l}_{щ} = 1,0$ м; $n = 10$; $h_1 = 0$; $C_{q_0} = 0,21$; $C_{q_{\infty}} = 0,52$ (где C_{q_0} и $C_{q_{\infty}}$ – коэффициенты качества контакта между геомембраной и грунтом основания при хорошем контакте по J. P. Giroud) [309].

Как показано ниже, при сопоставлении результатов расчета по формулам в таблице 3.1 было установлено, что по зависимостям J. P. Giroud расходы фильтрации через дефекты в геомембране получаются значительно завышенными.

Таблица 3.1 – Сравнение результатов расчета суммарного расхода фильтрации через систему щелей экрана по известным формулам [285]

$m, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	Сравнение по формулам авторов							
		Ю. М. Косиченко (3.83) [125], О. А. Баева (3.84) [131]	В. П. Недриги [145]			В. В. Ведерникова [49]		J. P. Giroud [266]	
			$Q_f, \text{ м}^3/\text{сут}$	$Q_f, \text{ м}^3/\text{сут}$	$\varepsilon, \%$	$Q_f, \text{ м}^3/\text{сут}$	$\varepsilon, \%$	$Q_{f \min}, \text{ м}^3/\text{сут}$	$\varepsilon, \%$
0,001	2,21	$\frac{5,17}{14,02}$	$\frac{4,53}{12,28}$	-12,4	$\frac{5,87}{15,90}$	13,4	8,66	67,5	
		$\frac{6,35}{17,64}$	$\frac{5,89}{17,01}$		$\frac{7,02}{19,85}$				
0,005	2,24	$\frac{6,92}{19,84}$	$\frac{6,57}{18,84}$	-5,0	$\frac{7,59}{21,83}$	10,0	14,13	106,9	
		$\frac{9,19}{27,96}$	$\frac{8,54}{27,03}$		$\frac{11,35}{36,12}$				
0,01	2,28	$\frac{10,37}{33,92}$	$\frac{9,53}{31,13}$	-7,1	$\frac{13,24}{43,26}$	23,5	20,00	117,6	
		$\frac{9,19}{27,96}$	$\frac{8,54}{27,03}$		$\frac{11,35}{36,12}$				
0,05	2,35	$\frac{10,37}{33,92}$	$\frac{9,53}{31,13}$	-8,0	$\frac{13,24}{43,26}$	27,5	23,73	128,8	
		$\frac{10,37}{33,92}$	$\frac{9,53}{31,13}$		$\frac{13,24}{43,26}$				

Примечание – в числителе приведены значения суммарных расходов фильтрации через систему щелей с учетом напора в щели h_1 , а в знаменателе – без учета h_1 ($h_1 = 0$).

Суммарный расход фильтрации через систему щелей рассчитываем по зависимостям (3.39) и (3.40). Анализ результатов расчета показывает, что в случае учета проницаемости подстилающего основания суммарный расход фильтрации по формулам (3.93, 3.94) снижается в 2,7–3,3 раза. Сопоставление полученных значений расхода Q_f по формулам Ю. М. Косиченко и О. А. Баева с В. П. Недригой дает расхождение от 5,0 до 12,4 %, а с В. В. Ведерниковым – от 10,0 до 27,5 %, что можно считать удовлетворительным совпадением. Однако, при сравнении результатов с формулой J. P. Giroud расхождение с минимальным значением расхода при коэффициенте $C_{q_0} = 0,21$, $Q_{f_{\min}}$ достигает от 67,5 до 128,8 % во всем диапазоне возможных дефектов (щелей) на практике в пределах $m = 0,001–0,1$ м. В то же время при максимальном значении коэффициента $C_{q_0} = 0,15$ расход уже будет возрастать в 5 раз. Такие завышенные значения расходов, по J. P. Giroud, объясняются тем, что его формула принципиально отличается от других авторов структурой, которую можно считать экспериментально-теоретической, учитывающей эмпирические коэффициенты C_{q_0} и $C_{q_{oc}}$, по данным полевых исследований и различные степени при основных расчетных параметрах m , h_1 , k_2 . В связи с этим его зависимость не подчиняется закону Дарси, который является основополагающим в задачах фильтрации. Кроме того, различные степени при основных переменных свидетельствуют о нарушении принципа соблюдения размерности.

В отличие от этого, в трех зависимостях авторов В. П. Недриги и В. В. Ведерникова, дающих близкие значения расходов, которые основываются на строгой теории фильтрации с использованием закона Дарси, результаты не вызывают сомнений и подтверждают друг друга.

Тем не менее, считаем, что предполагаемые расчетные зависимости J. P. Giroud также имеют свою ценность и могут применяться, поскольку они основаны на большом количестве полевых и натурных экспериментов и уже прошли широкую проверку на зарубежных объектах. По-видимому, эти формулы требуют уточнения для условий Российской Федерации по данным полевых исследований.

Для практического использования построен график зависимости приведенного фильтрационного расхода через щель экрана из геомембраны в зависимости от ширины щели и от толщины защитного слоя $q_r = f(m, \delta_0)$ (рисунок 3.5) [285], где под приведенным расходом понимается отношение действительного фильтрационного расхода к коэффициенту фильтрации грунта основания и напора на экране: $q_r = q/(k \cdot H)$, где q_r – приведенный фильтрационный расход; k – коэффициент фильтрации защитного покрытия, м/сут; H – напор на экране, м.

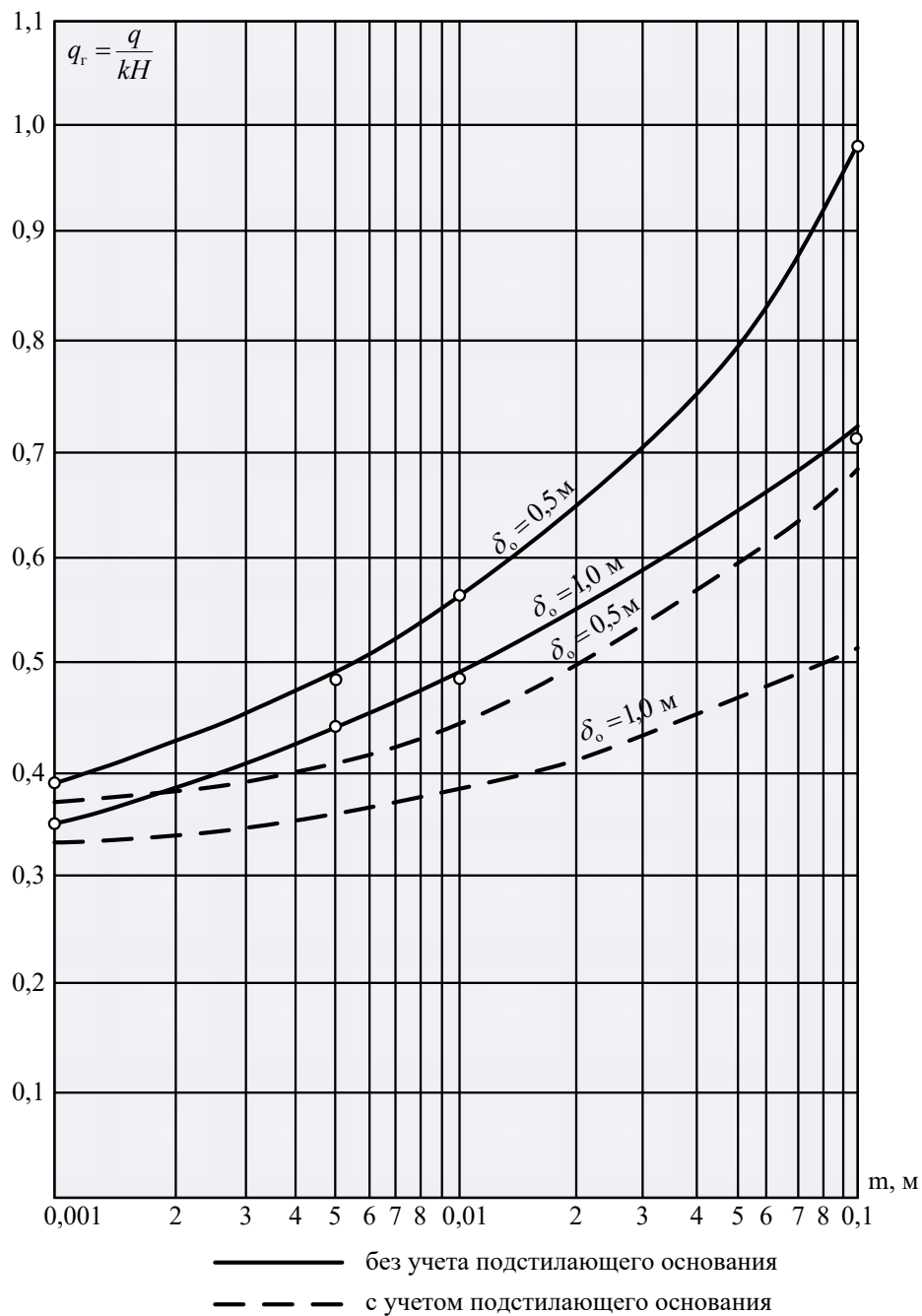


Рисунок 3.5 – График зависимости приведенного фильтрационного расхода через щель экрана из геомембраны [285]

Анализ полученных графических зависимостей показывает, что в случае учета водопроницаемости подстилающего основания, приведенные расходы q_r снижаются, по сравнению с кривыми без учета основания как при толщине защитного слоя при $\delta_0 = 0,5$ м, так и $\delta_0 = 1,0$ м примерно на 12,5 %.

Также проведены расчеты осредненного коэффициента фильтрации противофильтрационного экрана из геомембраны по формулам (3.35) и (3.36), значения которого в широком диапазоне ширины щелей $m = 0,001 - 0,1$ м и их количества $n = 1,0 - 20,0$ представлены в таблице 3.2 [111].

Таблица 3.2 – Значения осредненного коэффициента фильтрации полимерного экрана с системой щелей $k_{\text{экр}}$, м/с [285]

Количество щелей, n	Ширина щели в экране, m , м						
	0,001	0,003	0,005	0,01	0,03	0,05	0,10
При $k_2 \geq 10k_1$ (без учета напора h_1)							
1	$5,8 \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-10}$	$7,3 \times 10^{-10}$	$8,2 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$
5	$2,9 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-9}$	$4,1 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$
10	$5,8 \times 10^{-9}$	$6,7 \times 10^{-9}$	$7,3 \times 10^{-9}$	$8,2 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$
15	$8,7 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^{-8}$
20	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$
При $k_2 \leq 10k_1$ (с учетом напора h_1)							
1	$2,0 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-10}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$3,1 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-10}$
5	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-9}$
10	$2,0 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-9}$	$3,1 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$3,7 \times 10^{-9}$
15	$3,0 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-9}$	$3,9 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-9}$
20	$4,0 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-9}$	$4,8 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$6,2 \times 10^{-9}$	$6,6 \times 10^{-9}$	$7,4 \times 10^{-9}$

При этом учитывались следующие данные: $\delta_0 = 0,5$ м, $h_0 = 3,0$ м, $k_1 = 1,0$ м/сут, $k_2 = 0,3$ м/сут, $\bar{l}_{\text{щ}} = 1,0$ м, $F_0 = 400$ м², $l = 3,0$ м. Сравнение значений коэффициента $k_{\text{экр}}$ при $k_2 \geq 10k_1$ (без учета напора h_1) и $k_2 \leq 10k_1$ (с учетом напора h_1) показывает, что в последнем случае коэффициенты фильтрации снижаются практически в 3 раза. Очевидно, это обусловлено меньшей водопроницаемостью подстилающего основания, по сравнению с защитным слоем ($k_2 < k_1$; $0,3$ м/сут $<$ $1,0$ м/сут).

Сопоставление расчетных значений $k_{\text{экр}}$ для системы щелей с данными J. P. Giroud [309] для круглых отверстий в полимерной геомембране при одинаковых глубинах $h = 3,0$ м свидетельствует о близком порядке цифр, хотя здесь также прослеживаются завышенные их значения, по сравнению с данными автора, особенно при больших размерах отверстий.

3.3 Модель осесимметричной фильтрации через дефект экрана в пористую среду основания

Целью исследования является решение задачи осесимметричной фильтрации через единичный дефект противодиффузионного экрана из полимерной геомембраны в виде отверстия, в том числе для ряда частных случаев.

Общая схема задачи осесимметричной фильтрации через отверстие противодиффузионного экрана из геомембраны представлена на рисунке 3.6.

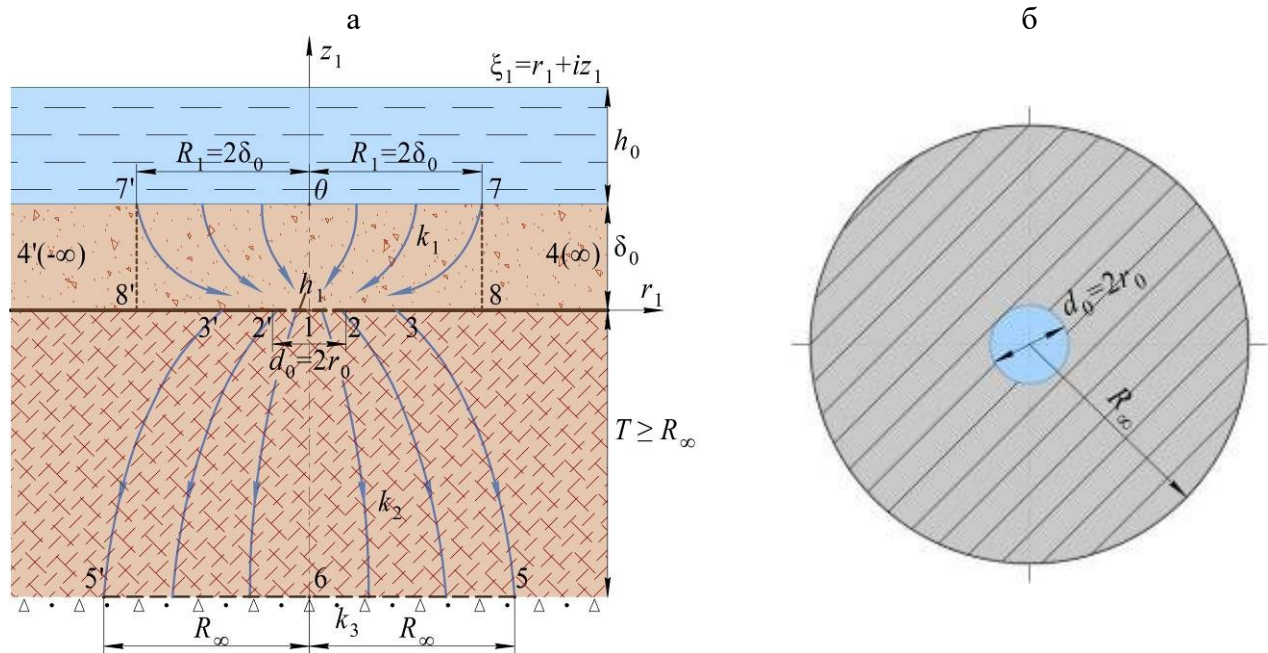


Рисунок 3.6 – Расчетная схема фильтрации через единичное отверстие в полимерном экране:

- а – физическая область фильтрации через единичное отверстие в разрезе;
- б – область фильтрации через отверстие в плане

Расчетная схема в защитном слое экрана с дефектом (см. рисунок 3.6а) включает область фильтрации $2'-1-2-8-7-7'-8'$ с повреждением экрана по границе $2'-1-2$ –диаметром отверстия $d_0 = 2 \cdot r_0$, толщиной защитного слоя δ_0 $8-7$ и $8'-7'$, напором по верхней границе защитного слоя $7-0-7$, $H_1 = h_0 + \delta_0 - h_1$, где h_0 – глубина воды, м; δ_0 – толщина защитного слоя, м; h_1 – пьезометрический напор в отверстии, м. Последовательность конформных отображений в области фильтрации защитного слоя показана на рисунке 3.7.

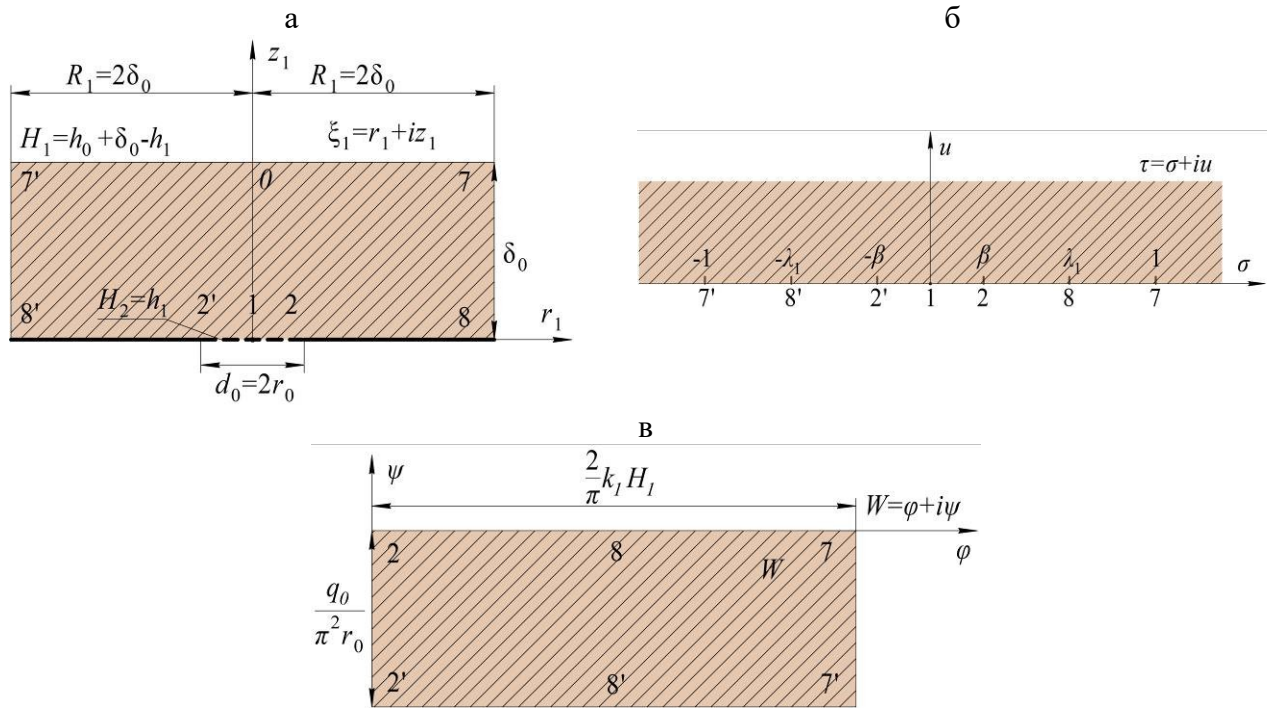


Рисунок 3.7 – Последовательность конформных отображений в области фильтрации защитного слоя:
 а – область фильтрации ξ_1 ; б – полуплоскость τ ;
 в – область комплексного потенциала W

Считаем фильтрацию через дефект полимерного экрана из геомембраны установившейся и подчиняющейся закону Дарси, грунт защитного слоя экрана однородным с коэффициентом фильтрации k_1 , м/сут. Полимерный экран ввиду гибкости плотно прилегает к основанию.

Расчетная схема области безнапорной фильтрации в подстилающем основании с кривыми депрессии 3–5 и 3'–5' приведена на рисунке 3.10а. Локальная область безнапорной фильтрации в виде усеченного купола в верхней его части 3–2–1–2'–3'. Движение фильтрационного потока области безнапорной фильтрации примем установившимся и подчиняющимся уравнению Дарси. Под отверстием полимерного экрана 2–1–2' при остаточном напоре h_1 происходит боковое растекание потока в стороны. Область фильтрации представляет собой купол 1–2'–3'–5'–6–5–3–2–1, где растекание потока будет достигать максимума на границе 5–6–5' при мощности грунтового основания $T \geq R_\infty$, где R_∞ – максимальный радиус растекания потока в основании на большой глубине, приближающейся к бесконечности, м. Грунт области фильтрации в основании будем считать однород-

ным с коэффициентом фильтрации k_2 , м/сут, на границе 5–6–5' которого залегают более проницаемые грунты с коэффициентом фильтрации $k_3 > k_2$.

Конформное отображение безнапорной фильтрации для плоской задачи с использованием годографа скорости дано на рисунке 3.8.

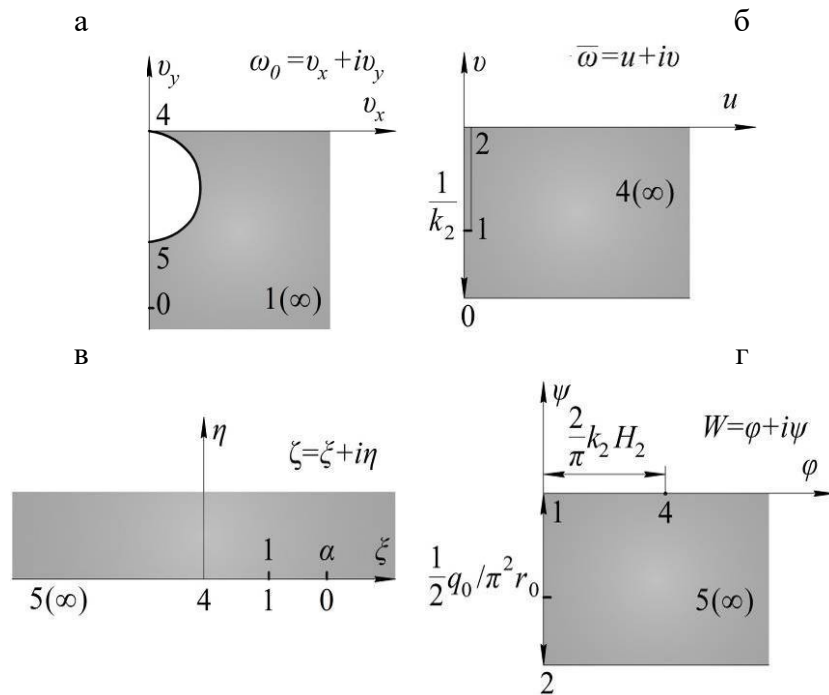


Рисунок 3.8 – Конформные отображения области годографа скорости: а – область годографа скорости ω_0 ; б – область инверсии годографа скорости $\bar{\omega}$; в – вспомогательная полуплоскость ζ ; г – область комплексного потенциала W

На основании вышеизложенной постановки задачи при ее решении целесообразно использовать для области напорной фильтрации в защитном слое интеграл Кристоффеля–Шварца, а для области безнапорной фильтрации в основании – годограф скорости.

Движение фильтрационного потока через отверстие экрана является осесимметричным относительно оси симметрии OZ_1 . При этом в радиальных сечениях движение потока будет плоским, для исследования которого используются методы теории фильтрации, в частности, для осесимметричного фильтрационного потока используем метод конформных отображений [136, 173].

Решение данной задачи будет заключаться в рассмотрении плоской схемы с последующим установлением связи с осесимметричной задачей. Для этого применим p -аналитические функции комплексного переменного [172].

Так как, согласно [173], при решении плоской задачи граничные условия должны измениться, при переводе функций осесимметричного течения в плоское (путем использования интегральных преобразований, полученных ранее автором и в источнике [285], были найдены граничные значения потенциальной функции и функции тока применительно к расчетной схеме (см. рисунок 3.6), которые показаны на рисунках 3.7 и 3.8.

При последующем решении задачи и проведении промежуточных вычислений использовались следующие зависимости (полученные ранее Ю. М. Косиченко [126] и О. А. Баявым [285]) для определения фильтрационного расхода через отверстие экрана в следующем виде:

$$q_0 = \frac{\pi^2 k_2 r_0 H_2}{\text{Arch}(\sqrt{\alpha - 1})}, \quad (3.42)$$

где $H_2 = h_1$ – потери напора при фильтрации через защитный слой;

r_0 – радиус отверстия в экране из геомембраны, м.

При условии, когда $k_2/k_1 \geq 10$, используем формулу для определения фильтрационного расхода через отверстие в противофильтрационном экране [285]:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 \delta_0 r_0 n}{\ln(8\delta_0/\pi r_0)}. \quad (3.43)$$

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

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(8\delta_0/\pi r_0)}, \quad (3.44)$$

где расчетный параметр (h_1) определяется по зависимости:

$$h_1 = \frac{\pi^2 \sigma (h_0 + \delta_0)}{\pi^2 \sigma + 2 \ln(8\delta_0/\pi r_0)}, \quad \sigma = k_1/k_2. \quad (3.44)$$

С целью сравнения результатов проведем расчет осесимметричной фильтрации через дефект полимерного противофильтрационного экрана в виде круглого отверстия малого размера по формуле (3.43) с известными зависимостями других авторов: А. В. Ищенко, В. П. Недриги, Ю. М. Косиченко, В. Н. Жиленкова, Ф. Форхгеймера, J. P. Giroud, N. Touze-Foltz, R. K. Rowe и других.

Исходные данные для расчета примем следующими: $h_0 = 3,0$ м; $\delta_0 = 0,75$ м; $r_0 = 0,0275$ м; $k_1 = 1,3$ м/сут; $k_2 = 0,8$ м/сут.

В таблице 3.3 представлены результаты вычислений расхода фильтрации через отверстие экрана q_0 и пьезометрического напора в отверстии h_1 по формулам различных авторов.

Таблица 3.3 – Результаты вычислений расхода фильтрации через отверстие экрана по формулам различных авторов

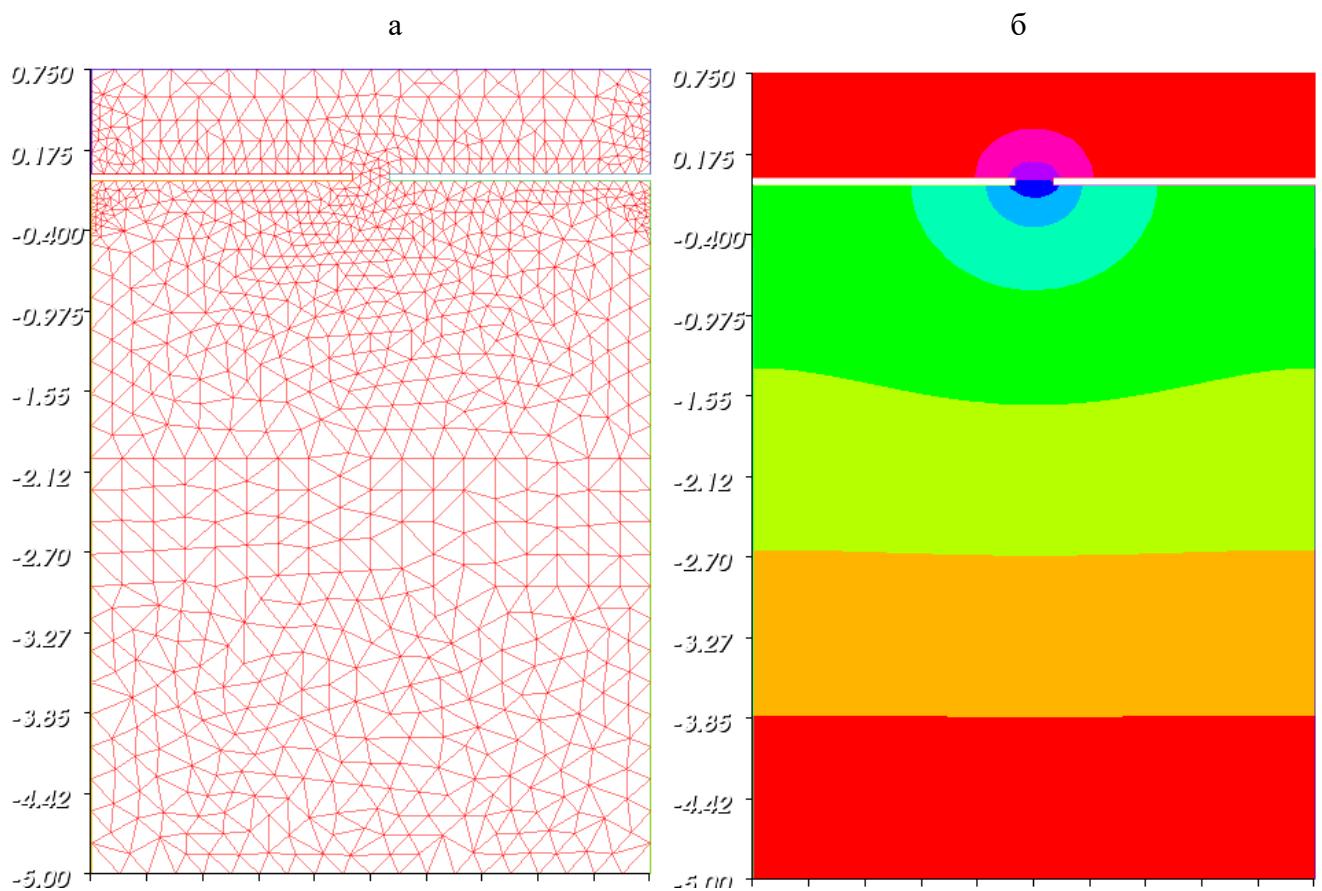
Автор расчетной формулы	Расход через отверстие экрана, q_0 , м ³ /сут	Напор в отверстии, h_1 , м	Отклонение значения расхода от формул автора, %
Ю. М. Косиченко (1983 г.) (теоретическая) [126]	0,182	1,56	7,1
А. В. Ищенко (2010 г.) (теоретическая) [92]	0,145	2,28	14,7
В. П. Недрига (1976 г.) (эмпирическая) [145]	0,129	2,27	24,1
В. Н. Жиленков (1977 г.) (эмпирическая) [81]	0,258	–	– 51,7
Ф. Форхгеймер (1935 г.), Л. С. Лейбензон (гидрогеологическая)	0,245	2,28	– 44,1
Ю. М. Косиченко, О. А. Баев (уточненная теоретическая) [285]	0,170	2,73	–
J. P. Giroud (1997 г.) (полуэмпирическая) [266]	0,0828	3,0	51,3
N. Touze-Foltz, R. K. Rowe (2007 г.) (теоретическая) [310]	0,0270	3,0	84,1
О. А. Баев (эмпирическая, по опытам на физической модели) [285]	0,151	–	13,3

В качестве наиболее близкой формулы будем использовать полученную ранее зависимость (3.42), с которой можно сравнивать результаты расчетов по формулам других исследователей.

Выполненный анализ расчетов, представленных в таблице 3.3, показывает, что наиболее близкие результаты дают три зависимости: О. А. Баева (2014 г.) (эмпирическая), Ю. М. Косиченко (1983 г.) (теоретическая), А. В. Ищенко (2010 г.) (теоретическая) с отклонением расхода по отношению к уточненной теоретической от 7,0 до 15,0 %. Кроме того, относительно близкий результат был получен также по формуле В. П. Недриги (эмпирической) с отклонением 24,1 %.

По другим формулам (В. Н. Жиленкова, Ф. Форхгеймера и Л. М. Лейбензона, J. P. Giroud, N. Touze-Foltz и R. Rowe) получены большие расхождения – более 40–50 % в связи с тем, что в формулах отечественных ученых не учитывается пьезометрический напор в отверстии экрана, а часть зависимостей, полученных зарубежными авторами, является полуэмпирическими.

При численном решении данной задачи и с учетом ранее приведенных исходных данных (при мощности подстилающего основания в экране 5,0 м, $r_0 = 0,0275$ м) получена пространственная модель фильтрации через дефект экрана, проиллюстрированная на рисунке 3.9.



а – сетка конечных элементов; б – пространственная картина фильтрации

Рисунок 3.9 – Модель фильтрации через единичное круглое отверстие в противofильтрационном экране

Таким образом, проведенные сравнительные расчеты фильтрации через отверстие в противofильтрационном экране из геомембраны дают близкие результаты, по сравнению с другими (ранее указанными зависимостями авторов).

3.4 Численное моделирование фильтрации из канала при наличии повреждений в геосинтетическом экране

Для решения поставленной задачи фильтрации через систему повреждений различной ширины в противофильтрационном экране из геосинтетического материала (геомембраны) использовался метод численного моделирования с использованием программного обеспечения «FreeFem++», базирующегося на языке программирования «С++». Производилось решение дифференциальных уравнений в частных производных с использованием метода конечных элементов, и решалась задача фильтрации жидкости (воды) через ряд близкорасположенных повреждений в противофильтрационном экране из полимерной геомембраны. Метод конечных элементов относится к численным методам решения задач фильтрации с использованием дифференциальных уравнений.

Расчетная схема фильтрационной модели с системой повреждений в противофильтрационном экране из геомембраны приведена на рисунке 3.10.

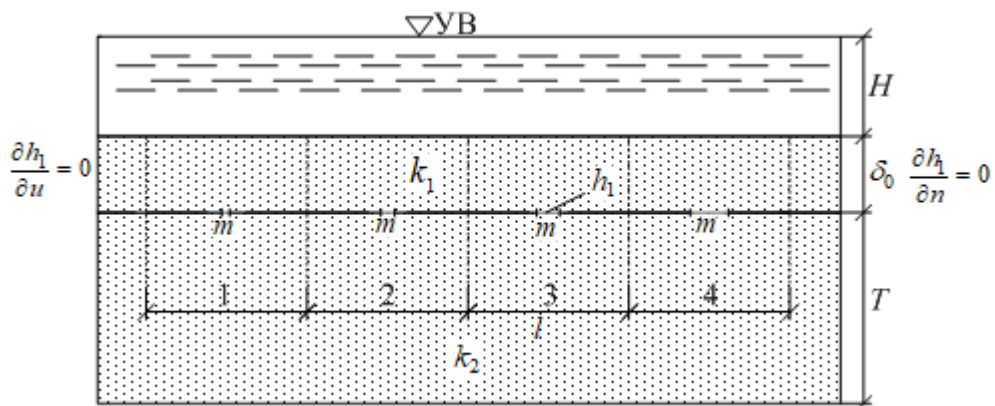


Рисунок 3.10 – Расчетная схема фильтрационной модели с системой повреждений в геомембране

Методика решения задачи численным методом заключалась в следующем.

1. Задавалась геометрическая форма области применительно к решаемой задаче фильтрации воды из канала через повреждения в ПФЭ.
2. Выполнялось построение сетки конечных элементов с разбивкой на определенное число линий (в нашем случае для 20).
3. Производился выбор типа конечных элементов (разбиение осуществлялось по треугольникам).

4. Производилось численное решение задачи на сетке с последующим выводом графических материалов и получением значений расхода.

При решении задачи использовались следующие исходные данные и граничные условия для конструкции противофильтрационной облицовки с геомембраной и защитным покрытием грунта: глубина воды в канале $h_0 = 3,0$ м; толщина защитного грунтового слоя $\delta_0 = 0,5$ м; коэффициент фильтрации защитного слоя $k_1 = 1,0$ м/сут; коэффициент фильтрации подстилающего основания $k_2 = 0,3$ м/сут; ширина между повреждениями (областями фильтрации) $l = 1,0$ м; длина щели $\bar{l}_{щ} = 1,0$ м; количество повреждений (щелей) $n = 4$; мощность подстилающего основания $T = 5,0$ м.; ширина щелей принималась в диапазоне $m = 0,05 - 0,1$ м. Также учитывалось значение пьезометрического напора в повреждениях на (h_1 , м), полученное ранее расчетным путем; значения полного напора на противофильтрационный экран (H_1 , м). Определение граничных условий осуществлялось в среде программирования «Mathcad». Построение границы изучаемой области ПФЭ (с защитным покрытием) приведено на рисунке 3.11.

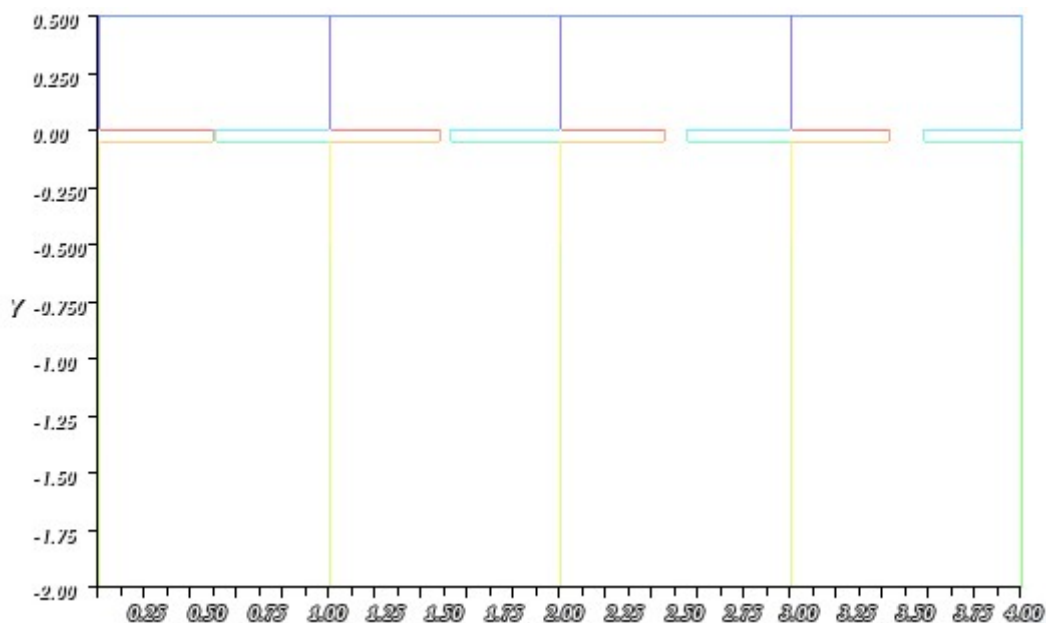


Рисунок 3.11 – Построение границы области для системы щелей в противофильтрационном экране при их близком расположении

В общем случае на границе области определения задавались различные граничные условия: первого рода (условие Дирихле), второго рода (условие Неймана), граничное условие третьего рода (смешанное граничное условие).

Сетка конечных элементов строилась автоматически (задаваясь границами, описывающими область определения дифференциального уравнения с использованием функции «bulfmesh») и представляет собой особый тип переменных. Общее количество конечных элементов (треугольной формы) составляло 3656 (рисунок 3.12).

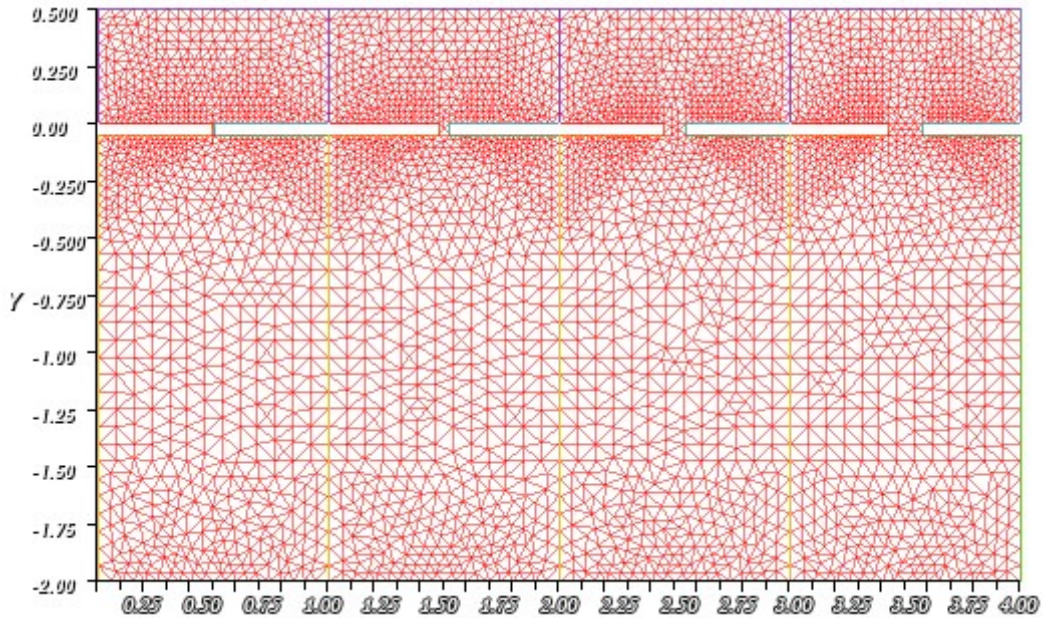


Рисунок 3.12 – Результат построения сетки

Далее был получен контурный график функции (для 20 контурных линий) для той области, в которой определены элементы (рисунок 3.13).

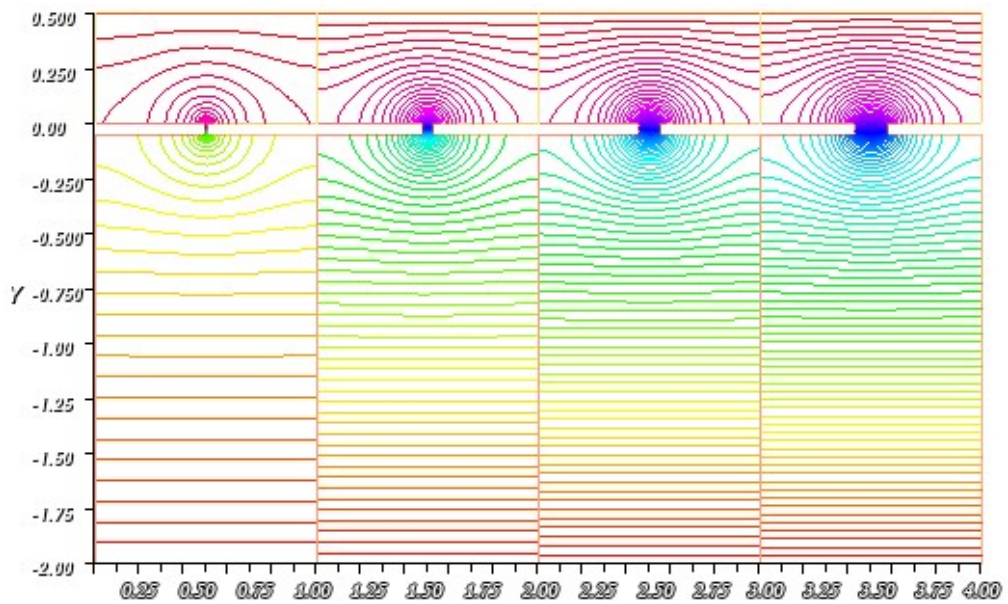


Рисунок 3.13 – Контурный график модели

Распределение линий тока показывает, что они сгущаются в местах повреждений противофильтрационного элемента из геомембраны.

Результаты решения задачи представлены в виде пространственной модели фильтрации через противофильтрационный экран из геосинтетического материала (геомембраны), включающей ряд близкорасположенных (на расстоянии 1 м) повреждений с учетом их взаимного влияния.

Пространственная модель проиллюстрирована рисунком 3.14.

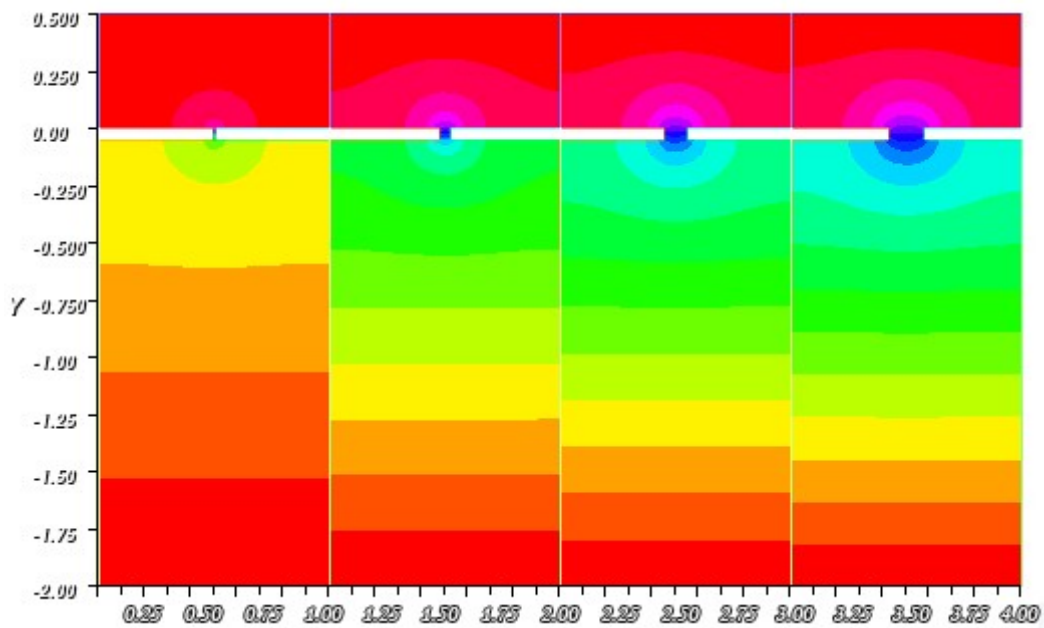


Рисунок 3.14 – Пространственная модель фильтрации через систему повреждений в экране из геомембраны

По результатам расчета были установлены значения фильтрационных расходов через ряд отверстий в экране из геомембраны с учетом их взаимовлияния: при $m=0,005$ м – $Q_f=0,47$ м³/сут; при $m=0,01$ м – $Q_f=0,51$ м³/сут; при $m=0,05$ м – $Q_f=0,76$ м³/сут; при $m=0,1$ м – $Q_f=0,83$ м³/сут.

Анализ результатов расчета показывает, что значения расходов близко соответствуют ранее полученным автором теоретическим методам (результатам расчета других исследователей, в частности, Ю. М. Косиченко и В. П. Недриги для пленочных экранов), а их высокие значения объясняются наличием напора над ПФЭ, взаимовлиянием повреждений, учетом пьезометрического напора, а также размером повреждения (щели), составляющим от $m=0,05–0,1$ м и длиной 1,0 м.

3.5 Модель водопроницаемости противofильтрационных бентонитовых покрытий с учетом самозалечивания повреждений

3.5.1 Методика расчета водопроницаемости и самозалечивания повреждений

Данная методика расчета водопроницаемости противofильтрационной облицовки канала, выполненной из бентонитовых материалов, основывается на допущении, что при эксплуатации таких покрытий могут образовываться повреждения, которые будут самозалечиваться вследствие гидратации гранул (или порошка) бентонита [124]. В результате процесс фильтрации через повреждение такого покрытия будет отличаться от других типов облицовок тем, что он является нестационарным, поскольку при гидратации повреждение будет частично залечиваться.

При полной регенерации повреждений время самозалечивания ($t_{\text{залеч}}$) составит:

$$t_{\text{залеч}} = 2250 \text{ мин} = \frac{2250}{60} = 37,5 \text{ ч},$$

при эффективности $\mathcal{E}_{\phi} = 400\text{--}800 \%$.

При диаметре повреждений, принимаемом $d = 15\text{--}50$ мм, эффективность самозалечивания составляет 80–100 %:

$$d_{\text{cp}} = \frac{15 + 50}{2} = \frac{65}{2} = 32,5 \text{ мм};$$

$$r_{\text{cp}} = d_{\text{cp}} / 2 = 32,5 / 2 = 16,25 \text{ мм}.$$

Скорость самозалечивания (v_{cp} , мм/ч) отверстия при использовании в конструкции противofильтрационного экрана из бентонита определяем по формуле:

$$v_{\text{cp}} = \frac{r_{\text{cp}}}{t_{\text{залеч}}}, \quad (3.45)$$

$$v_{\text{cp}} = \frac{16,25}{37,5} = 0,43 \text{ мм/ч}.$$

При диаметре повреждений, принимаемом $d = 1\text{--}15$ мм, эффективность самозалечивания составляет от 5 до 80 %.

Для расчета водопроницаемости противοфилтpационного экрана из бентонитовых материалов с защитным слоем грунта используем метод смены стационарных состояний, предложенный в работе [23]. Он заключается в том, что весь процесс нестационарной филтpации разбивается на ряд стационарных состояний, когда происходит частичное залечивание повреждений, при котором расходы филтpации через повреждения будем считать постоянными, а объемы утечки изменяются по вогнутой кривой.

На рисунке 3.15 приведена расчетная схема водопроницаемости экрана из бентонитовых материалов в условиях самозалечивания повреждений [283].

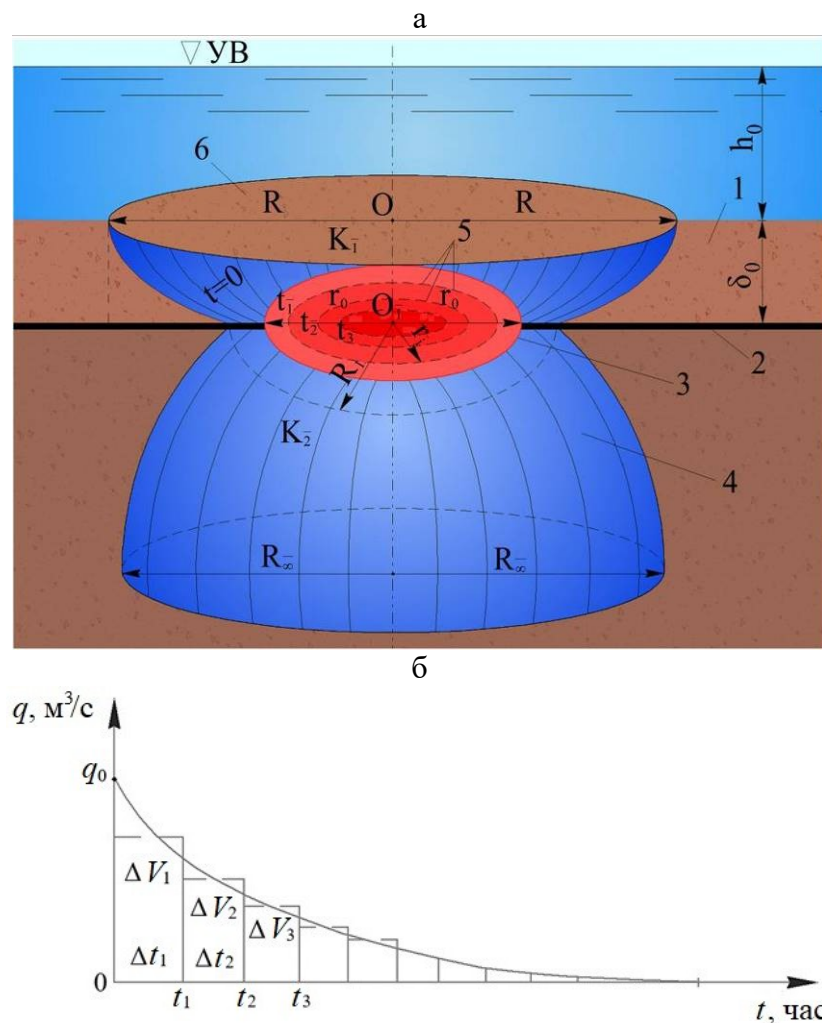


Рисунок 3.15 – Модель водопроницаемости бентонитового экрана с защитным слоем грунта в условиях самозалечивания повреждения:
 а – расчетная схема водопроницаемости экрана; б – график изменения расходов и объемов утечки через экран; 1 – защитный слой грунта; 2 – противοфилтpационный экран; 3 – контур первоначального повреждения; 4 – куполообразная область филтpации в основании экрана; 5 – контуры изменения положения повреждения на моменты времени $t_1, t_2 \dots t_3$; б – область филтpации в защитном слое грунта

Для расчета водопроницаемости в условиях самозалечивания бентонитового покрытия принимаем следующие допущения [283]:

- повреждение противofильтрационного экрана образуется при длительной эксплуатации канала вследствие значительной деформации грунтового основания под экраном;
- напор на экране примем постоянным и соответствующим нормальной эксплуатации канала;
- самозалечивание повреждения экрана происходит за счет повторной регенерации;
- границы контуров самозалечивания повреждения экрана условно принимаются по окружности.

В соответствии с теоретическим решением задачи водопроницаемости экрана с отверстием [112] были получены приближенные расчетные формулы для определения расхода через круглые отверстия применительно к рассматриваемой задаче в следующем виде:

- при соотношении коэффициентов фильтрации грунта основания и защитного слоя ($k_2 / k_1 > 10$) для первоначального контура повреждения экрана [283]:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \quad (3.46)$$

где k_1 – коэффициент фильтрации защитного слоя грунта, м/сут;

r_0 – радиус первоначального повреждения, м.

Для последующих контуров самозалечивания противofильтрационного экрана:

$$q_i = \frac{2\pi^2 k_1 r_i (h_0 + \delta_0)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_i)}, \quad (3.47)$$

где r_i – радиус повреждения при самозалечивании, м.

Интервал времени определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_{\text{залеч}}}{n_{\text{инт}}}. \quad (3.48)$$

Принимая количество интервалов $n_{\text{инт}} = 10$, Δt составит 3,75 ч. Тогда радиус отверстия в экране при самозалечивании будет:

$$r_i = r_0 - n_{\text{инт}} \cdot r_0, \quad (3.49)$$

где $n_{\text{инт}}$ – количество интервалов при самозалечивании повреждения.

Объем утечки воды за интервал Δt_i времени составит:

$$\Delta V_i = q_{\text{ср.}i} \cdot \Delta t_i, \quad (3.50)$$

где $q_{\text{ср.}i}$ – средний расход за интервал времени самозалечивания Δt_i , определяем как:

$$q_{\text{ср.}i} = \frac{q_i + q_{i-1}}{2}. \quad (3.51)$$

Суммарный объем утечки при фильтрации ($V_{\text{фил}}$) за весь период самозалечивания ($t_{\text{залеч}}$):

$$V_{\text{фил}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{инт}}} \Delta V_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{инт}}} \Delta q_{\text{ср.}i} \cdot \Delta t_i. \quad (3.52)$$

При $k_2 / k_1 < 10$ расчетная формула фильтрационного расхода будет учитывать напор в отверстии [131]:

- для первоначального контура повреждения экрана:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \quad (3.53)$$

где напор в отверстии экрана вычисляем по формуле:

$$h_1 = \frac{\pi^2 \sigma (h_0 + \delta_0) - 4H_k \ln(8\delta_0 / \pi r_0)}{\pi^2 \sigma + 4 \ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \quad \sigma = k_1 / k_2; \quad (3.54)$$

- для последующих контуров самозалечивания:

$$q_i = \frac{2\pi^2 k_1 r_i (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_i)}, \quad (3.55)$$

где $h_1 = \frac{\pi^2 \sigma (h_0 + \delta_0) - 4H_k \ln(8\delta_0 / \pi r_i)}{\pi^2 \sigma + 4 \ln(8\delta_0 / \pi r_i)}$; $\sigma = k_1 / k_2$.

Далее рассмотрим результаты оценки водопроницаемости и самозалечивания конструкций экранов из бентонитовых материалов при наличии повреждения.

3.5.2 Результаты оценки водопроницаемости покрытий из бентонитовых материалов с учетом самозалечивания

Рассмотрим расчет облицовки оросительного канала из геосинтетического бентонитового материала с защитным покрытием из грунта.

Исходные данные: $L_k = 10000$ м, $\chi_k = 15$ м, $k_1 = 1,0$ м/сут, $k_2 = 0,3$ м/сут, $\delta_o = 0,5$ м, $h_0 = 3,0$ м, $d_0 = 50$ мм = $0,05$ м = $5,0$ см, $r_0 = d_0 / 2 = 0,05 / 2 = 0,025$ м, $H_k = 0,5$ м, $t_{\text{залеч}} = 37,5$ ч, $n_{\text{отв}} = 10$, $\sigma = k_1 / k_2 = 1,0 / 0,3 = 3,33$.

1. Определяем скорость самозалечивания ($v_{\text{залеч}}$) круглого повреждения в экране из бентонитового покрытия по формуле:

$$v_{\text{залеч}} = \frac{r_0}{t_{\text{залеч}}}, \quad (3.56)$$

при $r_0 = 0,025$ м, скорость самозалечивания составит $v_{\text{залеч}} = 0,00067$ м/ч или $0,67$ мм/ч.

2. Интервал времени (Δt_i) по выражению (3.48), который составит $3,75$ ч.

3. Радиус изменения отверстия (r_i) в экране за i -й интервал определяем как:

$$r_i = r_0 - n_{\text{инт}} \cdot \Delta r, \quad (3.57)$$

где Δr – изменение радиуса повреждения за один интервал времени ($\Delta r = r_0 / n_{\text{инт}} = 0,025 / 10 = 0,0025$ м = $2,5$ мм).

4. Вычисляем фильтрационный расход за весь период самозалечивания по формуле (3.53) при $r_0 = 0,025$ м, $q_0 = 0,162$ м³/сут.

5. Напор в отверстии экрана определяем по (3.54), получаем $h_1 = 2,21$ м.

Аналогичные расчеты проведены также для других значений r_0 и h_1 (всего для десяти различных интервалов) [283]. Сводные результаты расчета водопроницаемости экрана канала из геосинтетического бентонитового покрытия через единичное повреждение представлены в таблице 3.4.

6. Далее рассчитаем объем потерь через единичное повреждение по формуле (3.50) при $t_1 = 3,75$ ч: $q_{\text{ср.1}} = \frac{0,162 + 0,195}{2} = 0,179$ м³/сут,

$$\Delta V_1 = q_{\text{ср.1}} \cdot \Delta t = 0,179 \cdot 0,156 = 0,0279 \text{ м}^3.$$

Таблица 3.4 – Сводные результаты расчета водопроницаемости конструкций через единичное повреждение экрана из геосинтетического бентонитового покрытия [283]

Количество интервалов, $n_{\text{инт.}i}$	Интервал времени, Δt_i , ч	Период времени самозалечивания повреждения, t_i , ч	Радиус отверстия при самозалечивании повреждения, r_i , м	Пьезометрический напор в отверстии, h_{1i} , м	Фильтрационный расход за интервал времени, q_i , м ³ /сут	Средний фильтрационный расход за интервал времени, $q_{\text{ср.}i}$, м ³ /сут	Объем утечки за интервал времени, ΔV_i , м ³	Суммарный объем утечки за период времени, V_i , м ³
0	0	0	0,0250	2,21	0,162	0,154	0,0244	0,0244
1	3,75	3,75	0,0225	2,18	0,145	0,136	0,0213	0,0457
2	3,75	7,50	0,020	2,16	0,127	0,118	0,0185	0,0642
3	3,75	11,25	0,0175	2,13	0,110	0,102	0,0158	0,0800
4	3,75	15,00	0,0150	2,10	0,093	0,085	0,0133	0,0933
5	3,75	18,75	0,0125	2,06	0,077	0,068	0,0107	0,1040
6	3,75	22,50	0,0100	2,02	0,060	0,052	0,0081	0,1121
7	3,75	26,25	0,0075	1,96	0,044	0,036	0,0057	0,1178
8	3,75	30,00	0,0050	1,89	0,029	0,022	0,0034	0,1212
9	3,75	33,75	0,0025	1,77	0,014	0,007	0,0011	0,1223
10	3,75	37,50	0,0	–	0,0	–	–	–

Примечание – при выполнении расчетов в качестве исходных данных использовались ранее полученные автором значения (по результатам проведенных экспериментальных исследований в лаборатории «РосНИИПМ» и в лаборатории испытания качества продукции г. Кургана), накопленные среднестатистические показатели по повреждаемости ПФЭ, а также представленные производителями значения по времени гидратации и регенерации бентонита.

Аналогично выполнены расчеты для всех 10 интервалов, а полученные результаты приведены в таблице 3.4.

В соответствии с выполненными расчетами и полученными суммарными объемами потерь за период самозалечивания $t_{\text{залеч}} = 37,5$ ч, общий суммарный объем потерь через возможное единичное повреждение бентонитового покрытия после его полной гидратации и регенерации составит $V_{\text{общ.ед}} = 0,1223 \text{ м}^3$.

Тогда общий объем фильтрационных потерь через общее количество возможных повреждений при $n_{\text{отв}} = 10$ составит:

$$V_{\text{общ.}n=10} = V_{\text{общ.ед}} \cdot n_{\text{отв}} = 0,1223 \cdot 10 = 1,223 \text{ м}^3.$$

На рисунке 3.16 приведены графики изменения фильтрационного расхода в зависимости от времени самозалечивания единичного повреждения, а также объема потерь воды через повреждение круглой формы, которое уменьшается вследствие регенерации бентонита и самозалечивания повреждения.

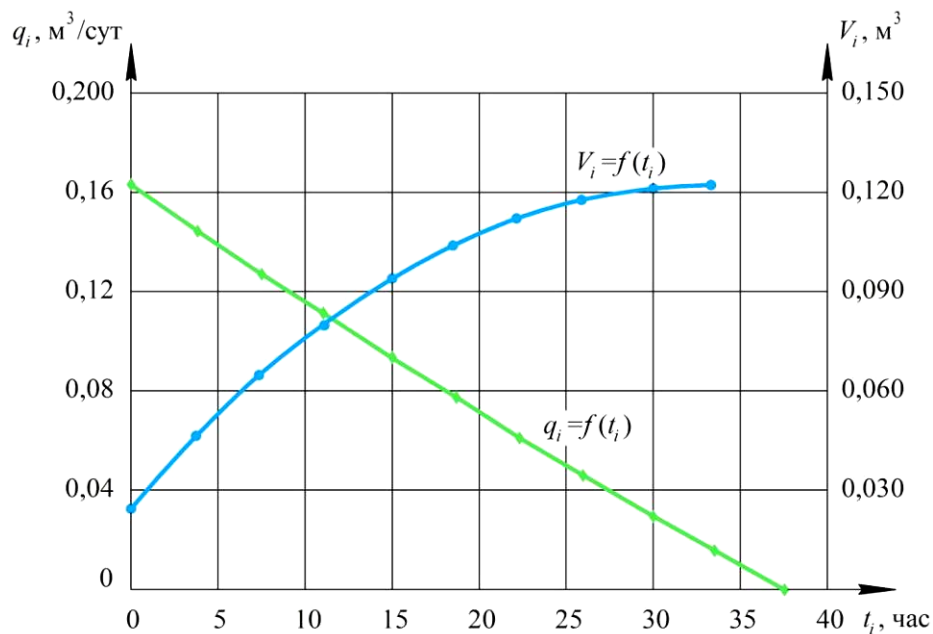


Рисунок 3.16 – Графики зависимостей $q_i = f(t_i)$ и $V_i = f(t_i)$ [283]

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

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Обобщены исследования отечественных ученых, направленные на изучение и развитие теории фильтрации на оросительных каналах, отмечены основные достижения и некоторые недостатки, полученные различными авторами и научными школами за более чем 80 - летний период становления фильтрационной науки применительно к каналам мелиоративного назначения. Выявлены новые (нерассмотренные ранее) задачи, направленные на исследования водопроницаемости покрытий каналов, выполняемых из геосинтетических (полимерных) и бентонитовых материалов. Рассмотрены основные методы, используемые при решении задач водопроницаемости геосинтетических противофильтрационных покрытий оросительных каналов, основанные на классических методах теории фильтрации.

2. Проведенные сравнительные расчеты изменения удельного расхода через щель противофильтрационного экрана по полученной формуле автора с известными зависимостями Н. П. Недриги, В. В. Ведерникова и других ученых свидетельствуют об удовлетворительной их сходимости в случае учета напора в щели экрана. Для практического использования результатов расчета построен график изменения приведенного фильтрационного расхода в зависимости от $q_2 = f(m, \delta_0)$ и составлена таблица изменения значений осредненного коэффициента фильтрации ($k'_{\text{экр}}$) противофильтрационного геосинтетического экрана.

3. Разработанная фильтрационная модель водопроницаемости противофильтрационного покрытия из полимерной геомембраны для условий напорно-безнапорной фильтрации через повреждение (дефект) решена методами теории фильтрации с использованием методов конформных отображений и годографа скорости, что позволило получить более точную теоретическую зависимость. Анализ результатов расчетов осесимметричной фильтрации через дефект полимерного экрана по полученной автором формуле в сравнении с известными зависимостями показывает, что отклонение фильтрационного расхода по формуле А. В. Ищенко составляет 14,7 %, Ю. М. Косиченко – 7,1 %, В. П. Недриги –

24,1 %. По другим зависимостям (В. Н. Жиленкова, J. P. Giroud, N. Touze-Folts, R. Rowe и др.) получены большие расхождения в пределах 40–50 %, что объясняется использованием зарубежными учеными дополнительных параметров и безразмерных коэффициентов, а также полуэмпирических зависимостей, полученных по результатам натурных и теоретических исследований.

4. На основе разработанной численной модели фильтрации (в программном комплексе «FreeFem++») через систему повреждений в противofильтрационном экране из геосинтетического материала (геомембраны) определены значения фильтрационного расхода для повреждений (дефектов) в диапазоне $m = 0,05–0,1$ м с учетом их близкого расположения и взаимного влияния.

5. Задача водопроницаемости через дефект противofильтрационного покрытия, выполненного из геосинтетического бентонитового материала (с учетом самозалечивания повреждения), для условий оросительных каналов ранее не была решена. Использование разработанной методики позволяет рассчитать время и скорость самозалечивания круглых повреждений в зависимости их диаметра, определять радиус изменения отверстия в экране от времени, вычислять фильтрационный расход для первоначального и последующего контуров изменения положения повреждения, а также фильтрационный расход за весь период самозалечивания.

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

Глава 4. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ

4.1. Описание методов и выбор критериев оценки надежности и долговечности конструкций противofильтрационных покрытий

В настоящее время в области гидротехнического строительства для обеспечения противofильтрационной надежности и защиты различного рода сооружений (оросительных каналов, дамб, плотин, водоемов, прудов-накопителей и др.) от негативного воздействия вод находят широкое применение противofильтрационные полимерные и геосинтетические материалы [69, 125, 202]. Применяемые за рубежом (более 15–20 лет) и в Российской Федерации (последние 5–8 лет) покрытия из геосинтетиков (геомембран и бентонитовых материалов) характеризуются различными физико-техническими и механическими характеристиками, нуждаются в проведении расчетного обоснования показателей эксплуатационной надежности, эффективности и долговечности (срока службы).

Для выполнения расчетной оценки надежности используются различные методы теории надежности. Наиболее известны методы и теоремы Т. Байеса, И. А. Биргера, С. А. Аррениуса, Барроу и многих других. В нашей стране в области надежности гидротехнических сооружений наибольшее распространение получили работы Ц. Е. Мирцхулавы [141], Д. В. Стефанишина, С. В. Сольского, О. М. Финагенова [143], В. А. Волосухина [46], М. А. Бандурина и других [123, 129, 229, 288]. За рубежом вопросам надежности при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений посвящены статьи Е. J. Plate, G. Zhizhou, K. V. N. S. Raviteja и В. М. Basha и др.

Рациональное проектирование оросительных каналов требует знания критериев и количественных характеристик надежности, долговечности и эффективности функционирования систем и отдельных сооружений. При прогнозе количественных характеристик и разработке мер по повышению надежности сооружений должны быть учтены их особенности.

Акад. Ц. Е. Мирцхулава [141, 142] к ненадежным системам относит те элементы, которые совсем перестают выполнять свои функции, и те, у которых изменились параметры сверх допустимых величин (например, характеристики фильтрационной устойчивости, допускаемые значения водопроницаемости, прочности и др.).

Проектирование различного рода сооружений (в том числе оросительных каналов) без проведения оценки надежности и долговечности не позволяет учитывать выгоды уточнения условий эксплуатации, заранее оценить (спрогнозировать) срок службы элементов, степень надежности.

Под надежностью (согласно ГОСТ 27.102-2021) будем понимать свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности, или определенное сочетание этих свойств как для объекта, так и для его частей [142]. Количественно надежность объекта оценивается с помощью показателей, которые выбираются с учетом особенностей объекта и условий его эксплуатации и последствий отказов.

Под долговечностью (согласно ГОСТ 27751-2014) будем понимать способность объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Следует отметить, что оценка надежности противofильтрационных устройств с применением геосинтетических материалов представляет собой сложную и специфическую задачу в силу разности объектов, их назначения, технических составляющих и природных условий эксплуатации, а также недостаточностью информации о воздействиях, нагрузках и многих других характеристик. От эффек-

тивности и надежности таких отдельных конструктивных элементов, как противofильтрационные экраны, зависит безопасность всех сооружений, прилегающих территорий и строений.

К факторам, влияющим на надежность противofильтрационных устройств из геосинтетических рулонных материалов на оросительных каналах, можно отнести объективные и субъективные.

Объективными факторами могут являться: воздействие окружающей среды, эксплуатационные режимы. Воздействие окружающей среды отрицательно влияет на показатели и свойства геосинтетических материалов, заключающееся в снижении прочности и устойчивости материалов, элементов и конструкции в целом [137]. Цикличность работы сооружений при эксплуатации в сочетании с температурными перепадами в различных условиях влажности, солнечной радиации и водонасыщенности грунтов может также способствовать снижению эффективности противofильтрационных устройств из геосинтетических материалов.

К субъективным факторам, влияющим на надежность противofильтрационных устройств из геосинтетических материалов на каналах, можно отнести: проектные, производственные и эксплуатационные.

Исходя из вышеизложенного, выделим основные причины (отказы) ненадежной работы противofильтрационных элементов с использованием геосинтетических материалов:

1. Отказы, обусловленные ошибками при проектировании каналов (неправильный выбор конструкции, применяемых материалов и их технических параметров, недостаточность и несовершенство методов расчета, данных инженерных и других изысканий, изменчивость нагрузок при эксплуатации объекта, производственные факторы – несоответствие применяемых строительных материалов и изделий и др.).

2. Отказы, вызванные техническими недостатками в период строительства сооружений и устройств (нарушение технологии строительства, в том числе ук-

ладки и соединения противofильтрационных элементов, разделяющих или защитных слоев и др.).

3. Отказы, появляющиеся при нарушении требуемых режимов эксплуатации сооружений и технологии уходных (эксплуатационных) мероприятий (несовершенство правил эксплуатации каналов, повреждение противofильтрационных элементов при неверной эксплуатации, снижение прочностных и других показателей).

Влияние этих факторов может проявляться в виде отклонений параметров всей системы от расчетных значений, например, изменении коэффициента фильтрации и фильтрационного расхода, образовании повреждений или размывов пригрузочных или дренажных слоев.

Наглядным примером снижения эксплуатационной надежности являются некоторые оросительные системы и каналы, на которых выполнены нерациональные конструкции противofильтрационных облицовок. Ввиду этого, такие сооружения характеризуются низким техническим уровнем и невысокой эксплуатационной надежностью, наблюдается низкий коэффициент полезного действия, составляющий 0,75–0,80, большие потери воды на фильтрацию, подъем уровня грунтовых вод и заболачивание приканальных территорий.

С целью обеспечения надежности работы противofильтрационного покрытия из бентонитовых материалов предлагается структурная схема (рисунок 4.1), которая учитывает ряд мероприятий, выполняемых при укладке и контроле целостности ПФЭ с разделением экрана на следующие основные элементы: защитное покрытие из каменной наброски, защитный слой грунта из суглинка, противofильтрационный элемент, подстилающий слой из песка [112], а также естественное грунтовое основание (на схеме не указано).

Соблюдение указанных требований к укладке и контролю всех отдельных элементов ПФЭ (защитного покрытия из каменной наброски, защитного слоя грунта, противofильтрационного элемента и подстилающего слоя) позволит значительно повысить надежность и эффективность устраиваемого покрытия.

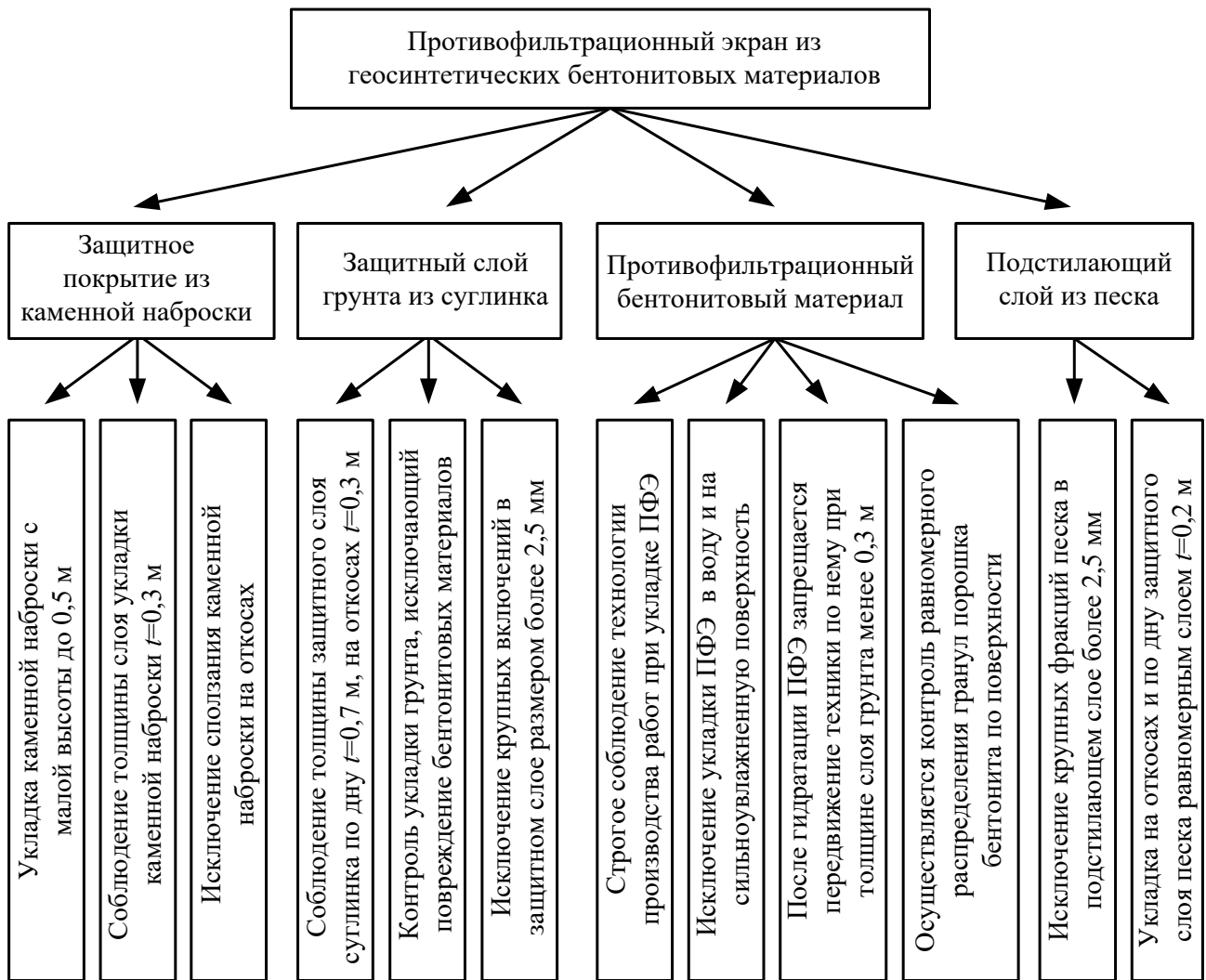


Рисунок 4.1 – Структурная схема обеспечения надежности работы конструкции противофильтрационного экрана из бентонитовых материалов

На основе обобщения отечественного и зарубежного опыта применения геосинтетических бентонитовых материалов в конструкциях противофильтрационных экранов [59, 183, 280, 281] предлагаются следующие их критерии технической эффективности и надежности.

Критерии эффективности:

- критерий эффективности конструкции из геосинтетических бентонитовых материалов, по сравнению с альтернативными вариантами (критерий N_1):

$$N_1 = \mathcal{E}_{\text{пр}} / \mathcal{E}_{\text{альт}}; \quad (4.1)$$

- критерий по фильтрационным сопротивлениям (критерий N_2):

$$N_2 = \Phi_{\text{пр}} / \Phi_{\text{альт}}; \quad (4.2)$$

- критерий по коэффициентам фильтрации (критерий N_3):

$$N_3 = k_{\text{альт}} / k_{\text{пр}}, \quad (4.3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{пр}}, \mathcal{E}_{\text{альт}}$ – эффективность конструкции экрана по проектному варианту и альтернативным вариантам;

$\Phi_{\text{пр}} / \Phi_{\text{альт}}$ – фильтрационные сопротивления конструкции противофильтрационного экрана [116] по проектному варианту и альтернативным вариантам;

$k_{\text{альт}} / k_{\text{пр}}$ – коэффициенты фильтрации противофильтрационного покрытия, задаваемые по альтернативному и проектному вариантам, м/сут.

Критерии эксплуатационной надежности:

- критерий вероятности безотказной работы:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}; \quad (4.4)$$

- критерий вероятности отказа:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (4.5)$$

где N_0 – количество участков экрана, где проводятся наблюдения;

$n(t)$ – количество повреждений за период времени эксплуатации t , лет.

Кроме критериев эффективности и надежности (4.1)–(4.5), может использоваться также показатель долговечности, определяемый по формуле (4.13).

Выбор критериев эффективности и надежности будет осуществляться с учетом особенностей противофильтрационных конструкций покрытий каналов из геосинтетических материалов.

4.2 Надежность противофильтрационного экрана из геосинтетических материалов при эксплуатации

Оценку надежности конструкции экрана рассмотрим на примере определения вероятности безотказной работы по критерию (4.4). При этом примем, что количество участков обследования N_0 изменяется в диапазоне от 2 до 200 участков. Размеры каждого участка обследования назначаем 10×10 м, т.е. площадью

$F_0 = 100 \text{ м}^2$. При необходимости детализации обследования, участки разбиваются на квадраты размером $1 \times 1 \text{ м}$ или $2,5 \times 2,5 \text{ м}$. Общее количество повреждений экрана на всех обследованных участках задается от 1 до 10.

Исходя из этих данных, найдем вероятность безотказной работы противофильтрационного экрана для случая, когда количество повреждений составляет в пределах $n(t) = 1, 2, 3, \dots, 10$.

Расчет выполнен по зависимости (4.4) [286] при различных значениях (n), например, при $n = 1$ $P(t) = \frac{50-1}{50} = 0,98$, при $n = 2$ $P(t) = \frac{50-2}{50} = 0,96$ и так далее для 10 значений (n).

Результаты расчетов безотказной работы противофильтрационного экрана (для различных значений N_0 и n) приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Вероятность безотказной работы противофильтрационного экрана $P(t)$

Количество участков обследования, N_0	Количество повреждений (n) и вероятность безотказной работы конструкции противофильтрационного экрана $P(t)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,5	0	–	–	–	–	–	–	–	–
5	0,8	0,6	0,4	0,2	0	–	–	–	–	–
10	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
20	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
50	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80
Прогнозная оценка при вероятности $N_0 \geq 100$										
100	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
200	0,995	0,99	0,985	0,980	0,975	0,970	0,965	0,960	0,955	0,95

Примечание – рекомендуемая область работы экрана выделена цветом (экран из геосинтетических бентонитовых материалов).

Представленные данные вероятности $P(t)$ свидетельствуют о том, что чем больше количество участков обследования, тем больше значения вероятности

безотказной работы $P(t)$. Так, для случая, когда $n=1$ при $N_0=2$ $P(t)=0,5$, при $N_0=5$ $P(t)=0,8$, при $N_0=10$ $P(t)=0,9$.

На рисунке 4.2 представлен график, полученный по результатам расчета вероятности безотказной работы противофильтрационного экрана.

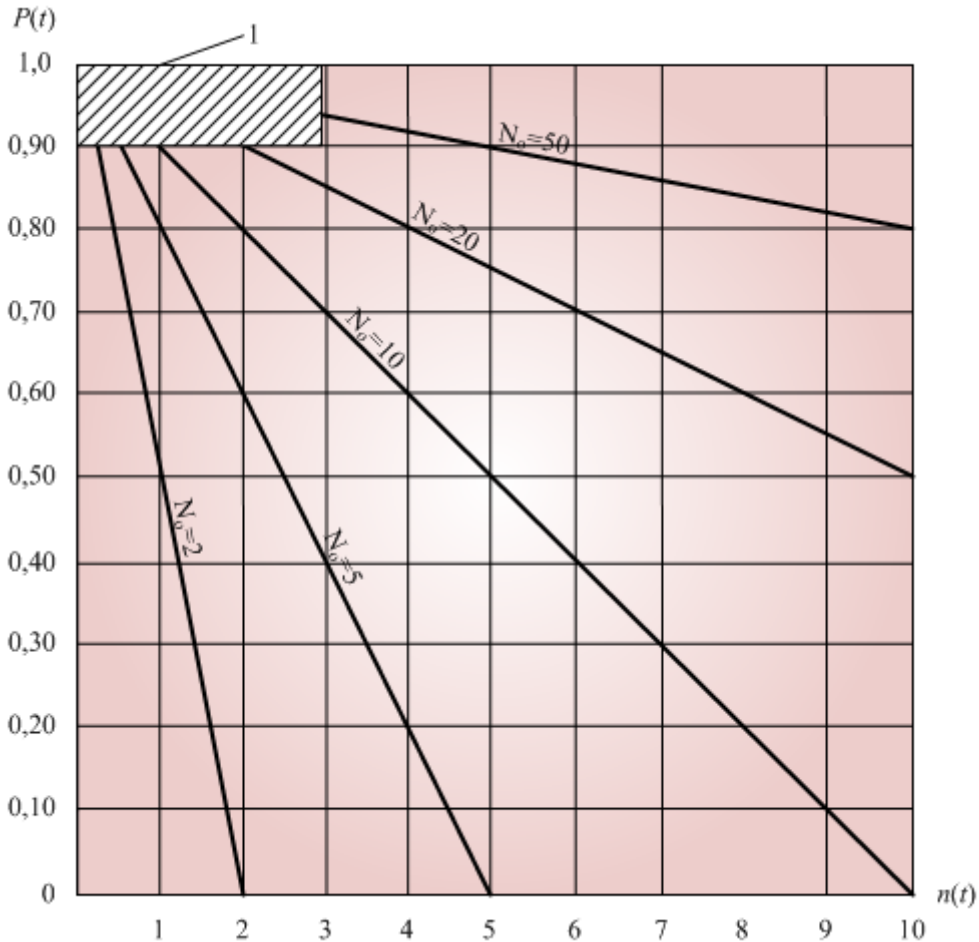


Рисунок 4.2 – График изменения вероятности безотказной работы противофильтрационного покрытия в зависимости от участков обследования и количества повреждений:

- 1 – рекомендуемая область надежности работы покрытия из бентонитовых материалов ($P(t) \geq 0,90-0,98$); количество участков обследования $N_0 = 2 \div 50$;
количество повреждений экрана $n(t) = 2 \div 10$

Анализ данных вероятности безотказной работы экрана позволяет выделить область высокой надежности ($P \geq 0,90$), которая соответствует области надежности для разработанных конструкций с применением материалов на основе бентонита (выделена цветом в таблице 4.2 и на рисунке 4.2). Таким образом, данную область можно считать рекомендуемой для надежной работы экрана из геосинтетических бентонитовых материалов.

4.3 Оценка надежности геокomпозитных покрытий с использованием методов последовательного и параллельного соединения элементов

Актуальность применения геокomпозитных материалов в гидротехнических сооружениях связана с необходимостью повышения их долговечности и эксплуатационной надежности. В последние годы А. П. Гурьевым, Н. В. Хановым, К. Д. Козловым [76, 101] и другими учеными проведен ряд гидравлических исследований, направленных на изучение работы конструкций защитных покрытий из геокomпозитных материалов применительно к гидротехническим сооружениям для дренажных целей [113].

Согласно принятой гипотезе о повышении надежности, долговечности и эффективности геокomпозитного материала, состоящего из нескольких геосинтетиков, рассмотрим его сравнение с отдельными элементами, входящими в состав комбинированного покрытия.

Теоретически надежность геокomпозитного покрытия с учетом основания из грунта может определяться вероятностью безотказной его работы при эксплуатации с учетом последовательного соединения элементов по зависимости [113]:

$$P_{\text{гк}}(t) = P_{\text{гр}}(t_1) \cdot P_{\text{гт}}(t_2) \cdot P_{\text{ос}}(t), \quad (4.6)$$

где $P_{\text{гк}}(t)$ – вероятность безотказной работы дренажного геокomпозитного покрытия;

$P_{\text{гр}}(t)$ – вероятность безотказной работы георешетки;

$P_{\text{гт}}(t)$ – вероятность безотказной работы геотекстиля;

$P_{\text{ос}}(t)$ – вероятность безотказной работы основания.

Таким образом, вероятность безотказного состояния геокomпозитного покрытия будет зависеть от вероятности безотказной работы георешетки, геотекстиля и грунтового основания, которые при последовательном их соединении перпендикулярно полотнищу материала перемножаются [112, 113]. Под отказами здесь будем понимать возможные дефекты и повреждения, которые могут образовываться в процессе изготовления или при эксплуатации геокomпозитного дренажного материала.

Применительно к изучаемому геокомпозитному покрытию выражение (4.6) получит нижеследующий вид [113]:

$$P'_{\text{гк}} = (P_{\text{гр}} \cdot P_{\text{гт}} \cdot P_{\text{ос}}) + [P_m - (P_{\text{гр}} \cdot P_{\text{гт}} \cdot P_{\text{ос}})] \cdot K_N, \quad (4.7)$$

где K_N – коэффициент, учитывающий статистическую взаимосвязь между отказами элементов материала, который вычисляется по формуле [113]:

$$K_N = \frac{2}{\pi \cdot C} \sum \arcsin \rho_{H_i H_j}, \quad (4.8)$$

где $C = \frac{n(n-1)}{2}$.

Для прогноза долговечности (срока службы) геокомпозитного покрытия используем уравнение теории надежности С. А. Аррениуса, которое считается основным уравнением старения [225]:

$$\ln \sigma_p = \ln \sigma_0 - K'' \cdot \tau \cdot e^{-\frac{Q}{E}}, \quad (4.9)$$

где σ_p – мгновенная прочность, кН/м;

σ_0 – начальная прочность, кН/м;

Q – энергия активации;

E – энергия реакции;

K'' – коэффициент, учитывающий функцию концентрации.

После преобразования уравнения (4.9) получим выражение для определения долговечности (срока службы) покрытия [113]:

$$\tau = \frac{\ln \sigma_0 - \ln \sigma_p}{K'' \cdot e^{-\frac{Q}{E}}}, \quad (4.10)$$

где K'' – коэффициент, определяемый по наклону линии, как $tg \alpha$.

При оценке эффективности фильтрующих свойств используем соотношение коэффициентов фильтрации применяемого геокомпозитного материала и аналога:

$$\Theta = \frac{k_{\text{фгк}}}{k_{\text{фан}}}, \quad (4.11)$$

где $k_{\text{фгк}}$ – коэффициент фильтрации геокомпозитного материала, м/сут;

$k_{\text{фан}}$ – коэффициент фильтрации аналога, м/сут.

Надежность комбинированного материала обуславливается достаточно высокой прочностью при растяжении, составляющей при максимальной нагрузке не менее 45 кН/м, и относительным удлинением георешетки при максимальной нагрузке не более 15 %. Эффективность фильтрования через геотекстиль будет обеспечиваться коэффициентом фильтрации при давлении 2,0 кПа не менее 60 м/сут.

Геометрические размеры материала приняты следующими: ширина – 4,0 м, длина – 25,0 м, ширина выпусков геотекстиля по длине материала не менее 0,1 м.

Отбор проб и подготовка образцов для испытаний проводились в соответствии с ГОСТ Р 50275, поверхностная плотность – по ГОСТ Р 50277, прочность при растяжении и относительное удлинение – по ГОСТ Р 55030 (ширина образца не менее 200 мм, расстояние между зажимами не менее 100 мм), коэффициент фильтрации геотекстиля – по ГОСТ 52608.

Расчеты надежности геотекстильного дренажного материала проводились по формулам (4.6)–(4.9) при следующих исходных данных: $P_{\text{гр}} = 0,98$; $P_{\text{гт}} = 0,95$; $P_{\text{ос}} = 0,93$; $\rho_{H_i H_j} = 0,48$; 1,0; 0,95; 0,997; 0,999. Результаты расчетов надежности для шести вариантов представлены в таблице 4.3 [113].

Таблица 4.3 – Результаты расчета надежности геокомпозитного покрытия с учетом грунтового основания

Состав элементов покрытия	$P_{\text{гр}}$	$P_{\text{гт1}}$	$P_{\text{гт2}}$	$P_{\text{ос}}$	$\rho_{H_i H_j}$	K_N	$P_{\text{ГК}}$
Независимый гр + гт + ос	0,98	0,95	–	0,93	–	–	0,87
Зависимый гр + гт + ос	0,98	0,95	–	0,93	0,48	0,106	0,882
Зависимый гр + гт + ос	0,98	0,95	–	0,93	1,0	0,33	0,89
Независимый гт 1 + гр + гт 2 + ос	0,98	0,95	0,95	0,93	–	–	0,82
Зависимый гт 1 + гр + гт 2 + ос	0,98	0,95	0,95	0,93	0,48	0,053	0,826
Зависимый гт 1 + гр + гт 2 + ос	0,98	0,95	0,95	0,93	1,0	0,167	0,838

Примечание: гр – грунт; гт – геотекстиль; ос – основание; гт 1 – первый слой геотекстиля; гт 2 – второй слой геотекстиля; $P_{\text{гр}}$ – вероятность безотказной работы георешетки; $P_{\text{гт1}}$ – вероятность безотказной работы первого и второго ($P_{\text{гт2}}$) геотекстилей; $P_{\text{ос}}$ – вероятность безотказной работы основания; $\rho_{H_i H_j}$ – коэффициент корреляции; K_N – коэффициент статической взаимосвязи; $P_{\text{ГК}}$ – вероятность безотказной работы геокомпозита.

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии статистической связи надежность геокompозитного покрытия изменяется от 0,82 до 0,87, а при наличии статистической связи надежность материала для всех вариантов увеличивается, что соответствует структуре геокompозита, где георешетка скрепляется с геотекстилем путем термоскрепления.

Прогноз долговечности (или расчетного срока службы) разработанного геокompозитного покрытия выполним по зависимости (4.10) с учетом коэффициента старения материала (K_σ) по показателям его прочности при растяжении:

$$K_\sigma = \sigma_p / \sigma_0, \quad (4.12)$$

где σ_p – прочность при растяжении за период времени t , кН/м;

σ_0 – прочность при максимальной нагрузке, кН/м.

Для проведения расчетов примем следующие исходные данные: $\sigma_0 = 45$ кН/м, $\sigma_p = 22,5$ кН/м, значения коэффициента $K'' = 0,0280 - 0,0073$, коэффициент старения $K_\sigma = 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90$, $Q/E = 0,85; 0,75; 0,65; 0,55$.

По данным расчетов построен график изменения коэффициента старения материала (K_σ) от долговечности (срока службы, τ) и отношения Q/E (рисунок 4.3).

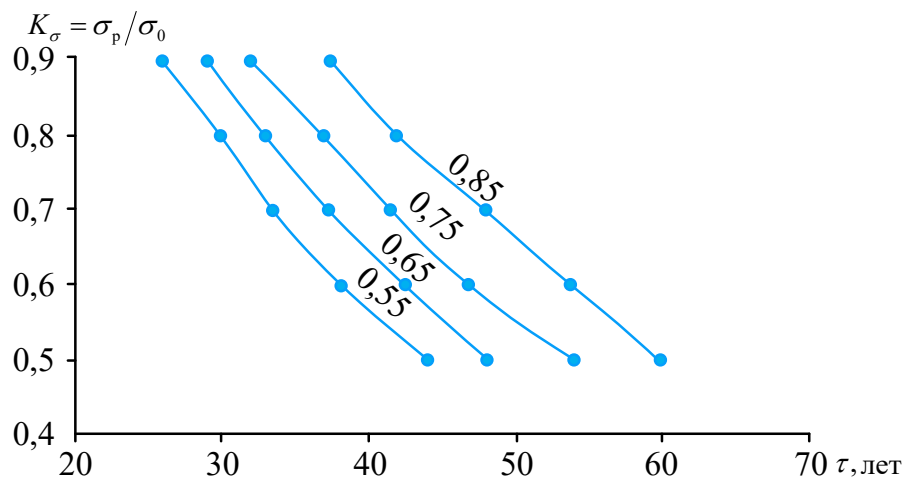


Рисунок 4.3 – График изменения коэффициента старения K_σ от долговечности (срока службы) геокompозитного материала [113, 284]

Анализ полученных данных на графике позволяет определить прогнозный срок службы геокompозитного покрытия в зависимости от коэффициента старения применяемых материалов, который изменяется от 25 (при $K_\sigma = 0,90$)

до 43 лет (при $K_\sigma = 0,50$) для кривой $Q/E = 0,55$ и от 37 (при $K_\sigma = 0,90$) до 60 лет (при $K_\sigma = 0,50$) для кривой $Q/E = 0,85$. Полученные результаты по остальным кривым характеризуют значения срока службы τ в диапазоне между граничными кривыми $Q/E = 0,55$ до $0,85$.

4.4 Результаты оценки долговечности облицовок каналов из геосинтетических бентонитовых материалов

Расчет долговечности противодиффузионного экрана из геосинтетических бентонитовых материалов на ДМК выполним по формуле, полученной ранее с участием автора [107] на основе одного из уравнений теории надежности – уравнения Райса [124].

$$\tau\{P\} = \frac{(-\ln P_{\text{бм}})}{\bar{\nu}_{\text{п}}} \cdot \exp\left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_\tau/K_\sigma)]^2}{2m_{\Pi\tau}^2}\right], \quad (4.13)$$

где $\tau\{P\}$ – срок службы экрана из геосинтетического бентонитового материала, лет;

$P_{\text{бм}}$ – вероятность безотказной работы бентонитового материала;

$\bar{\nu}_{\text{п}}$ – средняя частота выбросов за средний уровень допускаемой поврежденности экранов, определяемая как:

$$\bar{\nu}_{\text{п}} = n_0/\tau_0, \quad (4.14)$$

где n_0 – число повреждений, превышающее допустимое значение;

$\Pi_{\text{доп}}$, Π_τ , – соответственно, повреждаемость бентонитового покрытия допускаемая и по данным наблюдений за время эксплуатации τ , лет;

$m_{\Pi\tau}$ – среднеквадратическое отклонение поврежденности покрытия;

K_σ – коэффициент старения ПФЭ, определяется по зависимости:

$$K_\sigma = \sigma_\tau/\sigma_0, \quad (4.15)$$

где σ_τ , σ_0 – прочность материала (кН/м) за время эксплуатации τ ;

σ – нормативная (паспортная) прочность материала, кН/м.

Исходные данные для расчета примем следующими: период эксплуатации, после которого проводится оценка срока службы, $\tau_0 = 25$ лет; вероятность безотказной работы экрана из бентонитового материала $P_{\text{бм}} = 99$; средняя частота выбросов за средний уровень допускаемой поврежденности экрана из бентонитового материала, $\bar{v}_{\text{п}} = N_0/\tau_0$ (где N_0 – число повреждений, превышающее допустимое значение за время эксплуатации τ_0); $\Pi_{\text{доп}}$, Π_{τ_0} – повреждаемость экрана допустимая и по данным наблюдений за время эксплуатации τ_0 ; $m_{\Pi\tau}$ – среднеквадратическое отклонение поврежденности экрана; $K_{\sigma} = \sigma_{\tau}/\sigma_0$ – коэффициент старения бентонитового материала (где σ_{τ_0} – прочность при растяжении материала, кН/м, после эксплуатации в течение времени τ_0 , лет; σ_p – прочность при растяжении, кН/м (первоначальная, по паспортным данным)).

Принимая $\Pi_{\text{доп}} = 5,1 \cdot 10^{-12}$; $\Pi_{\tau} = 2,3 \cdot 10^{-12}$; $k_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{10}{12} = 0,83$; $v_{\text{п}} = N_0/\tau_0 = 1/25 = 0,04$; $P = 0,99$ (максимальное значение) по формуле (4.13) определим прогнозный срок службы противифльтрационного экрана из бентонитового материала отечественного производства при $\Pi_{\tau} = 2,3 \cdot 10^{-12}$:

$$\tau = \frac{(-\ln 0,99)}{0,04} \cdot \exp \left[\frac{[5,1 \cdot 10^{-12} - (2,3 \cdot 10^{-12}/0,83)]^2}{2 \cdot 0,484 \cdot (10^{-12})^2} \right] = 0,25 \cdot \exp \left[\frac{5,42 \cdot (10^{-12})^2}{0,968 \cdot (10^{-12})^2} \right] = 68,17 \text{ лет.}$$

По результатам выполненного расчета прогнозный срок службы противифльтрационного покрытия канала, выполненного из геосинтетических бентонитовых материалов отечественного производства, будет составлять 68,17 лет.

4.5 Сравнительный анализ надежности и долговечности различных типов противифльтрационных покрытий каналов

Используя полученные данные расчетов эффективности и эксплуатационной надежности противифльтрационных покрытий, выполним сравнительный анализ различных ПФЭ, наиболее часто применяемых на оросительных каналах.

В качестве критерия эффективности противифльтрационных покрытий при сравнении будем использовать осредненный коэффициент фильтрации, расчи-

танный по теоретическим формулам, полученным методами теории фильтрации (методом конформных отображений и годографа скорости).

Сравнивая значение осредненного коэффициента фильтрации бетонной облицовки с допускаемым значением, видим, что расчетное значение получено больше, чем допускаемое ($k'_{обл} = 2,13 \cdot 10^{-5}$ м/с $>$ $k'_{обл.нор} = 0,55 \cdot 10^{-6}$ м/с), т.е. необходимое условие эффективности не выполняется. Это обусловлено сравнительно большой водопроницаемостью бетонной облицовки, которая превышает допускаемый коэффициент фильтрации в 2,6 раз.

Сводные результаты расчета надежности и долговечности различных типов противофильтрационных покрытий каналов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета надежности и долговечности различных типов противофильтрационных покрытий оросительных каналов

Наименование показателя эффективности и надежности	Тип противофильтрационной облицовки канала			
	бетонная	бетонопленочная с геомембраной	грунтопеночная с геомембраной	из бентонитовых материалов (по [88])
1. Осредненный коэффициент фильтрации облицовки, $k'_{обл}$, м/с	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$0,215 \cdot 10^{-10}$	$0,1 \cdot 10^{-10}$	$0,5 \cdot 10^{-11}$
2. Допускаемый коэффициент фильтрации, $k'_{обл.доп}$, м/с	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,372 \cdot 10^{-6}$	$0,372 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-11}$
3. Вероятность безотказной работы, $P(t)$	0,92	0,95	0,94	0,98
4. Вероятность отказа облицовки, $Q(t)$	0,05	0,01	0,01	0,005
5. Срок службы облицовки, $\tau_{обл}$, лет	35,5	61,3	75,7	68,2

При сравнении данных по эффективности бетонной облицовки с бетонопленочной (включающей в качестве ПФЭ полимерную геомембрану) убеждаемся в том, что последняя имеет меньшую водопроницаемость в $1 \cdot 10^4$ раз, а, следовательно, эффективность бетонопленочной облицовки выше бетонной в 10–100 [194]. Такая высокая эффективность бетонопленочной облицовки с геомембраной объясняется увеличением ее гидроизоляционных свойств за счет приме-

нения противofильтрационного элемента, который характеризуется более высокой (по сравнению с полиэтиленовой пленкой) сопротивляемостью к прокалыванию и другим повреждениям.

Еще большая эффективность получена для грунтопленочной облицовки с геомембраной, и, по сравнению с бетонной облицовкой, составляет $4,26 \cdot 10^6$ раз. Анализ результатов расчета таблицы 4.4 показывает, что наибольшая эффективность и надежность получена для облицовки из бентонитовых материалов: по коэффициенту фильтрации – $0,5 \cdot 10^{-11}$ м/с, по вероятности безотказной работы – 0,995, по вероятности отказа облицовки – 0,005. Прогнозный срок службы такого противofильтрационного покрытия (согласно проведенному расчету [88]) составляет 130 лет, что в 3,6 раза превышает осредненный срок службы бетонной облицовки, в 2,1 раза бетонопленочной и в 1,7 раза грунтопленочных облицовок, выполняемых с геомембранами.

Вероятность безотказной работы и отказа противofильтрационного бентонитового покрытия (при длине канала $L_k = 10000$, количестве повреждений $N_0 = 1000$ и $n(t) = 5$) определялась по выражениям (4.4) и (4.5) и составили $P_{\text{бм}} = 0,995$, $Q_{\text{бм}} = 0,005$.

4.6 Результаты расчета эффективности геосинтетических покрытий в сравнении с альтернативными вариантами

Расчетное сопоставление процесса фильтрации для различных типов противofильтрационных покрытий при наличии исходных данных выполним на примере участка Донского магистрального канала (Ростовская область), где в сложных инженерных условиях в 2018–2020 гг. производилась реконструкция, включающая проведение противofильтрационных мероприятий.

Расчетная схема сечения ДМК с противofильтрационным экраном приведена на рисунке 4.4.

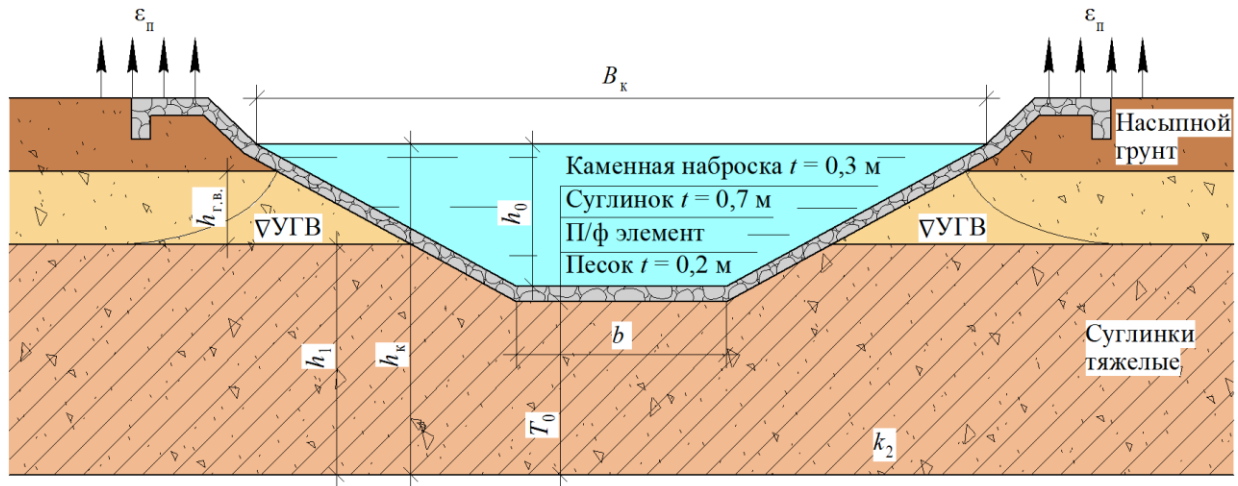


Рисунок 4.4 – Расчетная схема сечения оросительного канала:

B_k – ширина канала по урезу воды, м; T_0 – мощность подстилающего основания до более проницаемого слоя, м; h_0 – глубина воды в канале, м; ε_n – интенсивность испарения с поверхности земли, м/сут; b – ширина канала по дну, м; h_k – глубина от уровня воды в канале до водоупора, м; h_1 – глубина грунтовых вод, м; $h_{г.в.}$ – глубина залегания УГВ, м; k_2 – коэффициент фильтрации грунта основания, м/сут; z_0 – критическая глубина испарения, м

Последующие расчеты для 2-го участка ДМК выполнялись при следующих исходных данных: $T=12,94$ м; $\bar{h}_k=4,78$ м; $\Phi_k=5,30$ м; $\Phi_{экр}=7,86$ м; $z_0=4,0$ м; $\varepsilon_n=0,0033$ м/сут; $k_2=0,97$ м/сут; $\delta_{экр}=0,7$ м; для бентонитовых материалов $k_{экр}=8,64 \cdot 10^{-10}$ м/сут; для экрана из геомембраны $k_{экр}=8,64 \cdot 10^{-4}$ м/сут.

Расчет фильтрации (q_k , м²/сут) с противofильтрационным экраном (вариантами экранов) выполним по следующей формуле:

$$q_k = T \frac{\bar{h}_k}{\Phi_k + \Phi_{экр} + \sqrt{Tz_0 / \varepsilon_n}}, \quad (4.16)$$

где \bar{h}_k – разность уровней воды в канале и грунтовых вод, м;

Φ_k – фильтрационное сопротивление, обусловленное гидродинамическим не совершенством канала, м;

$\Phi_{экр}$ – фильтрационное сопротивление экрана, м.

Вычислим фильтрационное сопротивление экрана по соотношению:

$$\Phi_{экр} = \frac{k_2}{k_{экр}} \cdot \delta_{экр}, \quad (4.17)$$

где $k_{экр}$ – коэффициент фильтрации экрана (для различных вариантов), м/с;

$\delta_{\text{экр}}$ – толщина защитного слоя экрана, м.

Полный удельный расход на фильтрацию ($Q_{\phi_{\text{экр}}}$, м²/сут) из оросительного канала определяем по формуле:

$$Q_{\phi_{\text{экр}}} = 2 \cdot q_k, \quad (4.18)$$

Эффективность (\mathcal{E}) от применения экрана будет определяться как:

$$\mathcal{E} = \frac{Q_{\phi_{\text{земл}}}}{Q_{\phi_{\text{экр}}}}, \quad (4.19)$$

где $Q_{\phi_{\text{земл}}}$ – полный удельный расход на фильтрацию из канала в земляном русле (до реконструкции), м²/сут.

$Q_{\phi_{\text{экр}}}$ – полный удельный расход на фильтрацию из канала при наличии противофильтрационного экрана (варианты: из бентонитового материала; плечного экрана; геомембраны; глинистого уплотненного экрана), м²/сут.

В качестве критериев эффективности проектного варианта экрана по сравнению с альтернативным приняты два критерия N_1 и N_2 :

$$N_1 = \mathcal{E}_{\text{пр}} / \mathcal{E}_{\text{альт}}, \text{ раз}; \quad (4.20)$$

$$N_2 = \Phi_{\text{экр.пр}} / \Phi_{\text{экр.альт}}, \text{ раз}, \quad (4.21)$$

где $\mathcal{E}_{\text{пр}}$, $\mathcal{E}_{\text{альт}}$ – эффективность применения проектного альтернативного вариантов.

Далее сравним эффективность проектного варианта противофильтрационного экрана с другими, выбранными в качестве альтернативных. Проектным вариантом был выбран противофильтрационный экран из геосинтетических бентонитовых материалов [88, 168]. Другими альтернативными вариантами, которые рассматривались для условий ДМК, были: пленочный экран из полиэтиленовой пленки; экран из полимерной геомембраны и глинистый уплотненный экран.

Под эффективностью рассматриваемого варианта экрана будем понимать противофильтрационный эффект, который достигается за счет сравнения рассматриваемых вариантов покрытий и земляного русла (без устройства облицовки). В представленных выше пунктах эффективность рассматриваемого варианта экрана оценивается величиной \mathcal{E} и по существу представляет кратность эффекта достигаемого варианта экрана по снижению потерь воды на фильтрацию из ДМК.

По результатам расчета варианта 1 (бентонитового экрана) получено, что его эффективность на 2-м участке канала будет выше, чем на 1-м в 1,9 раза, и составит $\Theta = 5,06 \cdot 10^6$. Сравнивая эффективность пленочного экрана на 2-м и 1-м участках получим более эффективный вариант пленочного экрана на 2-м участке в 1,16 раз.

Аналогичные расчеты были выполнены и для 1-го участка того же канала (на ПК 108+62 – ПК 112+94). В таблице 4.5 приведены сводные результаты сравнения эффективности проектного и альтернативных вариантов конструкций противофильтрационных экранов оросительного канала (для 1-го и 2-го участка реконструкции ДМК). Анализ результатов расчета на 1-м участке в таблице 4.5 показывает, что наименьшее значение показателя эффективности составляет 6,04 для пленочного экрана, что свидетельствует о малой степени эффективности данного типа облицовки. Это объясняется высокой повреждаемостью полиэтиленовой пленки из-за малой ее толщины (0,1–0,2 мм) и недостаточным сопротивлением прокалывания твердыми частицами грунта.

Сравнение критериев эффективности проектного варианта по отношению к альтернативным вариантам N_1 и N_2 показывает, что они применительно к ДМК составляют не менее, чем 10^4 (т. е. проектный вариант из геосинтетических бентонитовых материалов по эффективности превышает на четыре порядка все альтернативные варианты противофильтрационных покрытий).

Анализ результатов расчета на втором участке ДМК (см. таблицу 4.5) свидетельствует об увеличении значений показателя N_1 , по сравнению с 1-м участком, для всех трех альтернативных вариантов в 1,65 раз, что объясняется изменением некоторых расчетных параметров и характеристик, а именно $h_k = 12,08$ м, $h_1 = 7,30$ м, $h_{г.в} = 4,78$ м, $k_2 = 0,97$ м/сут. Так как коэффициент фильтрации грунта k_2 увеличился по отношению $k_1 = 0,64$ м/сут в 1,5 раз, это, в основном, и привело к увеличению противофильтрационной эффективности проектного варианта экрана по критерию N_1 . В то же время необходимо отметить, что критерий эффективности N_2 остался неизменным, согласно которому эффективность проектного варианта как для 1-го, так и для 2-го участков ДМК составляет не менее четырех порядков ($1 \cdot 10^4$ раз).

Таблица 4.5 – Сводные результаты сравнения эффективности проектного и альтернативных вариантов противofильтрационных экранов на участке ДМК

Вариант противofильтрационного экрана	Коэффициент фильтрации экрана, $k_{\text{экр}}$, м/с	Фильтрационное сопротивление экрана, $\Phi_{\text{экр}}$, м	Удельные потери на фильтрацию из канала, $Q_{\text{ф}}$, м ² /сут	Эффективность применения экрана, \mathcal{E}	$N_1 = \frac{Q_{\text{ф.зем}}}{Q_{\text{ф.обл}}}$ или $N_1 = \frac{Q_{\text{ф.зем}}}{Q_{\text{ф.альт}}}$	$N_2 = \frac{\mathcal{E}_{\text{обл}}}{\mathcal{E}_{\text{альт}}}$	$N_3 = \frac{\Phi_{\text{обл}}}{\Phi_{\text{альт}}}$
Первый участок (ПК 108+62 – ПК 112+94)							
Проектный вариант – экран из бентоматов	10^{-14}	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$5,06 \cdot 10^6$	$5,06 \cdot 10^6$	–	–
Альтернативный вариант							
Пленочный экран	10^{-8}	520	0,109	6,0	6,0	$8,3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
Экран из геомембраны	10^{-10}	51800	0,00130	506,0	$5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Глинистый уплотненный экран	$1,21 \cdot 10^{-10}$	4290	0,00151	427,0	$4,3 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
Второй участок (ПК113+40 – ПК134+93,05)							
Проектный вариант – экран из бентоматов	10^{-14}	$7,86 \cdot 10^8$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$6,02 \cdot 10^6$	$6,02 \cdot 10^6$	–	–
Альтернативный вариант							
Пленочный экран	10^{-8}	786	0,135	7,02	7,02	$8,5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
Экран из полимерной геомембраны	10^{-10}	$7,86 \cdot 10^4$	0,00157	604,0	$6,04 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$
Глинистый уплотненный экран	$1,21 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^4$	0,00190	499,0	$4,9 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$

Примечание – N_1 – критерий эффективности по фильтрационным расходам; N_2 – критерий эффективности по степени эффекта облицовки, по сравнению с альтернативными вариантами; N_3 – критерий эффективности по фильтрационным сопротивлениям облицовки, по сравнению с альтернативными вариантами; $\Phi_{\text{экр.пр}}$, $\Phi_{\text{экр.альт}}$ – фильтрационные сопротивления проектного варианта экрана и альтернативного варианта; удельные потери на фильтрацию из канала в земляном русле составляют $Q_{\text{ф.зем}} = 0,658$ м²/сут.

Анализ результатов расчетной оценки в таблице 4.5 свидетельствует о том, что по критерию эффективности N_1 экран из бентонитовых материалов (для 1-го участка) превышает земляное русло в $5 \cdot 10^6$ раз, а альтернативные варианты (по сравнению с земляным руслом) – от 6 до 500 раз. По критерию N_2 облицовка из бентонитовых материалов превышает все альтернативные варианты от $1 \cdot 10^4$ до $8,3 \cdot 10^5$ раз, по критерию N_3 , соответственно, от $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^6$ раз. Таким образом, по всем критериям получена высокая эффективность облицовки из бентонитовых материалов, что характеризует ее высокие противодиффузионные свойства. На рисунке 4.5 приведена гистограмма распределения показателей эффективности различных противодиффузионных покрытий применительно к ДМК.

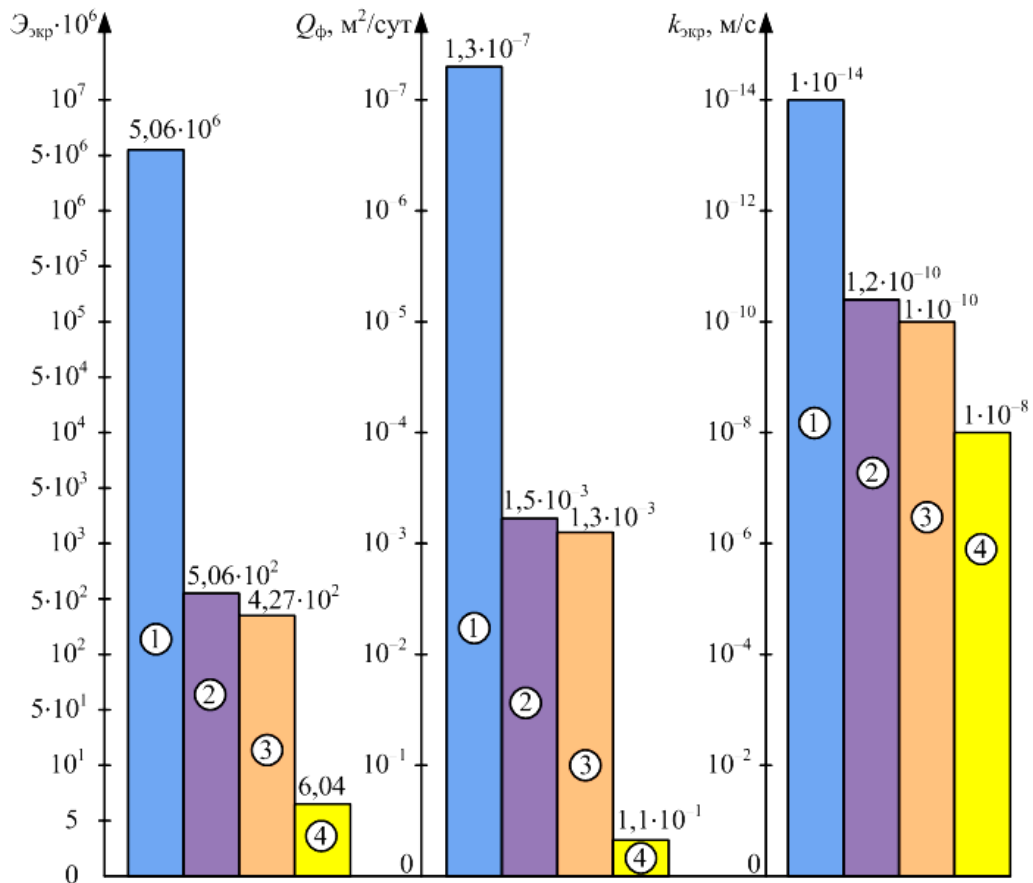


Рисунок 4.5 – Гистограмма распределения показателей эффективности различных покрытий для условий ДМК:

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

На рисунках 4.6 и 4.7 представлены результаты исследований долговечности (срока службы) экрана с геомембраной из полиэтилена HDPE толщиной 1,0 мм в испытательном бассейне, где образцы материалов находились в разных условиях.

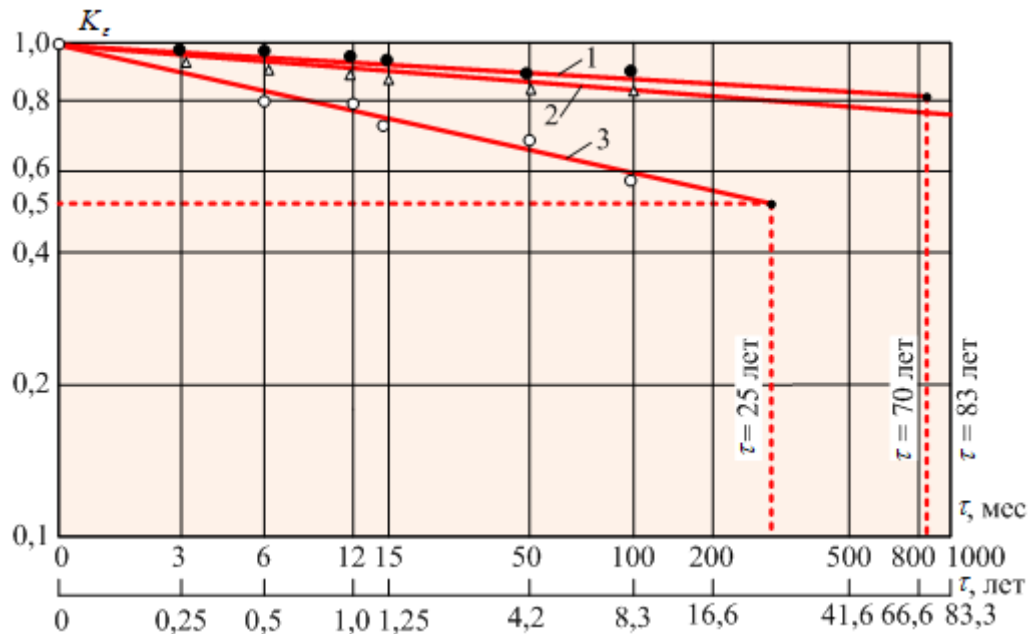


Рисунок 4.6 – Изменение коэффициента старения полимерных геомембран по относительному удлинению при разрыве в различных условиях [253]:
 1 – под водой; 2 – непосредственное атмосферное воздействие при $t = -20 + 30$ °С;
 3 – защитное покрытие из грунта толщиной 0,5 м (при $t = -15 + 20$ °С)

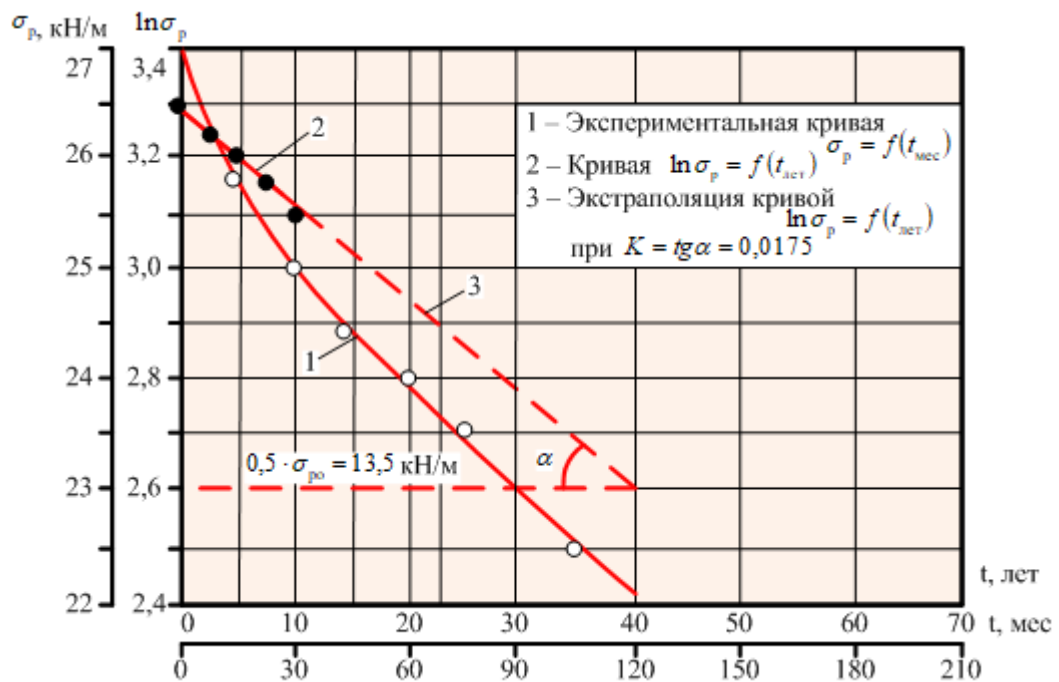


Рисунок 4.7 – График изменения прочности геомембраны при разрыве в зависимости от времени наблюдения [253]

Как показали исследования коэффициента старения образцов геомембран $K_\varepsilon = \varepsilon_\tau / \varepsilon_0$ (где ε_0 – начальное значение относительного удлинения геомембраны при разрыве, %; ε_τ – относительное удлинение (%) после экспонирования в течение времени τ , лет) на графике в логарифмических координатах (см. рисунок 4.6) в течение 10 лет и дальнейшее их экстраполирование, срок службы геомембраны, находящейся под водой, составил 70 лет, а под защитным покрытием из грунта – 83 года. При непосредственном атмосферном воздействии (ультрафиолетовом излучении) кривая 3 характеризуется значительным падением значений K_ε с пересечением предельной линии с $K_\varepsilon = 0,5$ при $\tau = 25$ лет.

На рисунке 4.7 построена экспериментальная кривая 1 – изменения прочности геомембраны при разрыве $\sigma_p = f(\tau_{\text{мес.}})$, которая пересекает ось абсцисс при $t = 120$ мес. или 10 лет, кривая 2 $\ln \sigma_p = f(\tau_{\text{мес.}})$ построена в другом масштабе времени для наглядности, на верхнем участке по результатам испытаний геомембраны под защитным покрытием из грунта, а на нижнем – экстраполирована в виде прямой в полулогарифмическом масштабе. Эти данные используем для дальнейшего расчета срока службы по уравнению Аррениуса (4.9) [225].

После преобразования уравнения (4.9) получим выражение для определения срока службы:

$$\tau = \frac{\ln \sigma_{p0} - \ln \sigma_p}{K'' \cdot e^{\frac{Q}{E}}}, \quad (4.22)$$

где K'' – коэффициент, определяемый по наклону линии 3, как $\text{tg} \alpha$:

$$K'' = \text{tg} \alpha = \frac{3,3 - 2,6}{40} = 0,0175.$$

Подставляя найденное значение в уравнение (4.22), получим величину срока службы геомембраны по уравнению Аррениуса:

$$\tau = \frac{3,3 - 2,6}{0,0175 \cdot e^{-0,65}} = \frac{0,7}{0,0175 \cdot (1/1,912)} = 76,5 \text{ лет,}$$

где принято отношение $\frac{Q}{E} = 0,65$.

Полученное по уравнению Аррениуса значение прогнозного срока службы противофильтрационного экрана из полимерной геомембраны $\tau = 76,5$ лет близко соответствует данным, представленным на рисунке 4.8, при наличии воды или защитного покрытия из грунта на облицовке оросительного канала.

Сравнительная оценка эффективности трех типов противофильтрационных экранов (применительно к условиям ДМК) представлена на рисунке 4.8.

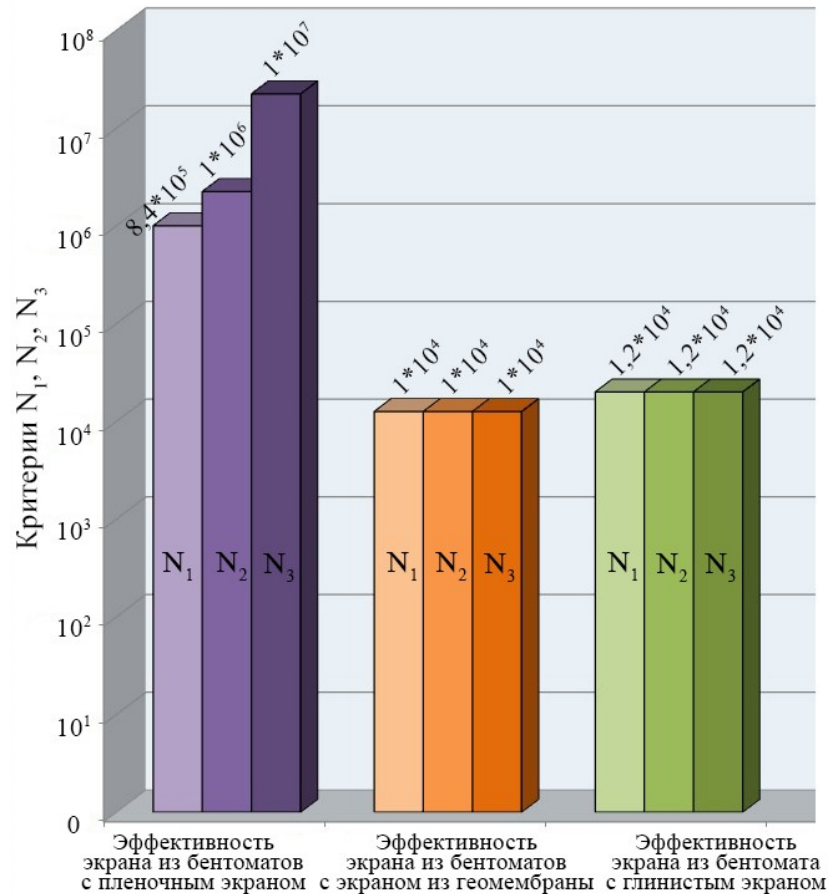


Рисунок 4.8 – Сравнительная оценка эффективности вариантов противофильтрационных экранов

Примеры расчетов эффективности и эксплуатационной надежности противофильтрационных покрытий оросительных каналов из геосинтетических материалов представлены в приложении Г диссертации.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. На основе обобщения отечественного и зарубежного опыта применения геосинтетических бентонитовых материалов предложены критерии их технической эффективности, включающие критерии по следующим параметрам: эффективность конструкции; фильтрационные сопротивления и коэффициенты фильтрации, а также показатели надежности, состоящие из критериев вероятности безотказной работы и вероятности отказа противofильтрационного элемента в конструкции покрытия канала.

2. Для обеспечения надежности работы противofильтрационного экрана из геосинтетических бентонитовых материалов на оросительных каналах разработана структурная схема, которая учитывает ряд мероприятий, выполняемых при строительстве облицовок, с разделением противofильтрационной конструкции на основные элементы: пригрузочный слой (из каменной наброски), защитное покрытие (из суглинка), противofильтрационный элемент (из геосинтетических бентонитовых материалов) и подстилающий слой (из песка или супеси).

3. Проведенная оценка надежности экрана из геосинтетических бентонитовых материалов с использованием формулы вероятности безотказной работы показала, что высокая надежность противofильтрационного покрытия канала будет обеспечена при количестве участков обследования более $N_0 > 2$ с вероятностью безотказной работы $P(t) \geq 0,90 - 0,98$.

4. Анализ полученных данных по результатам расчетной оценки конструкции экрана с использованием геокомпозитного материала для оросительного канала позволил определить прогнозный срок его службы в зависимости от коэффициента старения материала, который изменяется от 25 лет (при $K_\sigma = 0,90$) до 43 лет (при $K_\sigma = 0,50$) для кривой $Q/E = 0,55$ и от 37 лет (при $K_\sigma = 0,90$) до 60 лет (при $K_\sigma = 0,50$) для кривой $Q/E = 0,85$. По остальным полученным кривым

значения срока службы (τ) определено в диапазоне между граничными условиями в диапазоне $Q/E = 0,55$ до $Q/E = 0,85$.

5. Выполненная расчетная оценка эффективности облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов и альтернативных вариантов свидетельствует о том, что по критерию эффективности N_1 покрытие из бентоматов превышает земляное русло в $5 \cdot 10^6$ раз, а альтернативные варианты – от 6 до 500 раз. По критерию N_2 геосинтетическая облицовка превышает все альтернативные варианты от $1 \cdot 10^4$ до $8,3 \cdot 10^5$ раз, а по критерию N_3 , соответственно, от $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^6$ раз. Таким образом, по всем критериям получена высокая оценка эффективности покрытия канала из геосинтетического бентонитового материала, что характеризует его высокие противofильтрационные свойства.

6. Выполненные расчеты долговечности позволили определить прогнозный срок службы противofильтрационных покрытий оросительных каналов, выполняемых с применением геосинтетических материалов (геомембран и бентонитовых покрытий). Осредненный срок службы противofильтрационного покрытия с использованием бентонитового материала отечественного производства по результатам расчета составляет 68,1 лет. Что касается противofильтрационных покрытий с использованием полимерных геомембран, то прогнозный срок службы определен в пределах от 61,3 до 75,7 лет в зависимости от применяемого типа защитного покрытия (бетона и грунта, соответственно). Данные значения соответствуют нормативному (рекомендуемому) сроку службы оросительных каналов различного назначения.

Глава 5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

5.1 Отбор образцов геосинтетических материалов для выполнения лабораторных исследований

Лабораторные исследования геосинтетических бентонитовых материалов проводились автором как для первичного сырья (изготовленного в производственных условиях), так и для эксплуатируемого (на протяжении восьми лет), образцы которого были изъяты на действующем оросительном канале и доставлены в специализированную аккредитованную лабораторию (свидетельство № 400/462 от 29.03.2016) по испытанию качества противofильтрационных материалов, г. Курган.

Отбор образцов геосинтетического материала на участке канала для испытания проводился в соответствии с ГОСТ ISO 9862-2014 «Материалы геосинтетические. Порядок отбора и подготовки образцов для испытаний» [69, 70].

Для исследования первичного сырья (противofильтрационного элемента из геосинтетических бентонитовых материалов) в процессе его заводского изготовления в различное время (а именно каждые 4 ч производства) отбиралось по шесть образцов материала из рулонов (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Отобранные при производстве образцы ПФЭ

Всего были выполнены испытания трех партий, состоящих из 18 образцов ПФЭ. Испытания проводились на оборудовании, прошедшем поверку, и имеющем соответствующие сертификаты на выполнение исследований.

Лабораторные исследования первичного сырья проводились как в целом для многослойного бентонитового материала, так и для отдельных составляющих его элементов (тканого и нетканого геотекстиля, противофильтрационного элемента из бентонита и полимерной геомембраны).

Отбор проб противофильтрационного элемента, эксплуатируемого в конструкции экрана на оросительном канале в течение восьми лет, проводился в весенний период, когда в канале отсутствовала вода. Отборы производились на трех участках, преимущественно на откосах в связи с наличием на дне канала дождевой воды. Места отбора проб были заделаны заплатами из аналогичного противофильтрационного элемента с нахлестом по 15 см с каждой из сторон и креплением двух полотнищ между собой при помощи скоб.

Общий вид участка облицовки канала, где проводились отборы проб, характеризуется незначительным зарастанием камышом и рогозом (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2 – Место отбора противофильтрационного элемента на участке оросительного канала

Конструкция противофильтрационного покрытия представляет собой экран, включающий: защитное покрытие из каменной наброски толщиной от 35 до 40 см, защитный слой из суглинка мощностью 25–30 см и противофильтрационный элемент из бентонитовых материалов (в гидратированном состоянии) толщиной от 0,52 до 0,59 см, уложенных на песчаную подготовку мощностью 2,1–2,4 см.

На рисунке 5.3 проиллюстрировано место отбора проб противофильтрационного материала, а также основные составляющие конструкции облицовки.

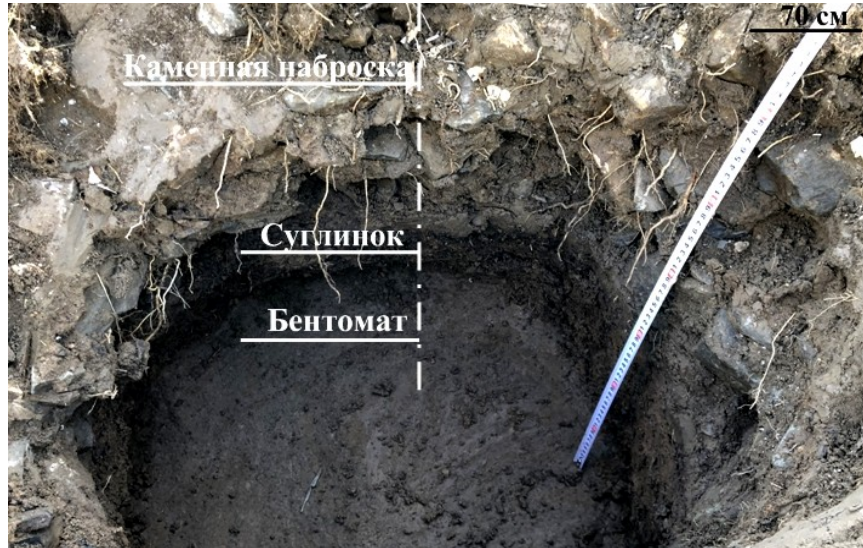


Рисунок 5.3 – Конструкция облицовки канала в разрезе

На рисунке 5.4 показан противофильтрационный элемент из бентонита в насыщенном водой (гидратированном) состоянии.



Рисунок 5.4 – Отбор проб геосинтетического материала на участке канала

Применяемый в конструкции облицовки противофильтрационный элемент (см. рисунок 5.4) выполнен с дублирующим слоем из геомембраны, а значит должен характеризоваться повышенной надежностью и водонепроницаемостью.

Образцы отобранных с участка канала материалов хранились при требуемой температуре и влажности воздуха, были доставлены в лабораторию для проведения испытаний физико-механических и фильтрационных характеристик.

5.2 Исследования разрывной нагрузки и удлинения при разрыве

5.2.1 Описание лабораторной установки и методика проведения исследований

С целью изучения количественных характеристик противофильтрационных элементов на растяжение и удлинение под нагрузкой, которые определяют способность материала противостоять касательному давлению грунта, уложенного на откосе или в основании, использовалась машина испытательная универсальная «AG», модель «ADS-X» (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Общий вид машины испытательной «ADS-X»

Методика проведения лабораторных испытаний заключается в следующем:

1. При проведении исследований подвижные элементы привода были закрыты кожухами.
2. Производим запуск испытательной машины. При выполнении исследований используем программу «Trapeziumx», в которой выбирается требуемый вид испытания с последующим отображением на экране персонального компьютера.
3. Производится подготовка образцов для испытания и поочередности каждый образец устанавливаем в зажим машины с последующим его закреплением.
4. Производим запуск испытательной машины и программного комплекса на персональном компьютере. Машина проводит испытание. Во время проведения испытания отображаются измеряемые величины и строятся графики.

5. После проведения испытания система рассчитывает результаты и отображает их в открывшемся окне на мониторе.

6. Далее производится автоматический возврат в исходную позицию. Устанавливаем следующий образец в испытательную машину. Повтор шагов от 8 до 11 для всех образцов противofильтрационного материала.

5.2.2 Экспериментальные исследования бентонитовых матов на раздир

Результаты выполненных лабораторных испытаний шести образцов бентонитовых матов на раздир (изготовленных из первичного сырья в день проведения исследований в заводских условиях) представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты испытаний ПФЭ из бентоматов на раздир

Номер образца/ параметр	Значение силы, Н	Значение силы напря- жения, Н/м	Усилие на отрыв, Н/м
1	36,8	368,1	368,000
2	47,5	475,4	475,000
3	65,2	652,0	652,000
4	36,7	366,8	367,000
5	46,0	460,3	460,000
6	44,3	443,3	443,000
Среднее значение	46,1	461,0	460,833
Стандартное отклонение	10,439	104,409	104,390

Осредненное значение усилия на отрыв по результатам испытания шести образцов ПФЭ составило 460,8 Н/м. Процесс проведения лабораторных испытаний проиллюстрирован рисунком 5.6.



Рисунок 5.6 – Испытания заводских бентонитовых материалов на раздир

На рисунке 5.7 представлен полученный график изменения силы к шести испытываемым образцам бентонитовых материалов из первичного сырья.

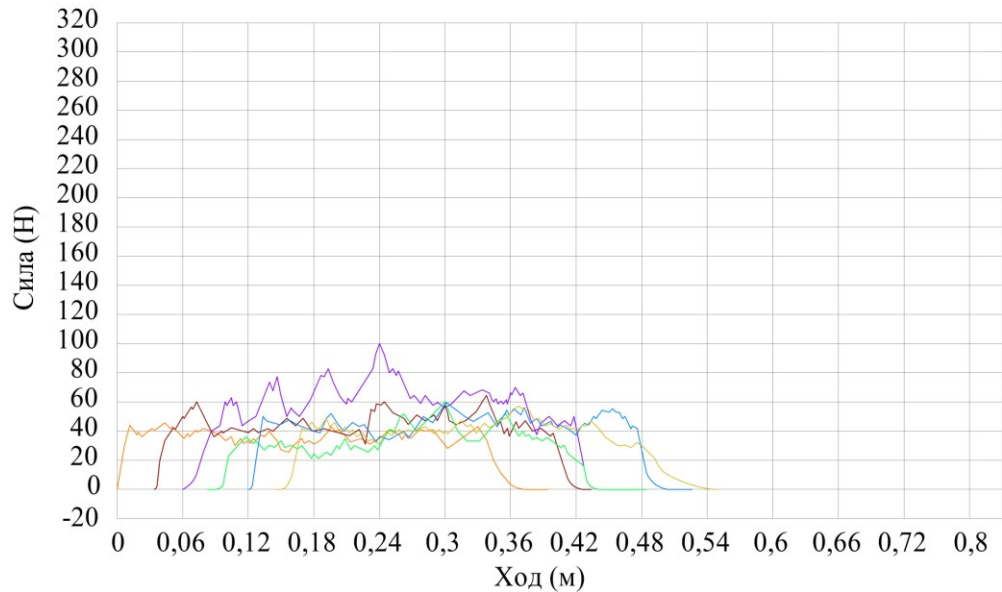


Рисунок 5.7 – График изменения силы к испытываемым образцам ПФЭ

Для эксплуатируемого на оросительном канале геосинтетического бентонитового материала были проведены аналогичные исследования. Предварительно изъятый на канале ПФЭ был разделен на образцы требуемой ширины и длины (в соответствии с ГОСТ) для проведения серии испытаний шести образцов (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Подготовленные к испытаниям образцы ПФЭ из «эксплуатируемых» бентонитовых материалов

В таблице 5.2 представлены результаты испытания на раздир эксплуатируемого ПФЭ из геосинтетического бентонитового материала.

Таблица 5.2 – Результаты испытания ПФЭ из эксплуатируемого бентонитового материала на раздир

Номер образца / параметр	Значение силы, Н	Значение силы напряжения, Н/м	Усилие на отрыв, Н/м
1	53,0	530,3	530,000
2	52,8	528,0	520,000
Среднее значение	52,9	529,2	529,000
Стандартное отклонение	0,141	1,626	1,414

Процесс испытания эксплуатируемого ПФЭ из бентонитового материала на раздир, ламинированного полимерной геомембраной, приведен на рисунке 5.9.



Рисунок 5.9 – Процесс испытания эксплуатируемого ПФЭ на раздир

Как видно из рисунка 5.9, противодиффузионный элемент (бентонитовая глина) находится в гидратированном (водонасыщенном) состоянии, в то время как заводское сырье производится, испытывается и поставляется на объект в гранулированном (или порошкообразном) виде. Несущее и покрывающее покрытие из геотекстиля заcolmатировано и характеризуется более низким коэффициентом фильтрации.

За счет процесса гидратации бентонита в конструкции экрана физико-механические характеристики противодиффузионного элемента отличаются от заводских и заявленных производителями.

График изменения силы на раздир отдельных слоев ПФЭ из геосинтетического бентонитового материала представлен на рисунке 5.10.

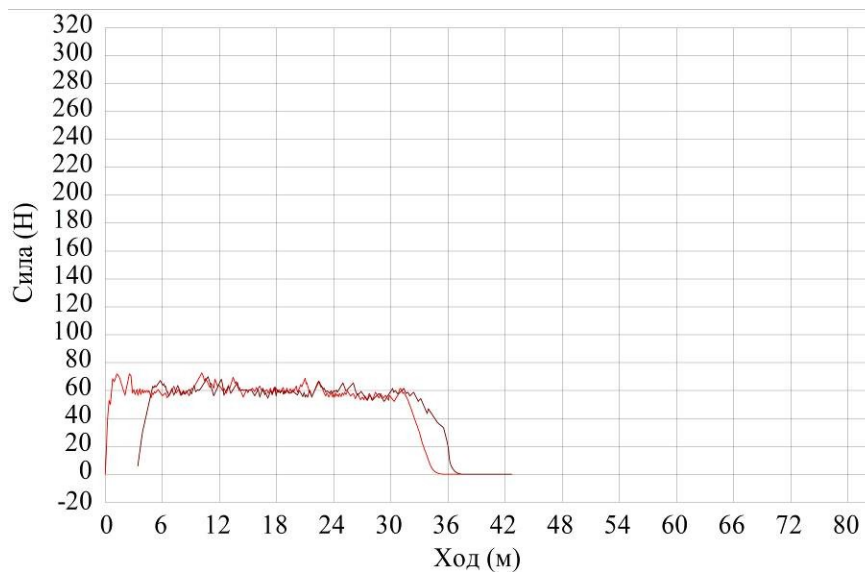


Рисунок 5.10 – График изменения силы испытываемых образцов эксплуатируемого ПФЭ

Образцы ПФЭ из бентонита и другие составляющие конструкцию экрана элементы (полимерная геомембрана, термоскрепленная с геотекстильными материалами) также были испытаны на относительное удлинение (растяжение). Процесс испытания проиллюстрирован на рисунке 5.11.



Рисунок 5.11 – Испытание ПФЭ, совмещенного с геомембраной

Полученные результаты испытания на относительное удлинение ламинированного геомембраной бентонитового материала представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты испытаний ПФЭ из ламинированного покрытия

Наименование / параметр	Предел прочности, кН/м	Максимальная деформация хода, %	Секущая жесткость, 2 %, кН/м	Секущая жесткость, 5 %, кН/м	Секущая жесткость, 10 %, кН/м
Бентомат 1	11,00	22,1	20,00	18,00	15,00
Бентомат 2	9,50	23,2	15,00	14,00	12,00
Бентомат 3	6,00	50,0	5,00	6,00	5,00
Среднее значение	8,83	31,8	13,33	12,67	10,67
Стандартное отклонение	2,565	15,800	7,637	6,110	5,131

На рисунке 5.12 показаны значения силы и деформации в процентном соотношении для испытываемого материала, термоскрепленного с геомембраной.

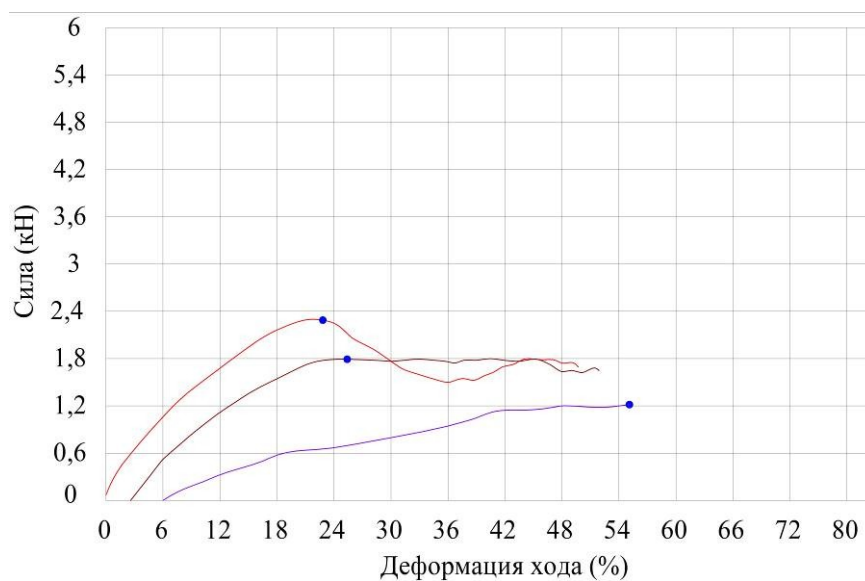


Рисунок 5.12 – График изменения силы и деформации испытываемого ПФЭ

Повышенные характеристики значений силы и усилия на отрыв объясняются наличием термоскрепленной с геотекстилем геомембраны. Поскольку в бентонитовых материалах верхний и нижние слои (из тканого и нетканого геотекстиля) воспринимают на себя наибольшую нагрузку в процессе эксплуатации (верхний – от защитных слоев из грунта и каменных материалов, нижний – при просадках и деформациях основания), они подлежали отдельным исследованиям на растяжение. Исследования проводились с учетом требований протокола испытаний на растяжении по ISO 10319-2015 [275].

Результаты лабораторных исследований для эксплуатируемого нетканого геотекстиля приведены в таблице 5.4, а для тканого – в таблице 5.5.

Таблица 5.4 – Результаты исследований нетканого геотекстиля

Наименование / параметр	Предел прочности, раст., кН/м	Макс. сила, кН	Макс. деформация хода, %	Секущая жесткость, 2 %, кН/м	Секущая жесткость, 5 %, кН/м	Секущая жесткость, 10 %, кН/м
Геотекстиль 1	2,2	0,440	77,6	0,8	0,6	0,4
Геотекстиль 2	2,1	0,447	77,2	0,8	0,6	0,45
Среднее значение	2,2	0,440	77,6	0,8	0,6	0,4

Таблица 5.5 – Результаты исследований тканого геотекстиля

Наименование / параметр	Предел прочности, раст., кН/м	Макс. деформация хода, %	Секущая жесткость, 2 %, кН/м	Секущая жесткость, 5 %, кН/м	Секущая жесткость, 10 %, кН/м
Геотекстиль 1	3,1	22,3	4,4	3,4	3,1
Среднее значение	3,1	22,3	4,4	3,4	3,1

Основное назначение геотекстильных материалов (тканого и нетканого) в составе геосинтетического бентонитового материала – создание каркаса для удержания бентонитовой глины, исключение ее вымыва в нижележащие слои, обеспечение водопроницаемости верхнего (покрывающего) слоя для проникновения жидкости в бентонитовую глину с целью ее гидратации, а также защита гидратированного слоя от деформаций.

5.3 Исследования коэффициента фильтрации бентонитовых матов

5.3.1 Описание лабораторной установки и методика проведения исследований

Основным показателем противofильтрационных элементов, используемых в качестве противofильтрационных устройств, являются показатели коэффициента фильтрации и интенсивности потока, характеризующие способность материала удерживать воду. Для проведения исследований геосинтетических бентонитовых материалов (без ламинации) использовался пермеаметр жидкостный с ручным управлением, модель «GCLT-1».

Общий вид лабораторной установки проиллюстрирован рисунком 5.13.

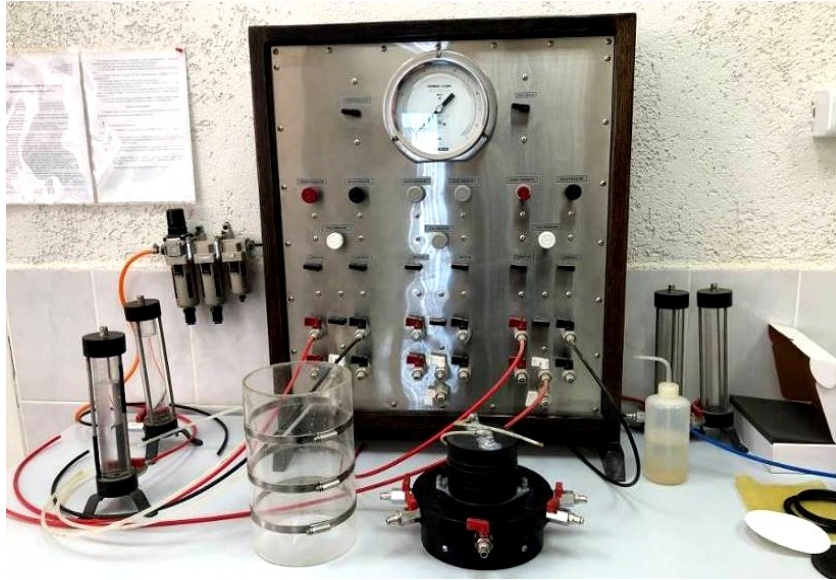


Рисунок 5.13 – Лабораторная установка (пермеаметр жидкостный)

Методика проведения испытаний заключается в нижеследующем.

1. Вырезается из фильтрованной бумаги 4 диска диаметром 100 ± 2 мм.
2. Выполняется сборка пермеаметра в следующей последовательности:
 - смачиваются дистиллированной водой пористые диски пермеаметра и диски из фильтрованной бумаги;
 - на нижнюю платформу камеры устанавливаются последовательно пористый диск, два диска фильтровальной бумаги, испытуемый образец (бentonитовый геосинтетический материал), два диска фильтровальной бумаги, пористый диск и верхняя платформа;
 - с помощью натяжного кольца натягивается материал на собранную систему и вакуумным насосом откачивается воздух из собранной системы;
 - при помощи резиновых колец плотно закрепляется материал на верхней и нижней платформе;
 - прочно закрепляются трубки подачи и отвода воды на верхней платформе;
 - устанавливается прозрачный корпус на основание камеры пермеаметра с уплотнителем и накрывается крышкой с уплотнительным кольцом;
 - при помощи стяжных винтов жестко фиксируется крышка камеры с основанием.

3. Собранная камера пермеаметра заполняется дистиллированной водой до уровня, превышающего на 30–50 мм уровень верхней платформы. Заполняются резервуары притока и оттока воды пермеаметра дистиллированной водой на $3/4$ объема. Подключаются трубки резервуаров подвода/отвода воды к камере пермеаметра. Подключается к панели пермеаметра напорная система для создания необходимого давления при испытании.

4. До начала испытаний измеряется масса вырезанных образцов с дискретностью 0,1 г.

5. В камере пермеаметра создается давление 110 кПа, а в резервуарах воды – 70 кПа.

6. Открываются вентили подача воды на резервуарах и камере пермеаметра. Стравливается воздух путем открытия вентилей сброса воды на камере пермеаметра. По окончании стравливания воздуха закрываются вентили сброса воды.

7. Постепенно увеличивается давление в камере до 550 кПа и в резервуарах до 515 кПа в течение 30 с. Поддерживается давление в камере 550 кПа и в резервуарах 515 кПа в течение 48 ч для увлажнения и насыщения образца.

8. Через 48 ч увеличивается давление в резервуаре таким образом, чтобы перепад давления на противоположных сторонах образца составлял $15,0 \pm 0,5$ кПа, а давление притока в резервуаре – 530 кПа.

9. Регистрируется в протоколе испытания дата и время начала испытаний, начальные уровни воды в резервуарах в миллиметрах с дискретностью 1 мм.

10. Показания уровней воды в резервуарах регистрируются в протоколе испытания не реже 1 раза в 8 ч вместе с датой и временем измерений.

11. Определяются потери напора через образец с точностью ± 10 %. Для испытаний с убывающим напором перепад давлений не должен быть меньше 10 кПа. Значение перепада давлений для двух последовательных показаний не должно превышать ± 20 %.

12. Испытания завершаются при соблюдении следующих критериев:

- отношение величины притока к величине оттока составляет от 0,75 до 1,25 для последних трех последовательных измерений потока;

- ни одно из трех последовательных значений скорости потока не должно быть меньше их среднего значения, умноженного на 0,75 или больше из среднего значения, умноженного на 1,25;
- после испытания разбирается испытательная установка и измеряется толщина образца ПФЭ;
- испытания завершаются, проводится камеральная обработка полученных данных.

5.3.2 Фильтрационные исследования образцов бентонитовых матов

Для проведения фильтрационных исследований из геосинтетических бентонитовых материалов вырезались образцы (диаметром 10 см) с последующей герметизацией бентонитовой глиной боковых краев для максимальной точности при проведении лабораторных исследований. Испытания проводились для эксплуатируемого на участке канала противофильтрационного экрана из бентонитового материала (рисунок 5.14).



Рисунок 5.14 – Подготовка к испытанию образцов ПФЭ из бентонитового материала

После сборки камеры пермеаметра выполнялось заполнение водой образцов бентонитовых материалов на 50 мм выше верхней платформы. Далее подключалась напорная система для заполнения камеры водой под давлением и ее после-

дующего оттока. Образцы находились под давлением в течение 48 ч, после чего определялись потери напора через образец противofильтрационного материала.

На рисунке 5.15 проиллюстрирован процесс исследований коэффициента фильтрации образцов ПФЭ из геосинтетического бентонитового материала.



Рисунок 5.15 – Исследование коэффициента фильтрации образцов ПФЭ из бентонитовых материалов

В таблице 5.6 приведены результаты испытаний коэффициента фильтрации пяти образцов ПФЭ из бентонитового материала (в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM D 5887-09).

Таблица 5.6 – Результаты исследования коэффициента фильтрации образцов ПФЭ

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

По результатам испытания получены значения коэффициентов фильтрации в пределах $2,4 \times 10^{-11}$ – $2,9 \times 10^{-11}$ м/с, со средним значением $2,65 \times 10^{-11}$ м/с.

5.4 Определение стойкости геосинтетических материалов к динамическим пробоям

5.4.1 Методика проведения испытания и описание лабораторной установки

Определение стойкости бентонитовых материалов к динамическим пробоям (методом падающего конуса) производилось с помощью анализатора прочности при ударе падающим грузом модели «GT 7037-I» (рисунок 5.16). Методика основывалась на требованиях международного стандарта ISO 13433-2006 «Геосинтетические материалы. Испытания перфорации при динамической нагрузке (испытание падающим конусом)» [260].

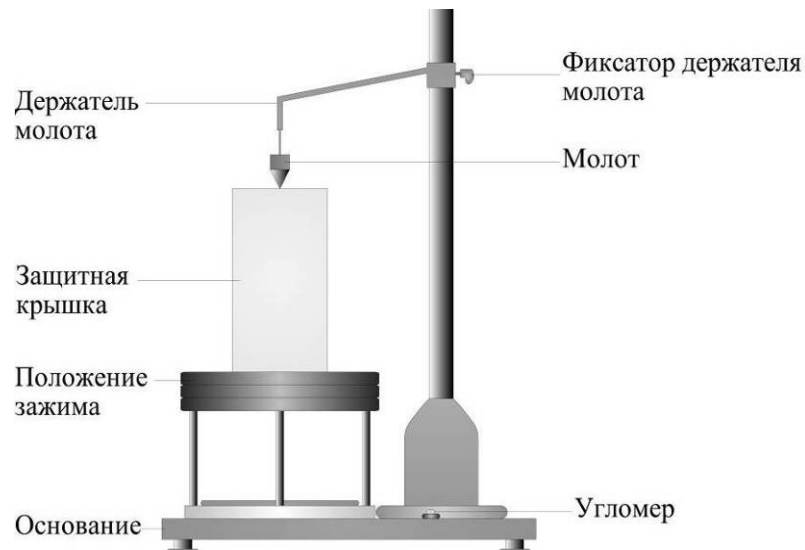


Рисунок 5.16 – Схема установки анализатора прочности

Описание установки, используемой при проведении исследований.

1. Положение молота: используется для задания и регулировки высоты держателя молота.
2. При проведении испытаний используется молот конический, массой 1000 г, с углом конусности 45° и 1 мм радиусом скругления носовой части.
3. Защитная крышка: подвижная, передвигается горизонтально, предотвращает отскок молота рикошетом от образцов; снимается перед зажатием образца.
4. Положение зажима: используется для закрепления и фиксации образца путем затягивания винтов.
5. Основание: используется для поддержания уровня устройства.

6. Угломер: устройство, используемое для выравнивания прибора.

7. Держатель молота предназначен для удержания и опускания молота при проведении исследования на ударную прочность. Для испытания используются стандартные образцы полотен материала с размером 200×200 мм.

5.4.2 Процесс испытания стойкости к динамическим пробоям

При проведении испытаний изначально зажим устанавливался в горизонтальном положении, образец фиксировался, затягивались винты. Далее была произведена установка молота в держатель. Зрительно проверено, пересекается ли нижний край положения молота с заданной шкалой (в соответствии со стандартом ISO 13433-2006 [260], молот должен падать на образец с высоты 500 ± 2 мм). Далее молот отпускался и падал на поверхность материала, а после измерительный конус помещался в отверстие. Измерительный конус придерживался в отверстии без нажима в течение 10 с. Далее фиксировалось значение на шкале измерительного конуса рядом с отверстием.

Процесс проведения испытаний нетканого геотекстиля бентонитовых материалов на динамический пробой проиллюстрирован рисунком 5.17.



Рисунок 5.17 – Испытание нетканого геотекстиля на динамический пробой

К полученным результатам добавлялась единица по шкале, чтобы скомпенсировать измерительную погрешность зрительной проверки. Расстояние проника-

ния конуса после падения 24 мм, следовательно, окончательное значение составило 26 мм (с добавлением единицы по шкале).

5.5 Определение толщины противofильтрационных геосинтетических покрытий

Для определения толщины геосинтетических бентонитовых материалов, а также составляющих конструкцию противofильтрационного экрана элементов, использовался электронный толщиномер (марка «Model-D2000»), позволяющий определять толщину геосинтетических и геокompозитных материалов.

Методика проведения исследований заключается в следующем:

- толщиномер был установлен на горизонтальной поверхности. Это влияет на силу прижима образца к поверхности опоры;
- контроль нулевой точки выполнялся перед каждым испытанием. Производилась очистка поверхности тканью под измерительной головкой и устройство включалось;
- в положении, когда измерительная головка прилегает к поверхности столика, производится нажатие кнопки на считывающем индикаторе. Данное действие является контролем нулевой точки.

Определение толщины бентонитовых материалов и составляющих элементов (тканого и нетканого геотекстиля, полимерной геомембраны) производилось в нескольких точках для шести образцов.

Перед проведением исследования образцы материала взвешивались. При определении толщины в соответствии с вышеизложенной методикой производилась регулировка прибора в соответствии с требованиями к измерению, а также контроль нулевой точки. Далее поворотом рукоятки приподнималась измерительная головка и проводилось измерение последующего образца.

На рисунке 5.18 проиллюстрирован процесс определения толщины составляющих конструкцию геосинтетических материалов.



Рисунок 5.18 – Определение толщины образцов геосинтетических бентонитовых материалов

Дополнительно для определения толщины полимерной геомембраны и геотекстиля использовался механический толщиномер. Процесс измерения толщины геомембраны показан на рисунке 5.19.



Рисунок 5.19 – Определение толщины геомембраны механическим толщиномером

Образец геосинтетического материала располагался под измерительной головкой, на приборе медленно поворачивалась рукоятка вперед. Измерительная головка начинала постепенное движение вниз к образцу с постоянной частотой. Производилось снятие показания с цифрового дисплея. Результаты измерений толщин геосинтетических материалов представлены в п. 5.6.

5.6 Результаты испытаний заводского и эксплуатируемого на канале геосинтетического бентонитового покрытия

Результаты испытаний образцов эксплуатируемых геосинтетических бентонитовых покрытий представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Физико-механические характеристики ПФЭ по результатам испытаний

Наименование показателя, ед. изм.	Фактическое значение	Нормативный документ на метод испытания
Поверхностная плотность, г/м ²	8714,8	ГОСТ Р 50277 EN 14196
Коэффициент фильтрации, м/с	$2,4 \times 10^{-11}$	МИ-05-2019 (ASTM D 5887)
Интенсивность потока, (м ³ /м ²)/с	–	
Прочность при растяжении, не менее, (кН/м): - продольное направление - поперечное направление	11,5 9,5	ГОСТ Р 55030 EN ISO 10319
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, не менее, % - продольное направление - поперечное направление	22,1 23,2	
Прочность на отрыв, не менее, Н/м	529,2	МИ-09-2019 (ASTM D 6496)
Толщина при давлении 2 кПа, мм	8,4	ГОСТ Р 50276 EN ISO 9863-1
Стойкость при динамическом продавливании (испытание падающим конусом), Ø, не более, мм	6,0	ГОСТ Р 56337 EN ISO 13433

Результаты испытаний тканого геотекстильного элемента из геосинтетического покрытия представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Результаты испытания тканого геотекстиля

Наименование показателя, ед. изм.	Фактическое значение	Нормативный документ
Поверхностная плотность, г/ м ²	191,5	EN ISO 9864 (EN 965)
Толщина при давлении 2 кПа, мм	0,7	EN ISO 9863-1
Количество нитей на 100 см ² основа/уток	108/60	ГОСТ 694315-94

Результаты испытаний нетканого геотекстильного материала представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Результаты испытаний нетканого материала

Наименование показателя, ед. изм.	Фактическое значение	Нормативный документ
Поверхностная плотность, г/ м ²	227,0	ГОСТ Р 50277-92 EN ISO 9864 (EN 965)
Толщина при давлении 2 кПа, мм	3,39	ГОСТ Р 50276-92
Прочность при растяжении, Н	516,6	ГОСТ Р 53226-2008
Относительное удлинение, %	88,5	ГОСТ Р 53226-2008
Длина нити, см	10,0	–

Результаты испытаний полимерной мембраны, используемой для ламинации геосинтетического бентонитового покрытия, представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Результаты испытаний мембраны для ламинации

Наименование показателя, ед. изм.	Фактическое значение	Нормативный документ
Поверхностная плотность, г/ м ²	241,5	ГОСТ Р 50277-92 EN ISO 9864 (EN 965)
Толщина при давлении 2 кПа, мм	0,7	ГОСТ Р 50276-92

Из подготовленных образцов был изъят бентопорошок для подсушивания до необходимой влажности и проведения дальнейших исследований: определения индекса свободного набухания, объема фильтрата, массовой доли влаги и емкости катионного обмена. Результаты реологических испытаний даны в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Результаты реологических испытаний бентонита

Наименование показателя	Ед. изм.	Фактическое значение
Массовая доля влаги	%	4,9
Индекс свободного набухания	мл/2г	8,0
Водоотдача	мл	68,8
Емкость катионного обмена	мг-экв/ 100 гБГ	78,1

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что защитный слой из суглинка, проникая сквозь нетканый и тканый слои, перемешивается с бентонитовым порошком, что, в свою очередь, негативно отражается на качестве бентонита (низкий показатель набухания и высокий показатель водоотдачи), но емкость катионного обмена остается в норме (не менее 75 мг-экв/ 100 гБГ). При этом прочностные характеристики высокие, как и коэффициент фильтрации.

Результаты испытаний ПФЭ из геосинтетических бентонитовых материалов заводского производства и отобранных образцов с эксплуатируемого объекта зафиксированы в протоколах и представлены в таблицах 5.12–5.16.

Таблица 5.12 – Результаты испытаний отдельных элементов эксплуатируемого противодиффузионного экрана

№ п/п	Физико-механический показатель								
	<i>D</i> , мм	Δ1 разрыв, вдоль/поперек, %		<i>h</i> ₁ , см	<i>h</i> ₂ , см	<i>h</i> ₃ , см	<i>h</i> _{ср.} , см	<i>m</i> _р , г/м ²	<i>m</i> , гр
1	6	Геотекстиль тканый		0,66	0,74	0,68	0,69	191,5	7,66
2		–	–	–	–	–	–	–	–
3		–	–	–	–	–	–	–	–
4		Нетканый		2,23	2,23	2,33	2,26	1936,8	77,47
5		–	–	–	–	–	–	–	–
6		–	–	–	–	–	–	–	–
7		–	–	–	–	–	–	–	–
8		Нетканый		0,72	0,72	0,66	0,70	241,5	9,66

Примечание – условия и способ ламинирования: термоскрепление. Дата устройства геосинтетического экрана – 2013 г. Дата испытания покрытий – 23.03.2021 г.

Таблица 5.13 – Результаты испытаний геосинтетического бентонитового покрытия

№ п/п	Физико-механический показатель							
	<i>D</i> , мм	Прочность (σ) на разрыв, кН/м (поперек)	Прочность на отрыв, кН/м (вдоль)	Δ1 разрыв, вдоль/поперек, %	<i>h</i> ₁ , см	<i>h</i> ₂ , см	<i>h</i> ₃ , см	<i>m</i> , гр
1	6	–	–	22,4	9,24	9,78	7,92	350,42
2		↑ 11,0	530,3	22,1	7,47	7,77	7,28	341,52
3		→ 9,5	528,0	23,2	7,89	7,50	8,10	350,68
4		↑ 12,0	–	50,0	8,79	9,50	9,14	351,74
5		–	–	–	–	–	–	–
Ср		–	529,2	29,4	8,35	8,64	8,11	348,59

Примечание – условия и способ ламинирования: термоскрепление. Дата устройства геосинтетического экрана – 2013 г. Дата испытания покрытий – 23.03.2021 г. Год производства материалов: 2013 г. (эксплуатируемый).

Таблица 5.14 – Результаты испытаний геосинтетического бентонитового покрытия

№ п/п	Физико-механический показатель									
	D, мм	σ на разрыв, кН/м (поперек)	σ на отрыв, кН/м (вдоль)	$\Delta 1$ разрыв, вдоль/поперек, %	h_1 , см	h_2 , см	h_3 , см	$h_{ср.}$, см	m_p , г/м ²	m, гр
1	6	–	–	22,8	9,24	9,78	7,92	8,98	8714,8	350,42
2		↑ 11,0	530,3	22,1	7,47	7,77	7,28	7,51		341,52
3		→ 9,5	528,0	23,2	7,89	7,50	8,10	7,83		350,68
4		↑ 12,0	–	50,0	8,79	9,50	9,14	9,14		351,74
Ср		–	529,2	29,5	8,35	8,64	8,11	8,36		348,59

Примечание – условия и способ ламинирования: термоскрепление. Дата устройства геосинтетического экрана – 2013 г. Дата испытания покрытий – 23.03.2021 г. Год производства материалов: 2013 г. (эксплуатируемый).

Таблица 5.15 – Результаты испытаний заводского геосинтетического бентонитового покрытия

№ п/п	Физико-механический показатель													
	D, мм	σ на разрыв, кН/м (вдоль)	σ на разрыв, кН/м (поперек)	σ на отрыв, кН/м (вдоль)	σ на отрыв, кН/м (поперек)	$\Delta 1$ разрыв, вдоль/поперек, %	h_1 , см	h_2 , см	h_3 , см	$h_{ср.}$, см	m_{p2} , г/м ²	m, гр		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	6	–	–	–	–	–	–	–	6,14	5,78	6,41	6,11	4854,3	203,52
2		–	–	403,8	–	–	–	–	6,05	6,43	6,45	6,31		190,92
3		–	–	–	–	294,9	–	–	6,70	6,36	6,71	6,59		188,29
4		10,5	–	–	–	–	19,0	–	6,53	6,35	6,78	6,55		187,74
5		–	8,0	–	–	–	–	10,1	6,50	6,47	6,46	6,58		191,20
6		–	–	–	–	–	–	–	6,32	6,74	7,09	6,72		179,75
7		–	–	467,7	–	–	–	–	6,66	7,12	7,02	6,93		197,64
8		–	–	–	–	463,5	–	–	7,63	7,41	7,39	7,48		191,12
9		10,0	–	–	–	–	17,8	–	6,26	5,88	6,23	6,12		184,91
10		–	7,0	–	–	–	–	9,2	7,18	7,02	7,05	7,08		209,27
11		–	–	462,1	–	–	–	–	6,47	6,52	6,64	6,54		201,42
12		–	–	–	–	430,3	–	–	7,16	6,60	7,11	6,96		192,04

Продолжение таблицы 5.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13		–	–	–	–	–	–	–	6,93	6,74	7,02	6,90		211,24
14		–	–	–	–	–	–	–	6,57	6,74	6,67	6,66		192,40
15		–	–	–	–	–	–	–	6,40	6,49	6,66	6,58		190,05
Ср	6	10,25	7,5	444,5	396,2	18,4	9,65	6,63	6,58	6,78	6,67	4854,3	194,17	

Примечание – технологический режим производства: количество ударов/мин 360; количество игл – 3168; условия и способ ламинирования – неламинированный. Дата изготовления материалов – 24.03.2021 г. Дата испытания – 24.03.2021 г., партия № 006, рулон № 10.

Таблица 5.16 – Результаты испытаний заводского геосинтетического бентонитового покрытия

№ п/п	Физико-механический показатель						
	σ на отрыв, кН/м (вдоль)	σ на отрыв, кН/м (поперек)	h_1 , см	h_2 , см	h_3 , см	$h_{ср}$, см	m , гр
1	–	–	7,19	6,06	7,41	6,89	202,86
2	342,3	–	7,57	7,02	7,40	7,33	200,59
3	–	344,1	6,74	7,28	7,60	7,21	198,43
4	–	–	7,43	7,18	6,65	7,09	205,32
5	–	–	7,09	7,27	7,02	7,13	206,03
6	–	–	7,70	7,10	7,35	7,38	207,81
7	406,1	–	6,90	6,91	7,57	7,13	199,75
8	–	652,3	6,64	7,40	7,91	7,32	200,96
9	–	–	7,16	7,12	6,88	7,05	224,05
10	–	–	7,79	7,27	7,20	7,45	246,71
11	–	–	6,86	7,74	7,68	7,43	234,95
12	442,7	–	7,61	7,13	7,15	7,30	215,66
13	–	555,0	7,83	6,71	6,62	7,05	194,34
Ср	397,0	517,1	7,27	7,09	7,26	7,21	210,57

Примечание – технологический режим производства: количество ударов/мин 360; количество игл – 3168; условия и способ ламинирования – неламинированный. Дата изготовления – 23.03.2021 г. Дата испытания – 23.03.2021 г., партия № 005, рулон № 23.

5.7 Сравнительный анализ прочностных и фильтрационных характеристик покрытия, полученных по результатам испытаний

По результатам проведенной в лабораторных условиях апробации конструкции облицовки и составляющих ее элементов были получены значения физико-механических характеристик противофильтрационного экрана, которые тем или иным образом изменялись в процессе эксплуатации канала. С целью сопоставления этих показателей, анализа изменения их свойств с течением времени, а также изучения физико-механических характеристик конструкции, были рассмотрены первоначальные (таблица 5.17) [185] и полученные по результатам апробации технические характеристики противофильтрационной облицовки.

Таблица 5.17 – Технические характеристики противофильтрационного геосинтетического бентонитового материала

Наименование показателя	Нормативный документ	Ед. изм.	Значение показателя
Геотекстиль			
Покрывающий материал (геотекстиль из пропилена)			
Масса на единицу поверхности	DIN EN ISO 9864	г/м ²	220
Несущий материал (тканый материал из полипропилена)			
Масса на единицу поверхности	DIN EN ISO 9864	г/м ²	110
Слой бентонитовой глины (натриевый бентонит (порошок))			
Масса на единицу поверхности	EN 14196	г/м ²	4670
Объем при набухании	ASTM D 5890	мл/2г	24
Водоотдача	ASTM D 5891	мл	18
Содержание воды	DIN 18121 / ISO 11465	%	10
Слой из полиэтилена			
Масса на единицу поверхности	DIN EN ISO 9864	г/м ²	200
Геосинтетические бентонитовые маты			
Масса на единицу поверхности	DIN EN 14196 (GBR-C)	г/м ²	5250
Толщина	DIN EN ISO 9863-1	мм	6
Максимальное растягивающее усилие	DIN EN ISO 10319 / ASTM D 4595	кН/м	12,0 / 12,0
Относительное удлинение при разрыве	DIN EN ISO 10319 / ASTM D 4595	%	10,0 / 6,0
Прочность скрепления	ASTM D 6496	Н/м	360
Сила на продавливание	DIN EN ISO 12236	Н	2000
Коэффициент фильтрации	DIN EN 14150	м/с	10 ⁻¹⁴

Так, например, для защитного слоя из геотекстиля заводом-изготовителем заявлена поверхностная плотность со значением 220 г/м² (согласно нормам DIN EN ISO 9864). Однако по результатам проведенных лабораторных исследований этот показатель изменился до значения 191,5 г/м² (рисунок 5.20).



Рисунок 5.20 – Сравнительные характеристики значений поверхностной плотности геотекстиля в конструкции ПФЭ

По результатам сравнения полученных значений выявлено расхождение между характеристиками поверхностной плотности, что обусловлено периодом эксплуатации конструкции экрана.

Также выполнен сравнительный анализ для показателей поверхностной плотности противодиффузионного элемента из бентонитового мата. Заявленные технические характеристики поверхностной плотности составляют 5250 г/см^2 , а по результатам проведенных лабораторных испытаний, выполняемых с учетом ГОСТ [71], получено значение $8714,8 \text{ г/см}^2$, что на 39,75 % выше первоначального (рисунок 5.21).

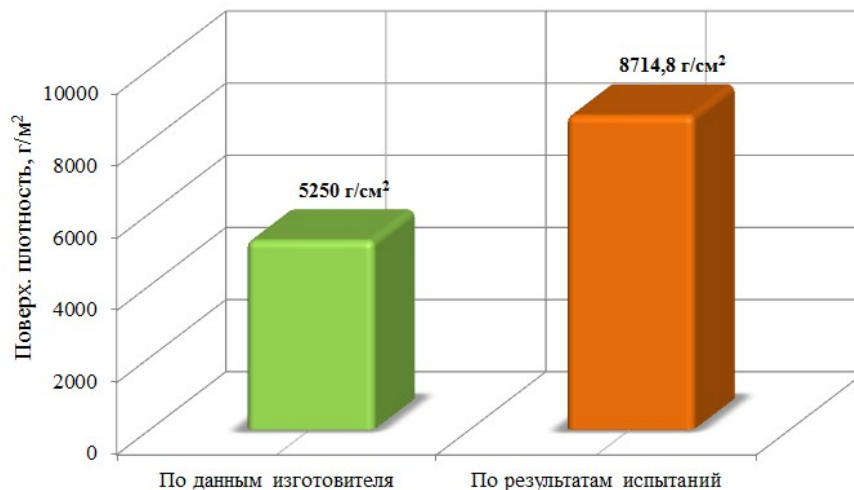


Рисунок 5.21 – Сравнительные характеристики значений поверхностной плотности противодиффузионного элемента из бентонитового мата

Проведенные лабораторные исследования позволили сделать вывод, что расхождения первоначальных и полученных значений объясняются процес-

сами гидратации-дегидратации бентонита в конструкции экрана и воздействием низких температур на противодиффузионный элемент.

Результаты выполненных лабораторных испытаний по определению характеристик относительного удлинения при разрыве показывают расхождение в 54 % (продольное направление) и в 74,13 % (поперечное направление). Аналогичные исследования проводились для максимальных растягивающих усилий. Результаты испытаний на относительное удлинение и прочности на растяжение ПФЭ из бентонита приведены на рисунке 5.22.

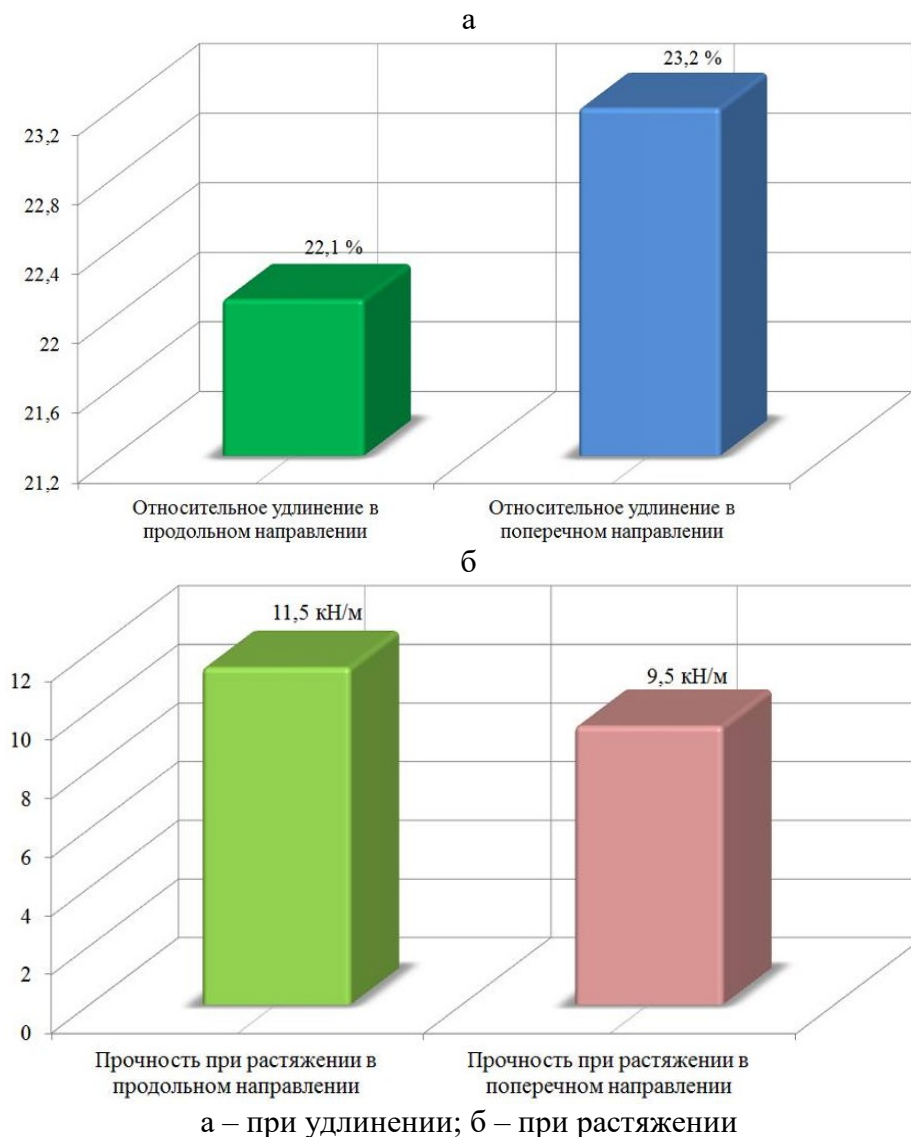


Рисунок 5.22 – Результаты механических испытаний ПФЭ из бентонита

За время продолжительной эксплуатации стойкость при динамическом продавливании осталась неизменной и составила 6 мм.

Исследования прочности скрепления (рисунок 5.23) выявили значительные расхождения результатов заводских и лабораторных испытаний в 32 %. Данное обстоятельство объясняется набором механической прочности в результате эксплуатации бентонитового материала и его гидратации.

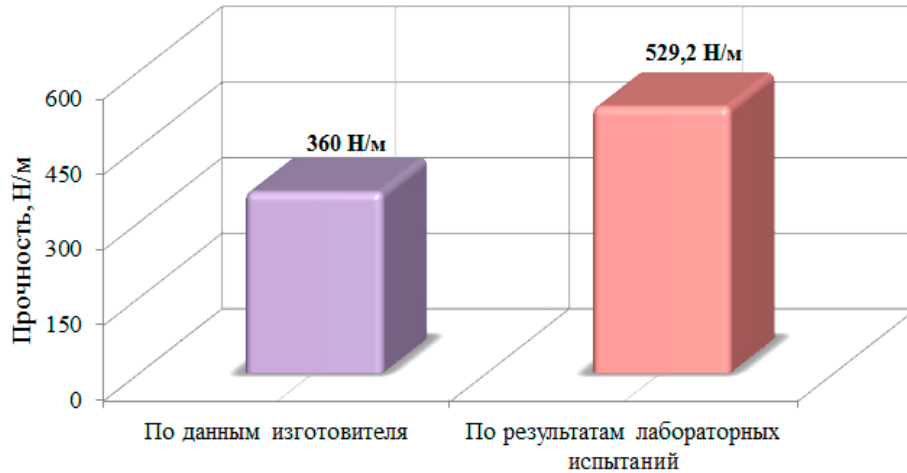


Рисунок 5.23 – Сравнительные показатели значений прочности скрепления бентонитового материала

С целью оценки доли влаги в бентонитовой глине, определения индекса свободного набухания бентонитового порошка и водоотдачи (которые напрямую влияют на противофильтрационный эффект конструкции экрана) были выполнены лабораторные реологические испытания бентонитовой глины. По результатам сравнения заявленных характеристик с полученными результатами можно сделать вывод, что расхождение по показателю массового содержания влаги составляет 104 %. Сравнительные результаты приведены на рисунке 5.24.

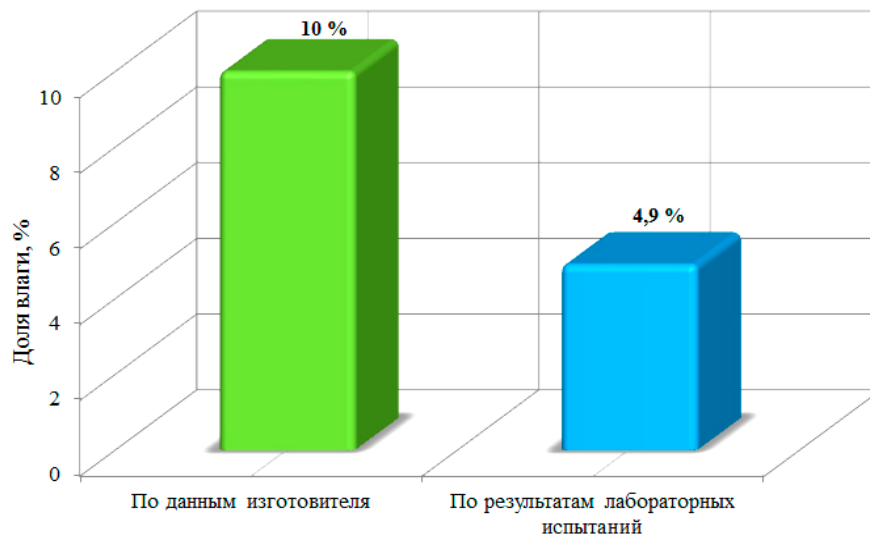


Рисунок 5.24 – Сравнительные характеристики массовой доли влаги противофильтрационного элемента из бентонита

По значению индекса свободного набухания (в сравнении с исходными техническими показателями) также получено значительное расхождение результатов. Этот факт объясняется эксплуатацией противофильтрационного экрана, поочередным его замораживанием-оттаиванием и отсутствием процесса влагонасыщения бентонитовой глины в период опорожнения канала (с сентября по март). Результаты сопоставления характеристик приведены на рисунке 5.25.

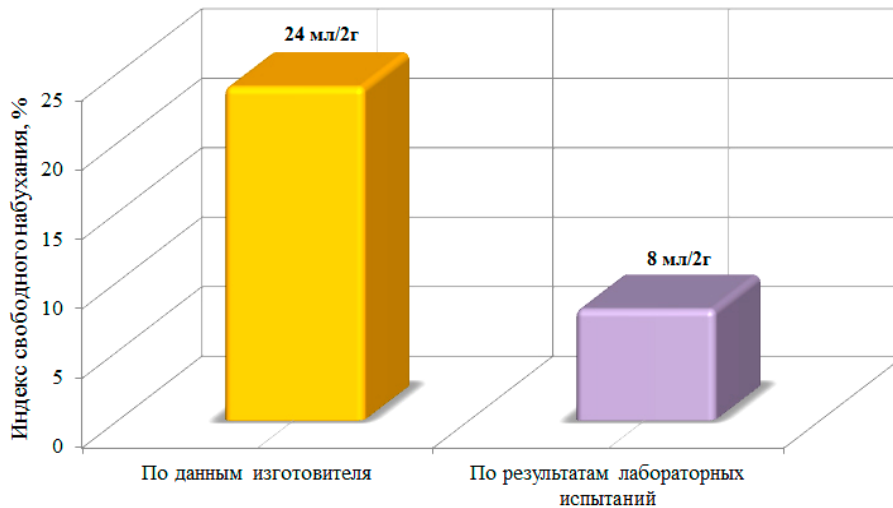


Рисунок 5.25 – Результаты сопоставления индекса свободного набухания бентонита

Полученные результаты водоотдачи свидетельствуют о значительном их занижении (73,8 %), по сравнению с заводскими характеристиками. Анализ полученных значений представлен на рисунке 5.26.

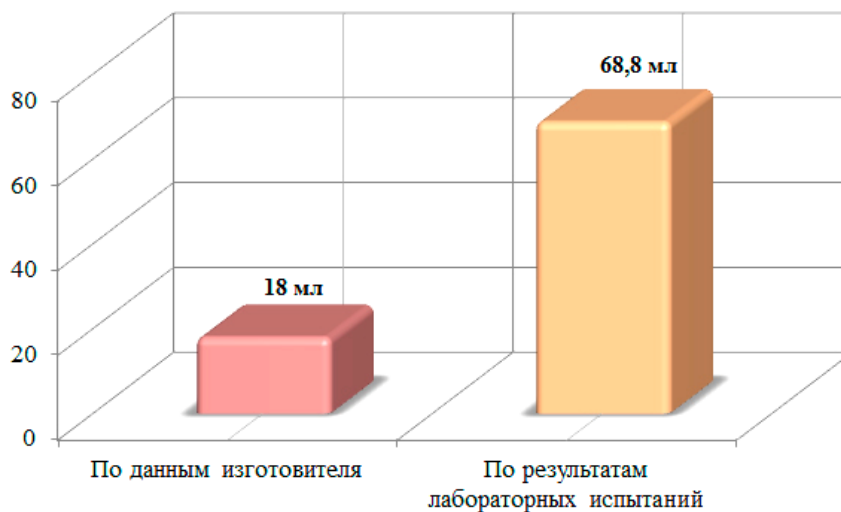


Рисунок 5.26 – Анализ показателей водоотдачи бентонита

Сравнительный анализ физико-механических характеристик противофильтрационных материалов показывает, что большинство исследуемых показателей

конструкции ПФЭ находятся в пределах статистической погрешности проведенных лабораторных испытаний. В целом, существенных изменений в прочностных характеристиках геотекстиля и самого противofильтрационного элемента из бентонита не обнаружено. Это обусловлено также высокими стандартами производственного процесса. Следует отметить достоверность проведенных исследований и незначительные расхождения по некоторым показателям между заявленными характеристиками завода-изготовителя и результатами лабораторных испытаний. Выявлено, что прочностные характеристики волокон геотекстильного материала в процессе эксплуатации не изменились.

На основании вышеизложенного следует отметить, что применяемая конструкция, состоящая из подстилающего песчаного основания, бентонитового мата, суглинка и защитного слоя из каменной наброски отвечает необходимым требованиям, предъявляемым к противofильтрационным экранам. По результатам опытной апробации на участке оросительного канала не обнаружено деформаций русла канала, заболачивания или подтопления прилегающих к каналу территорий, а также повреждений противofильтрационного экрана по всей его протяженности, что свидетельствует о высокой его эффективности. Такой вариант конструкции может быть рекомендован к применению и принят в качестве типовой.

Лабораторные испытания выполнялись также для новых, разработанных автором, комбинированных противofильтрационных покрытий, выполненных на основе геосинтетических материалов: конструкции экрана повышенной надежности из двух ПФЭ – бентонита и полимерной геомембраны и профилированной геомембраны, совмещенной с геотекстилем [107, 312].

При проведении испытаний физико-механических характеристик использовались действующие нормативные документы. Коэффициент фильтрации определялся при давлении 200 кПа в соответствии с ГОСТ-25584 [67]. Образцы бентонитовых материалов опускались в сосуд с водой, через 24 ч вынимались и помещались в сушильный шкаф при температуре 70 °С на 24 ч. Процедура повторялась 5 раз, после чего на этих образцах определялся коэффициент фильтрации. Определение прочности и относительного удлинения геотекстиля проводилось в соответствии с

ГОСТ Р 55030-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении».

Конструктивные схемы исследуемых противофильтрационных покрытий приведены на рисунке 5.27.

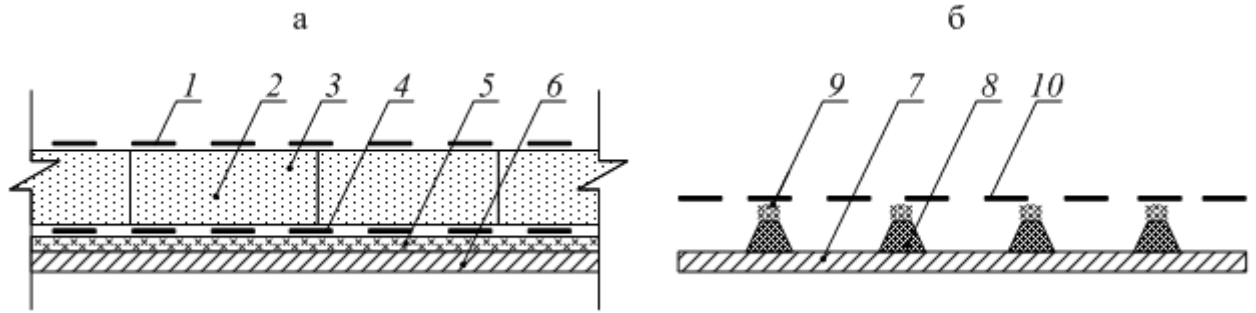


Рисунок 5.27 – Конструктивные схемы испытываемых противофильтрационных покрытий [312]:

а – покрытие на основе бентонита; б – покрытие на основе геомембраны;

1 – тканый геотекстиль; 2 – бентонитовый материал; 3 – гранулы бентонита; 4 – нетканый геотекстиль; 5 – соединение полиэтиленовой геомембраны и нетканого геотекстиля методом термоскрепления; 6 – геомембрана из полиэтилена высокой плотности; 7 – профилированная геомембрана; 8 – конусообразные выступы; 9 – соединение геомембраны с геотекстилем методом термоскрепления; 10 – геотекстиль

В таблице 5.18 представлены физико-механические характеристики многослойного противофильтрационного покрытия на основе бентонита.

Таблица 5.18 – Физико-механические характеристики бентонитового гидроизоляционного покрытия [312]

Наименование показателя	Метод испытания	Ед. изм.	Значение
Геотекстиль			
Нетканое полотно, масса на единицу площади	БДС EN 965	г/м ²	200 ± 20
Тканый геотекстиль (полипропиленовый), масса на единицу площади	БДС EN 965	г/м ²	100 ± 10
Бентонит			
Содержание бентонита	БДС EN 9653	кг/м ²	4,3–4,6
Степень набухания	ASTM D 5890	мл/г	min 24
Геосинтетический бентонитовый материал			
Толщина	БДС EN 964-1	мм	6 ± 1
Прочность при разрыве по длине	БДС EN ISO 10319	кН/м	> 20
Прочность при разрыве поперек	БДС EN ISO 10319	кН/м	> 30
Относительное удлинение по длине	БДС EN ISO 10319	%	13 ± 0,4
Относительное удлинение по ширине	–	%	7,5 ± 0,2
Коэффициент фильтрации	ASTM D 5887	м/с	1×10 ⁻¹¹
- с учетом совмещения с геомембраной	–	м/с	1×10 ⁻¹⁴

Сравнительные характеристики многослойного геосинтетического покрытия с аналогами по показателям прочности и коэффициенту фильтрации показали, что по прочности многослойное покрытие превосходит все аналоги, поскольку включает два дублирующих ПФЭ на основе бентонита и геомембраны [284]. По показателю водонепроницаемости (коэффициенту фильтрации) такое покрытие превосходит аналоги, например, ПФЭ без геомембраны – в 2 раза.

Для конструктивного решения, включающего ПФЭ из профилированной геомембраны, термоскрепленной с геотекстилем, при испытании были получены следующие физико-механические характеристики (таблица 5.19).

Таблица 5.19 – Физико-механические характеристики профилированной геомембраны, термоскрепленной с геотекстилем [312]

Наименование показателя	ГОСТ на испытание	Ед. изм.	Значение
Толщина полотна	ГОСТ EN 1849	мм	0,8
Высота выступа	ГОСТ EN 1849	мм	7,5
Масса 1 м ² , не менее	ГОСТ EN 1849	кг	0,9
Предел прочности на смятие	ГОСТ 17177-94	кПа	590
Максимальная сила растяжения, не менее	ГОСТ 31899	кН/м	29,5
Относительное удлинение при максимальной силе растяжения, не менее	ГОСТ 31893	%	18
Сопротивление статическому продавливанию, не менее	ГОСТ EN 12730	кг	20
Коэффициент фильтрации (при градиенте напора $i = 0,1$) при давлении		м/сут	
- 2,0 кПа			915
- 200,0 кПа	ГОСТ Р 52608	м/сут	65
Тип исходного сырья геотекстиля	–	–	Полипропилен
Поверхностная плотность	ГОСТ Р 55030	г/м ²	90

Для покрытия, состоящего из профилированной геомембраны, эффективность и надежность работы обеспечивается выполнением двойной функции: противofильтрационная защита и дренирование (отвод) профильтрованной воды.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. В качестве количественных характеристик разработанной и апробированной конструкции экрана определены физико-механические свойства противофильтрационного элемента на растяжение и удлинение под нагрузкой, которые определяют способность покрытия противостоять касательному давлению защитного грунта, уложенного на откосах и в основании. Для изъятых образцов противофильтрационного элемента на основе бентонита получены физико-механические характеристики прочности в продольном направлении, составляющие 11,5 кН/м, а в поперечном – 9,5 кН/м. Повышенные характеристики значений силы и усилия на отрыв в комбинированном экране объясняются наличием термоскрепленных элементов из полимерной геомембраны и геотекстиля.

2. По результатам проведенных лабораторных исследований на пермеаметре жидкостном установлены коэффициенты фильтрации противофильтрационных покрытий на основе бентонита, эксплуатируемых в течение восьми лет на участке оросительного канала, которые составили от $2,4 \times 10^{-11}$ до $2,9 \times 10^{-11}$ м/с. Изменения коэффициента фильтрации с течением времени главным образом обусловлено процессами замораживания-оттаивания противофильтрационного покрытия и составляющих его элементов (в частности, защитно-пригрузочного слоя мощностью от 0,3 до 0,7 м).

3. Показатели стойкости противофильтрационного элемента, эксплуатируемого в натуральных условиях на участке канала, при ударе падающим конусом составили не более 6,0 мм. Данное значение объясняется гидратацией бентонита при взаимодействии с водой и процессами коагуляции тканого геотекстильного полотна суглинком, используемом в конструкции противофильтрационного экрана. Изучены также реологические характеристики бентонита (в том числе индекс набухания и водоотдачи), определена поверхностная плотность противофильтрационного элемента, которая составила 8714,8 г/м².

4. Выполненный анализ и сопоставление полученных по результатам лабораторных исследований физико-механических характеристик конструкции обли-

цовки позволили установить причины, связанные с изменением показателей противofильтрационного элемента. Применяемый в качестве защитно-пригрузочного слоя суглинок в процессе эксплуатации конструкции противofильтрационного экрана перемешивался с бентонитом, что негативно сказывалось на его реологических характеристиках. По результатам исследований получен низкий индекс свободного набухания, составляющий в пределах 8,0 мл/2г, и высокий показатель водоотдачи – 68,8 мл.

5. Проведенные лабораторные испытания физико-механических свойств новых геосинтетических покрытий с использованием бентонитовых материалов, совмещенных с геомембранами, показали свои преимущества перед аналогами по показателям прочности, водонепроницаемости и фильтрующей способности. По показателю водонепроницаемости (коэффициенту фильтрации) такое покрытие превосходит аналоги, например, ПФЭ без геомембраны в 2 раза. Также было установлено, что покрытия на основе профилированных геомембран, совмещенных (термоскрепленных) с геотекстилями, имеют достаточно высокие физико-механические характеристики и могут выполнять несколько функций одновременно: гидроизоляционную, защитную (ПФЭ от механических повреждений) и дренажную (отвод профильтрованной воды через защитно-пригрузочный слой).

Глава 6. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ

6.1 Задачи и методика натуральных исследований

Целью являются натурные (визуальные) и инструментальные обследования с анализом технического состояния противофильтрационных и защитных облицовок оросительных каналов. Для достижения поставленной цели были выполнены обследования участков крупных с фотоиллюстрациями повреждений и разрушений русла и откосов: наиболее опасного участка Пролетарского канала (в районе х. Наумовский), выполненного в земляном русле и облицовке с комбинированным экраном из бентонитовых матов и защитным экраном из каменной наброски; участков после реконструкции облицовки (выполненной 2013–2018 гг.) Донского магистрального канала (на ПК 110 и ПК 130); Невинномысского канала (от ПК 66+62 до ПК 470+20); участков реконструкции Перебросного магистрального канала, выполненного в облицовке с разгрузочными дренирующе-фильтрующими элементами; реконструируемых участков канала Аксыра (Кабардино-Балкарская Республика), выполненных с противофильтрационным элементом из бентонита, покрытого геотекстилем и каменным материалом.

Задачами натуральных исследований противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов на оросительных каналах являлись:

- оценка технического состояния защитных покрытий и противофильтрационных экранов;
- выявление на поверхности противофильтрационных облицовок возможных деформаций и нарушений;
- оценка повреждаемости противофильтрационного элемента (для открытых экранов), зарастания каналов растительностью и других дефектов.

Методика натуральных исследований заключалась в проведении визуальных обследований с целью предварительной оценки технического состояния облицовок из геосинтетических материалов, а также инструментальных исследований с использованием приборов и оборудования.

Исследования проводились с учетом следующих нормативных документов:

- ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования [74];
- СП 421.1325800.2018. Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации [207];
- СП 100.13330.2016. Мелиоративные системы и сооружения [205];
- СТО 4.2-6-2015. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Магистральные каналы. Определение потерь на фильтрацию [210];
- СТО 1.1-1-2020. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Правила обследования технического состояния и проведения ремонтных работ на мелиоративных системах и гидротехнических сооружениях [209].

6.2 Описание объектов натуральных исследований

Донской магистральный канал (ДМК) является крупнейшим каналом Российской Федерации гидромелиоративного назначения. Общая длина канала составляет 112 км, расход головного участка – 250 м³/с, после перегораживающего участка на 45-м км расход до реконструкции канала – 80 м³/с, после проведения реконструкции – 110 м³/с [88, 168].

Первая очередь канала была введена в эксплуатацию в 1952–1956 гг. В настоящее время ДМК используется для орошения площади 150 тыс. га и обводнения 525 тыс. га сельхозугодий в засушливой юго-восточной части Ростовской области. Кроме того, по каналу вода подается для хозяйственно-питьевого водоснабжения безводных сельских районов, используется для рассоления Манычских водохранилищ, которые имеют большое рыбохозяйственное значение и являются источником воды для орошения Азовской оросительной системы.

За более чем 50-летний период эксплуатации большая часть земляного русла ДМК сильно деформировалась, на отдельных участках наблюдается повышенная фильтрация, что ведет к подтоплению прилегающих приканальных территорий, вторичному засолению земель и к значительным потерям транспортируемой

воды. В связи с этим с 2012 г. проводится реконструкция ДМК, которая предусматривает расширение его русла с 45-го километра и далее, увеличение пропускной способности с 80 до 110 м³/с и более, устройство противотрационных покрытий на наиболее опасных участках.

Наиболее опасный и облицованный противотрационным покрытием из бентонитовых материалов и бетонных плит на регулирующем сооружении участок ДМК проиллюстрирован на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Реконструируемый участок ДМК с облицовкой из геосинтетических бентонитовых материалов

Реконструируемый участок канала (с ПК 108+62,84 по ПК 134+93,05) проходит в полувыемке-полунасыпи. Высота земляных дамб над естественной поверхностью земли составляет 0,80–6,50 м. У подножия дамб наблюдается переувлажнение грунтов. При заполнении канала водой уровень грунтовых вод в приканальных зонах поднимается, формируется приканальный купол опресненных грунтовых вод неглубокого залегания на расстоянии 1,5–2,5 м.

В ходе эксплуатации ДМК сформировались зоны инфильтрационных потерь воды через дно, бортовые откосы канала (включая тело грунтовой дамбы), визуальными фиксируемые в приканальных и придамбовых зонах с появлением участков переувлажненных грунтов, заболачивания, активного зарастания растительностью.

Пролетарский канал является продолжением ДМК и берет начало в концевой его части на ПК 1122+00. Длина Пролетарского канала 83,4 км, средняя ширина канала по дну составляет 4 метра, глубина воды (средняя) – 4,5–5,0 м, русло полигонального сечения, заложение откосов 1:4, в верхней части заложение откосов 1:1,5, пропускная способность на всем протяжении 54 м³/с (по данным эксплуатационной организации), уклон дна 0,00004. Большая часть магистрального канала протрассирована в земляном русле, поперечный профиль земляного полотна – полувыемка-полунасыпь, высота грунтовых дамб обвалования в насыпи варьируется до 6 м. Слагающие грунты по трассе канала – средние суглинки, в районе пп. Наумовский вскрываются известняки и пески. На участках канала устроена противофильтрационная защита толщиной 1,0 м в виде экрана из глинистых грунтов [117]. На наиболее опасном участке канала (протяженностью 500 м, вблизи пп. Наумовский) выполнен комбинированный экран из бентонитовых материалов с защитным покрытием из грунта и каменной наброски [117].

Назначение Пролетарского канала – орошение и обводнение донской водой засушливых районов Ростовской области. Данный канал комплексного назначения, площадь орошения 22,8 тыс. га (по проекту).

Общий вид обследуемого участка Пролетарского канала (в земляном русле) проиллюстрирован рисунком 6.2.



Рисунок 6.2 – Обследуемый участок Пролетарского канала

По Пролетарскому каналу и Пролетарскому распределителю ПР-1 вода подается в Пролетарское и Веселовское водохранилища для орошения, опреснения, обводнения водотоков, нужд рыбоводства и др.

Невинномысский канал, введенный в эксплуатацию в 1948 г., а также работающий с ним в едином комплексе Егорлыкский водный тракт с Сенгилеевским, Егорлыкским и Новотроицким водохранилищами, предназначены для водоснабжения районов Ставропольского края (включая и г. Ставрополь), обводнения и орошения районов Ставропольского края, Республики Калмыкия и Ростовской области, водообеспечения и других целей. Невинномысский канал осуществляет самотечную межбассейновую переброску кубанских вод в долину р. Егорлык. Канал предназначен для комплексного водохозяйственного назначения.

Исследуемый и реконструируемый участок русла Невинномысского канала на ПК 466 (с защитным покрытием из каменной наброски и подстилающим полотнищем геотекстиля) проиллюстрирован рисунком 6.3.



Рисунок 6.3 – Исследуемый участок реконструкции русла Невинномысского канала

Годовой объем водоподачи по каналу составляет порядка 1832,2 млн м³. С учетом снижения водопотребления на сельскохозяйственные нужды, фактический годовой объем водоподачи по каналу за прошедшие 5 лет составил в среднем 1271,35 млн м³. Данный канал на всем протяжении проходит в различных

инженерно-геологических условиях. Начальный участок (8,5 км) проходит по надпойменной террасе р. Кубань, сложенной из аллювиальных галечников, залегающих на размытой поверхности майкопских глин.

Перебросной магистральный канал соединяет две оросительно-обводнительные системы: Кубань-Калаусскую (Большой Ставропольский канал) и Кубань-Егорлыкскую (Невинномысский канал). Перебросной канал отнесен ко второму классу опасности, а общая его протяженность составляет 4,87 км.

Поперечное сечение трапецеидальное, ширина по дну 7,0 м, крутизна откосов 2,5. Максимальный расход в канале $66 \text{ м}^3/\text{с}$, минимальный – $30 \text{ м}^3/\text{с}$. Наполнение при максимальном расходе 4,0 м. Превышение гребня дамб и бровки берм над максимальным уровнем в канале принято 1,0 м. Уклон канала на всем протяжении $i = 0,00015$, скорость в канале при прохождении максимального расхода $0,98 \text{ м/с}$.

Общий вид исследуемого участка Невинномысского перебросного канала с противофильтрационной облицовкой приведен на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4 – Облицованный участок Перебросного магистрального канала

Магистральный канал проходит частично в облицовке, а большая часть – в земляном русле, откосы в зоне переменных уровней воды в канале (между максимальным и минимальным уровнями воды) крепятся камнем ($d_{\text{cp}} = 10 \text{ см}$) по подготовке из геотекстильного материала. При сохранении наполнения в лотке

при максимальном расходе равном 4,0 м (ширина лотка составит 13 м, уклон 0,00015) превышение отметок стен лотка над максимальным уровнем воды в канале 0,4 м. Участок магистрального канала от ПК 30 до ПК 41 и далее до концевого сопрягающего сооружения проходит в полувыемке-полунасыпи.

Канал Аксыра. Основное назначение магистрального канала Аксыра – орошение сельскохозяйственных угодий. Пропускная способность – 5,8–10,0 м³/с, источником питания канала является р. Черек. Канал протрассирован в земляном русле трапецеидального сечения. Коэффициент шероховатости русла канала 0,036–0,040 (по Маннингу), протяженность участка реконструкции (по проекту) – 21,7 км, средняя ширина канала по дну – 4,5 м, заложение откосов $m = 1,5$. Глубина наполнения в канале (средняя) 1,3–1,5 м, средняя скорость течения – 0,8–1,2 м/с. На протяжении канала устроено 70 гидротехнических сооружений. На наиболее проблемных участках (ПК13+26 – ПК13+53; ПК13+71 – ПК 14+06) в 2018 г. была выполнена противофильтрационная облицовка из железобетона, каменной наброски, подстилающего покрытия из геотекстиля.

Участок обследования канала Аксыра с противофильтрационным экраном по дну проиллюстрирован рисунком 6.5.



Рисунок 6.5 – Обследуемый участок реконструкции канала Аксыра с противофильтрационным экраном по дну

Большинство обследуемых каналов (магистральных, межхозяйственных и внутрихозяйственных) построены в период с 1952 по 1970 г. и выполнены в земля-

ном русле [25]. По данным [25, 189] от общей протяженности межхозяйственных каналов всего облицовано 795 км, что составляет около 10 %. При этом большая часть этих каналов находится в неудовлетворительном техническом состоянии: наблюдаются деформации земляного русла, оползание и размывы откосов, на некоторых участках инфильтрация воды в канал за счет близкого расположения грунтовых вод с последующим их выклиниванием через грунтовые дамбы.

6.3 Натурные исследования противофильтрационных покрытий оросительных каналов

6.3.1 Результаты обследования наиболее опасных участков комбинированного экрана Донского магистрального канала

Задачи натурных исследований на реконструируемых участках ДМК включали: 1) оценку современного технического состояния облицовки канала; 2) определение технического состояния дамб; 3) выявление причин возникновения фильтрационных явлений через дамбы. Кроме того, при проведении натурных обследований были проанализированы и обобщены имеющиеся данные натурных наблюдений, полученных автором в 2015–2018 гг. Обследования реконструируемых участков магистрального канала проводились в период с 18 по 20 июня 2020 г.

По результатам проведенного обследования на первом участке магистрального канала (ПК 108+62,81 – ПК 112+94), выполненного с противофильтрационным покрытием из геосинтетических материалов на основе бентонита, не выявлены нарушения и деформации защитного слоя из каменной наброски и наличие участков с зарастанием камышом, на втором участке параметры защитной облицовки соответствуют проектным. Нормативное техническое состояние канала оценивается как работоспособное.

Вблизи перегораживающего сооружения наблюдался незначительный износ конструкций гидротехнических сооружений (в том числе затвора-регулятора и устройств, обеспечивающих его функционирование).

На рисунке 6.6 проиллюстрирован обследуемый участок ДМК, выполненный с противофильтрационным покрытием из геосинтетиков и каменной наброской.



Рисунок 6.6 – Участок ДМК на ПК 108+62,81 – ПК 112+94

На втором реконструируемом и также облицованном участке канала (ПК 113+40 – ПК 134+93) выявлены некоторые нарушения и деформации защитного покрытия в виде его неравномерного распределения по откосу выше уреза воды. Обнаружены отдельные элементы каменной наброски с размером фракции 0,40 м и более с последующим ее неравномерным распределением [112].

Конструкция применяемого противофильтрационного экрана с использованием геосинтетических материалов на основе бентонита на участке ДМК (ПК 108+62,81 – ПК 112+94) представлена на рисунке 6.7.

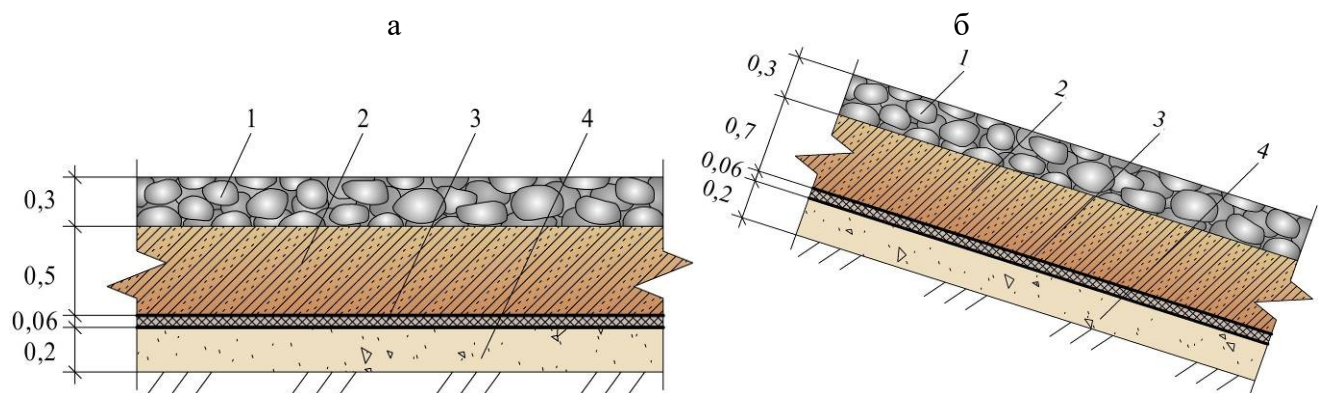


Рисунок 6.7 – Конструкция противофильтрационного экрана на участке ДМК: а – конструкция экрана по дну; б – конструкция экрана на откосах; 1 – слой каменной наброски из камня $d=15-25$ см, толщиной 0,3 м; 2 – защитный слой грунта из суглинки толщиной 0,5 и 0,7 м; 3 – противофильтрационный элемент; 4 – подстилающий слой песка толщиной 0,02 м

В составе комбинированного экрана в качестве водонепроницаемого элемента применялся материал, состоящий из двух слоев геотекстиля (несущего и покрывающего), противофильтрационного элемента из бентонита и термоскрепленной геомембраны. Подстилающее основание представлено песчаной «подушкой», защитное покрытие из суглинка и пригрузочный слой из каменной наброски по дну и на откосах различной фракции (от 0,18 до 0,58 м).

Проведенные натурные исследования показали, что в прирезовой зоне на некоторых других участках магистрального канала (ПК 113+40 – ПК 134+93) имеется незначительное зарастание правого откоса камышом и рогозом (рисунок 6.8).



Рисунок 6.8 – Зарастание камышом поверх комбинированной противофильтрационной облицовки

Для установления причин зарастания и определения повреждаемости противофильтрационного элемента были проведены исследования на опытных участках канала после его опорожнения. Для этих целей были выполнены шурфы (рисунок 6.9) в непосредственных местах прорастания камышом, что позволило в натуральных условиях оценить состояние отдельных, входящих в состав противофильтрационного экрана, элементов. По результатам натурных исследований противофильтрационного покрытия с применением бентонитовых материалов было установлено, что распространение корней происходит в суглинистом защитном слое и ограничивается, как правило, на глубине до 45 см от поверхности.



Рисунок 6.9 – Исследования облицованного участка ДМК

На некоторых участках ДМК наблюдалось прорастание корней в верхний покрывающий геотекстильный слой без его сквозного повреждения, что обеспечивалось применением дублирующего противофильтрационного элемента из геомембраны, выполненной с шероховатыми элементами (уложенными вниз) для снижения скольжения полотна на откосах. На противофильтрационном элементе отсутствовали видимые повреждения, проколы и вмятины. Прорастания камыша через гидроизоляционный материал не наблюдалось, отдельные корни оставались между слоями бентонитовой глины и геомембраной (рисунок 6.10).



Рисунок 6.10 – Бентонитовый мат с корнями камыша между двумя противофильтрационными слоями

Песчаная подготовка в конструкции облицовки была распределена равномерно и уплотнена. Комьев грунта, строительного мусора, перемешивания отдельных слоев и крупных включений не наблюдалось.

Техническое состояние участка магистрального канала было оценено как работоспособное (согласно СТО 1.1-1-2020 [209]), а службе эксплуатации были даны рекомендации по обслуживанию противofильтрационной облицовки и необходимости удаления камыша в приурезовой зоне. В приканальной зоне на участке канала после перегораживающего сооружения (на 45-м км) за правой дамбой выполнена дренажная канава для перехвата грунтовых вод. Последующего выхода грунтовой воды на поверхность (как было обнаружено автором ранее в 2015 г.) не наблюдалось.

На этом же участке ДМК за левой дамбой канала, где отсутствует дренаж, наблюдался выход грунтовых вод на поверхность с образованием нескольких «блюдца» площадью 50–400 м² и глубиной до 1,0 м (рисунок 6.11).

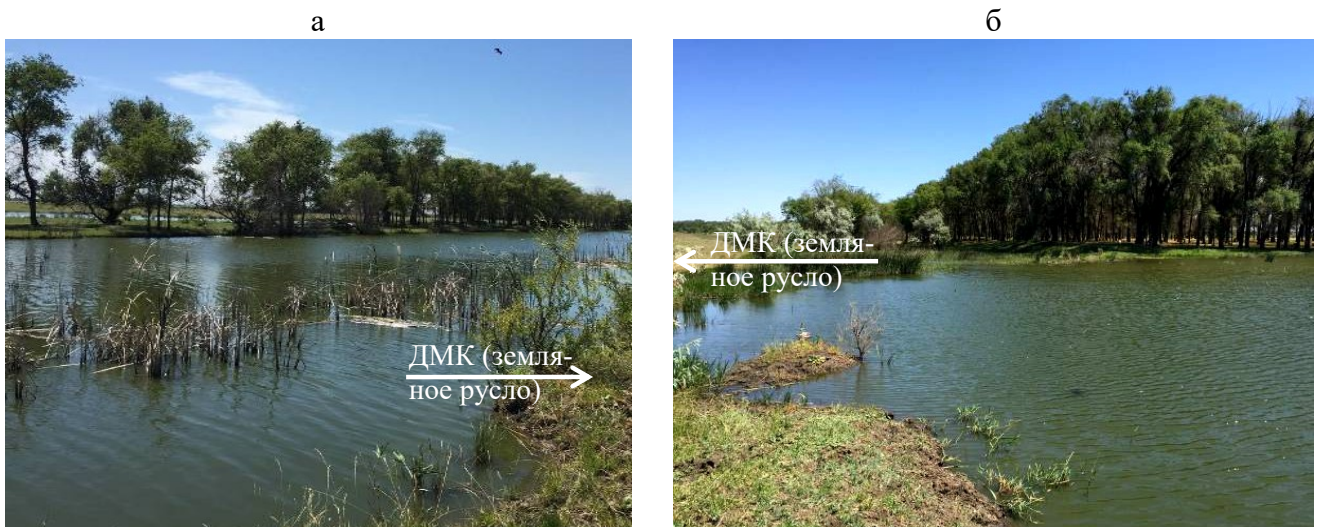


Рисунок 6.11 – Фильтрационные явления на участке ДМК:

а – «блюдца» за левой дамбой участка ДМК; б – выход грунтовых вод за дамбой канала

На протяжении 2 км (в районе х. Комаров) наблюдалось выклинивание фильтрационных вод в основании грунтовой дамбы. Суммарная протяженность таких участков, требующих устройства противofильтрационных покрытий, составляет 3 км. В целом техническое состояние ДМК можно оценить как работоспособное, несмотря на то, что на некоторых участках канала наблюдались значительные потери воды на фильтрацию.

6.3.2 Обследования противофилтрационных покрытий Пролетарского канала

Трасса Пролетарского оросительного канала проложена в средних суглинках, под которыми на небольших участках (с.п. Буденновское, х. Наумовский) наблюдаются суффозионно-карстовые явления [234]. На отдельных участках канала устроена противофилтрационная защита толщиной 1,0 м в виде экрана из глинистых грунтов. Участок протяженностью 500 м (в районе х. Наумовский), где наблюдались карстовые явления, был реконструирован в 2015 г.

Схема поперечного сечения канала (на ПК 1620) до и после реконструкции проиллюстрирована на рисунке 6.12 [117].

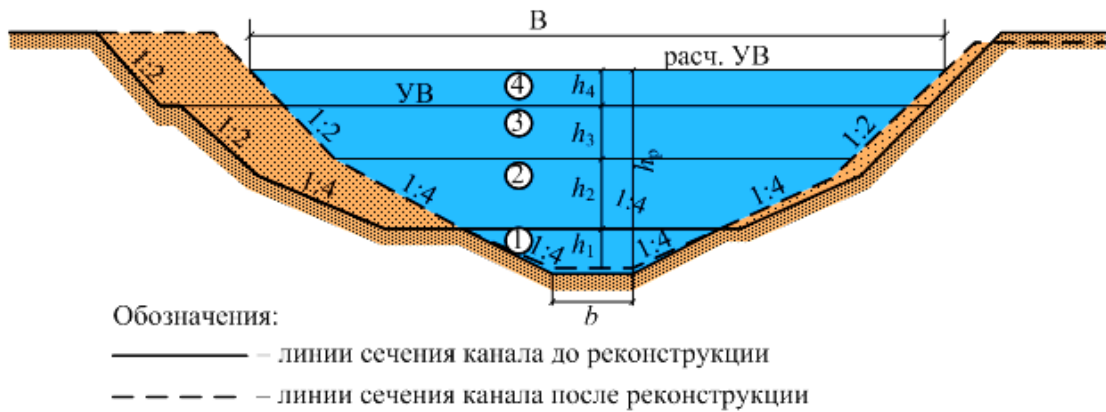


Рисунок 6.12 – Схема поперечного сечения Пролетарского канала (на ПК 1620)

Участок канала, выполненный в земляном русле, характеризуется значительной деформацией грунтовых откосов, а также зарастанием (рисунок 6.13).



Рисунок 6.13 – Деформация откосов Пролетарского канала на ПК 1630–1640

По данным натурных исследований были сделаны рекомендации о необходимости реконструкции данного участка канала с применением противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов с защитно-пригрузочным слоем из габионов матрацно-тюфячного типа. Рекомендуемая к применению конструкция противофильтрационного экрана приведена на рисунке 6.14.

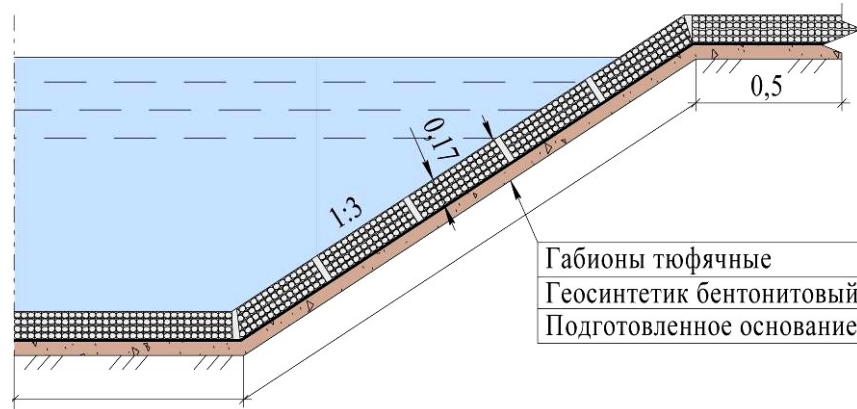


Рисунок 6.14 – Рекомендуемый вариант конструкции экрана для условий участка реконструкции Пролетарского канала

Конструкция противофильтрационного покрытия была рекомендована к применению на наиболее проблемных участках канала при его реконструкции и включает противофильтрационный элемент из трехслойного ПФЭ на основе бентонита и геомембраны, подготовленное и уплотненное грунтовое основание и защитно-пригрузочный слой из габионов матрацно-тюфячного типа высотой от 0,17 м.

Техническое состояние на других участках канала оценивается как ограниченно работоспособное [33, 37], наблюдается деформация русла и оползание откосов (заложение откосов 1:4, в верхней части заложение откосов 1:1,5). На поворотном участке Пролетарского канала обнаружено значительное зарастание водной растительностью. За мостовым сооружением (от ПК–1622, ст. Буденновская и далее к головному сооружению) земляное русло характеризуется значительным зарастанием не только водной, но и древесно-кустарниковой растительностью как на правом, так и на левом земляных откосах канала.

Два наиболее опасных участка (ПК 108+62,84 по ПК 134+93,05) частично протрассированы в известняках и характеризуются наличием карстовых явлений. В 2015 г. на данных участках канала была проведена реконструкция и выполнен

экран из бентонитовых матов, ламинированных мембраной с устройством защитного слоя из суглинка толщиной 0,3 м, пригрузочного покрытия из каменной наброски толщиной 0,3 м с диаметром камня 15 ÷ 25 см (рисунок 6.15).

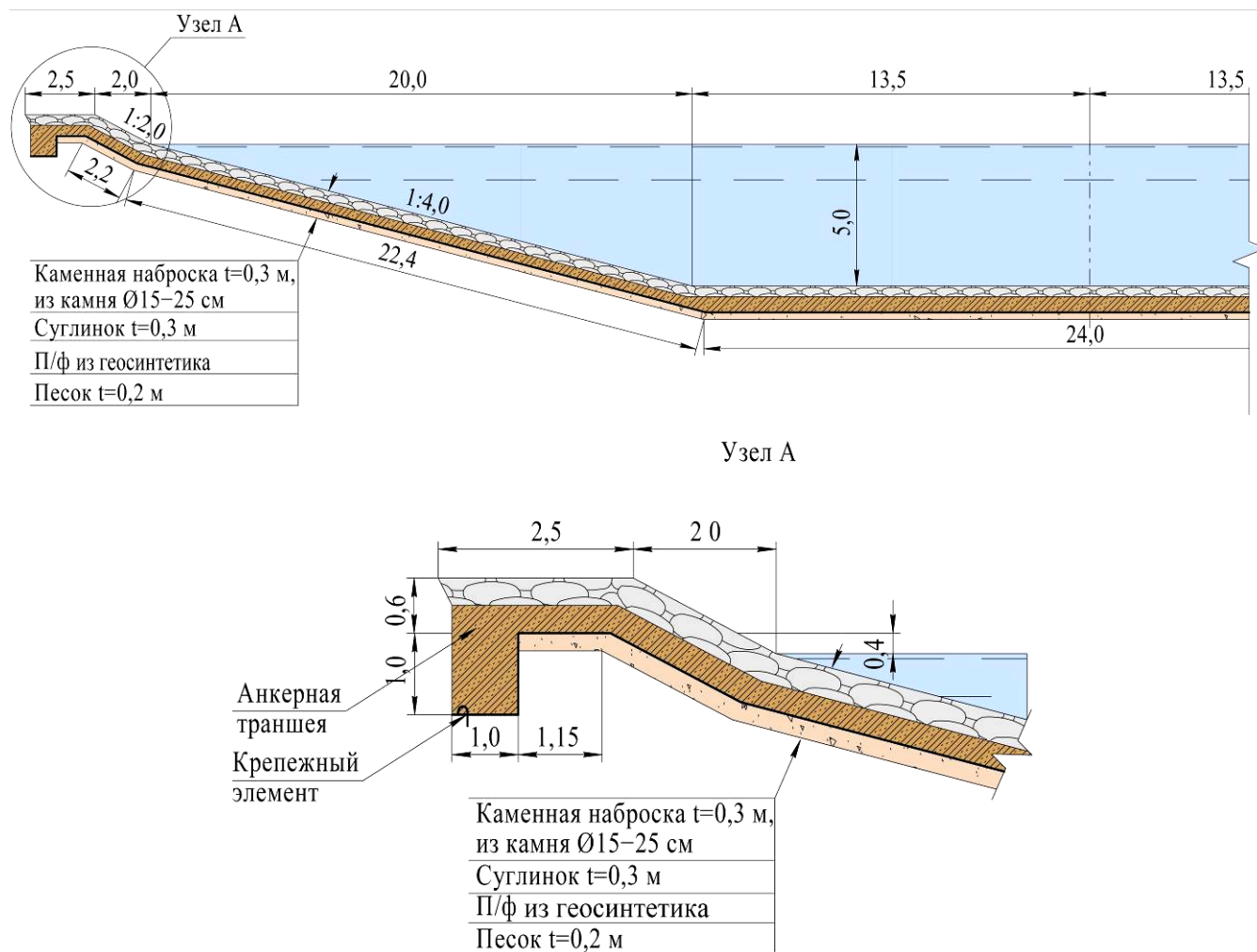


Рисунок 6.15 – Конструкция противофильтрационного экрана на участке Пролетарского канала

Натурные исследования конструкции противофильтрационного экрана на реконструируемом участке Пролетарского канала (ПК 108+62,84 по ПК 134+93,05) выполнялись в 2020 г. По результатам натурных исследований выход воды за дамбы канала (как это было ранее в 2010–2012 гг. с подтоплением и заболачиванием приканальных территорий) не наблюдался, оползание каменного материала отсутствовало, имелось незначительное зарастание русла (рисунок 6.16).



Рисунок 6.16 – Реконструируемый участок облицовки канала

Кроме того, были проведены исследования на втором участке реконструкции противофильтрационной облицовки канала (с ПК 1480+0,05 по ПК 1489+01,7), где залегают разрушенные известняки повышенной водопроницаемости (коэффициент фильтрации по данным изысканий составлял в пределах от 5,0 до 10,0 м/сут.). Конструкция применяемого противофильтрационного экрана на данном участке канала проиллюстрирована рисунком 6.17.

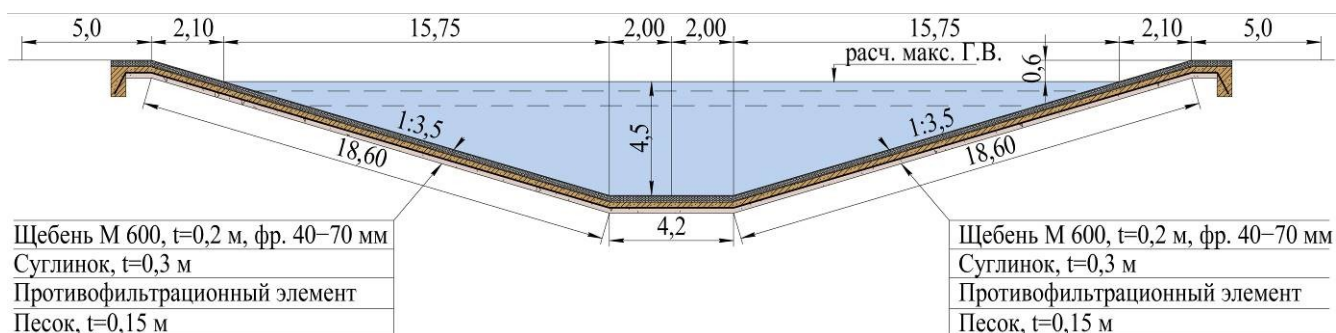


Рисунок 6.17 – Поперечное сечение канала с противофильтрационным экраном

По результатам натурных обследований реконструируемого участка канала был зафиксирован выход полотнищ противофильтрационного элемента на откосе, что объясняется его сдвигом при производстве работ и устройстве защитного покрытия (рисунок 6.18).



Рисунок 6.18 – Противофильтрационный элемент на откосе канала

По результатам натурных исследований участков Пролетарского канала даны рекомендации по устранению обнаруженных дефектов путем устройства противофильтрационных покрытий на необлицованных и наиболее опасных участках, выполненных в земляном русле, а также предложены варианты конструктивных решений, позволяющих снизить деформации и оползание откосов.

6.3.3 Результаты натурных исследований участков реконструкции Невинномысского канала

Объектом исследований являются наиболее опасные участки и участки реконструкции Невинномысского канала.

Цель – проведение натурных обследований откосов магистрального канала и защитных покрытий из каменной наброски и геотекстиля.

Задачи натурных исследований:

- выполнить визуальные обследования состояния противофильтрационной облицовки и защитных покрытий на Невинномысском канале;
- провести наблюдения за технологией выполнения работ по устройству покрытий на наиболее опасных участках канала, характеризующихся локальными размывами, деформациями, зарастанием и просадками.

Натурные обследования Невинномысского канала проводились от ПК 66+62. На участках канала (ПК 247) наблюдались размывы откосов (в том числе в местах закрепления каменным материалом), по правому и левому берегу зарастание, локальные деформации русла (рисунок 6.19).



Рисунок 6.19 – Закрепленные участки с размывами и деформациями русла

Выполнено крепление правого откоса канала (на протяжении 120 м) каменным материалом перед мостовым сооружением (ПК 282+55). Просадок и размывов на реконструируемом участке канала на момент проведения натурных исследований не наблюдалось (рисунок 6.20).



Рисунок 6.20 – Укрепленное камнем ложе Невинномысского канала на ПК 426

На противоположном откосе и за мостовым сооружением наблюдается значительное зарастание русла и откосов камышом. На участке от ПК 426 до ПК 439 эксплуатационной организацией проведены мероприятия, заключающиеся в укреплении бортов и ложа каменным материалом, под который уложен геотекстиль.

Конструктивная схема применяемого защитного покрытия на участках Невинномысского канала проиллюстрирована на рисунке 6.21.

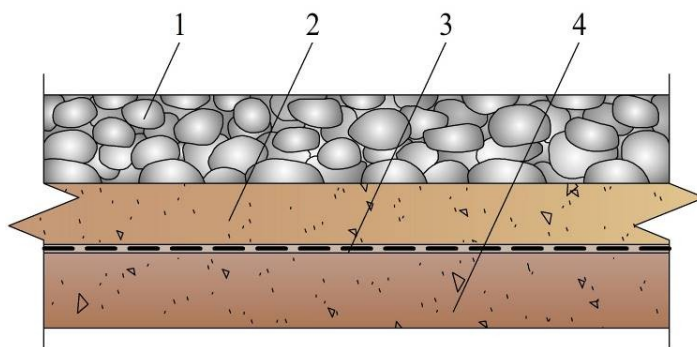


Рисунок 6.21 – Конструктивная схема покрытия на участке канала:
1 – каменная наброска; 2 – суглинок; 3 – геотекстильное покрытие; 4 – основание

В конструктивном исполнении данное покрытие предназначено для предотвращения размывов русла и деформации грунтовых откосов. Размер фракции каменной наброски составляет в пределах 0,15–0,25 м с толщиной слоя от 0,2 м и более. Геотекстильное покрытие для исключения сползания закреплялось в штрабу, выполненную на берме канала.

На участке канала (ПК 450) выполнена отсыпка камнем с толщиной слоя до 0,4 м. Просадочные явления не наблюдаются. На ПК 450+30 отсутствует крепление и наблюдается оползание грунтового откоса (рисунок 6.22).



Рисунок 6.22 – Оползание защитных покрытий на участках канала:
а – состояние грунтового откоса (ПК 450+30); б – смещение камня на ПК 66+62

На участке канала (ПК 466) выполняются работы по устройству штрабы, и укладке полотнищ геотекстильного покрытия (рисунок 6.23).



Рисунок 6.23 – Устройство штрабы под геотекстильное покрытие

На ПК 470 Невинномысского канала проводятся работы по подготовке правого откоса канала под устройство защитного покрытия, включающие удаление растительности и выколаживание откоса, укладка геотекстиля и отсыпка камня.

По данным проведенных натурных обследований Невинномысского канала в период с 21 по 23 октября 2019 г. можно сделать следующие выводы.

1. На участках Невинномысского канала в пределах ПК 247 наблюдаются размывы откосов (в том числе в местах закрепления каменным материалом), по правому и левому берегу – зарастание водной растительностью и локальные деформации русла по трассе канала.

2. На участке от ПК 426 до ПК 439 выполнены мероприятия, заключающиеся в укреплении бортов и ложа каменным материалом, под который уложен геотекстиль. Просадок и размывов на данных участках не наблюдалось.

3. На участке ПК 470+20 наблюдается смещение камня, незначительный размыв и оползание грунтового откоса. На ПК 470 производятся работы по устройству защитного покрытия.

6.3.4 Исследования противофильтрационной облицовки Перебросного магистрального канала

Объектом исследований являлся Перебросной канал протяженностью 4,8 км от каскада Барсучковских ГЭС к Невинномысскому каналу, участки которого выполнены: с комбинированной противофильтрационной облицовкой; защитным покрытием из каменной наброски различной фракции (по участкам); дренирующе-фильтрующими элементами; бетонными и железобетонными (ж/б) облицовками и в земляном русле.

Целью работы являлось проведение натурных обследований русла и откосов канала, защитных бетонных покрытий и гидротехнических сооружений.

Задачи исследований:

- провести обследования реконструируемых участков канала, выполненных с противофильтрационной облицовкой и защитным покрытием из каменной наброски, бетона;
- выполнить визуальные и инструментальные обследования состояния бетонных и железобетонных элементов;
- провести наблюдения за технологией выполнения работ по инъектированию пустот и трещин под защитными бетонными покрытиями;
- определить параметры русла канала (ширину по дну, по верху, коэффициент заложения откосов, толщину противофильтрационного элемента и защитного покрытия, а также параметры применяемых геосинтетических материалов в конструкциях противофильтрационной облицовки).

Натурные обследования состояния противофильтрационных покрытий магистрального канала проводились от ПК 00.

По результатам таких исследований (рисунок 6.24) на защитных откосах (железобетонных плитах) были выявлены различного рода повреждения: разрушения бетона и железобетонных плит на глубину до 14 см; отшелушивание и локальное повреждение поверхности бетона; просадки плит на откосе (на величину до 11,5 см); расхождение швов между плитами до 6,2 см; трещины и сколы бетона протяженностью до 73 см с шириной раскрытия до 2,9 см; сколы бетонной проти-

вофильтрационной облицовки на глубину до 12,8 см, а также пустоты под защитными бетонными покрытиями.



Рисунок 6.24 – Исследования трассы участка облицованного канала

Одновременно с этим службе эксплуатации даны рекомендации по устранению данных дефектов жидкими композиционными и рулонными геосинтетическими материалами. Некоторые из обнаруженных деформаций проиллюстрированы на рисунке 6.25.



Рисунок 6.25 – Трещины и сколы на бетонном покрытии облицовки:
а – трещина на бетонном защитном покрытии; б – сколы на бетонной облицовке

С целью исключения фильтрационных процессов и деформаций бетонного покрытия с использованием компрессорного оборудования производилось запол-

нение пустот раствором на основе глины и цемента, подаваемого под давлением через предварительно выполненные отверстия в бетонной облицовке.

По данным натурных исследований (на 20.10.2019 г.) на ПК 338+30 – ПК 339+80 не завершены работы по строительству бетонной облицовки на общей площади 90 м². Уложены полотнища нетканого геотекстиля, поверх которого устроена арматура, противодиффузионный элемент на данных участках канала отсутствует (рисунок 6.26).



Рисунок 6.26 – Участок незавершенного строительства противодиффузионной облицовки на участке канала:
устройство экрана на верховом (а) и низовом (б) откосах

На участке (ПК 9,0+150 ПК 11+00) по данным натурных исследований на 21.10.2019 г. производятся работы по экранированию земляного русла, включающие укладку нетканого геотекстиля на подготовленное грунтовое основание, устройство арматуры, выполнение шпоночных соединений между отдельными картами из гидроизоляционного полимерного материала.

На ПК 19+27 (от концевой части бетонного лотка и далее в сторону водозаборного сооружения) по данным на 20.10.2019 г. не закончены работы по созданию русла канала и устройству противодиффузионной облицовки.

Соединение отдельных карт железобетонных облицовок и деформационных швов производилось с применением профилированной мембраны, которая укладывалась жесткими ребрами вверх (высота выступов 5,0 см) с последующей укладкой бетона (рисунок 6.27).



Рисунок 6.27 – Устройство шпоночного соединения на ПФП

На участке канала, выполненного ПФП, через каждые 1,3–1,5 м по дну и на откосах устроены дренирующие («разгрузочные») устройства, позволяющие осуществлять свободный выход грунтовых вод в канал при их подъеме в весенний период. Поперечные профили Перебросного канала в облицовке и с защитным покрытием из каменной наброски приведены на рисунках 6.28 и 6.29.

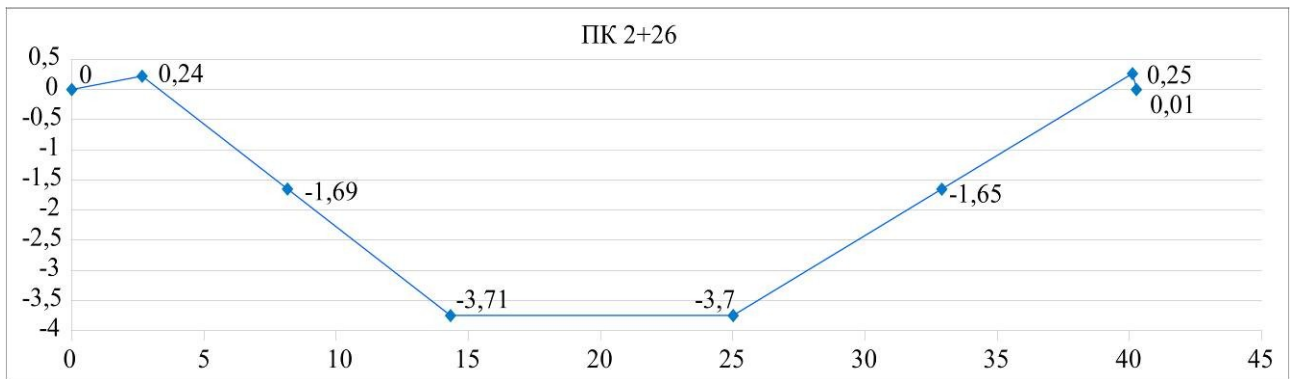


Рисунок 6.28 – Поперечный профиль перебросного Невинномысского канала на ПК 2+26, съемка произведена по урезу воды

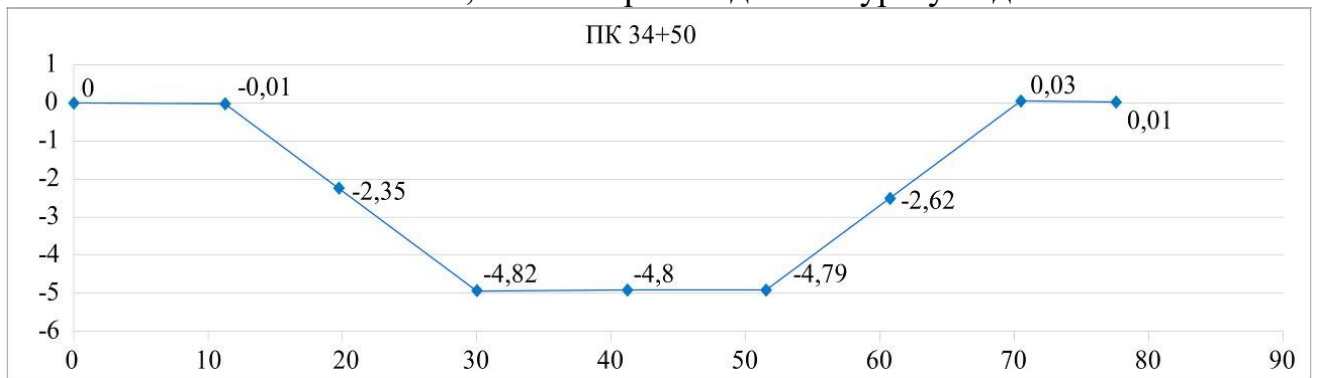


Рисунок 6.29 – Поперечный профиль перебросного канала на ПК 34+50 (каменная наброска), съемка произведена по дну канала

По данным проведенных натурных обследований Перебросного канала можно сделать следующие заключения:

1. Бетонное защитное покрытие на откосах вблизи входной части водозаборного сооружения находится в неудовлетворительном техническом состоянии. На некоторых участках наблюдаются просадки плит, пустоты, трещины, сколы и расхождение деформационных швов. Производятся работы по инъектированию подплитного пространства с применением смеси из глины и цемента.

2. На выходном портале, переходящем в канал, наблюдаются размывы грунта на откосах и его оползание на бетонную поверхность облицовки. На железобетонной части (над водопроводящим трактом) на протяженности 9,2 м частично разрушено бетонное покрытие, наблюдается оголение арматуры.

3. Комбинированная противofильтрационная облицовка Перебросного канала выполнена с соблюдением требований нормативной документации, включает конструктивные элементы в виде нетканого геотекстиля, арматуры и бетона толщиной от 15 до 18 см, профилированную геомембрану, устроенную под деформационными швами.

4. На некоторых участках канала не завершены работы по строительству противofильтрационной облицовки, на период обследования местами отсутствовало защитное покрытие противofильтрационного элемента.

6.3.5 Результаты обследования магистрального канала Аксыра

Натурные обследования магистрального канала «Аксыра» проводились в период с 30 по 31 октября 2019 г. Во время обследований выполнялась реконструкция участков магистрального канала, включающая восстановление дна и откосов, устройство противofильтрационного экрана, профилирование канала, реконструкцию гидротехнических сооружений. Протяженность реконструируемого участка канала – 21,7 км. Поперечное сечение магистрального канала трапециевидальное, большая часть в земляном русле.

Целью реконструкции участков (рисунок 6.30) канала Аксыра являлось восстановление пропускной способности канала, а также исключение подтопления и потерь воды в оросительной сети.



Рисунок 6.30 – Участок реконструкции канала Аксыра:
а – сопряжение земляного русла с бетонным покрытием канала; б – противофильтрационный экран по дну, включающий геотекстиль, глину, камень

Схема поперечного сечения участка канала Аксыра с противофильтрационным элементом из бентонита по дну представлена на рисунке 6.31.

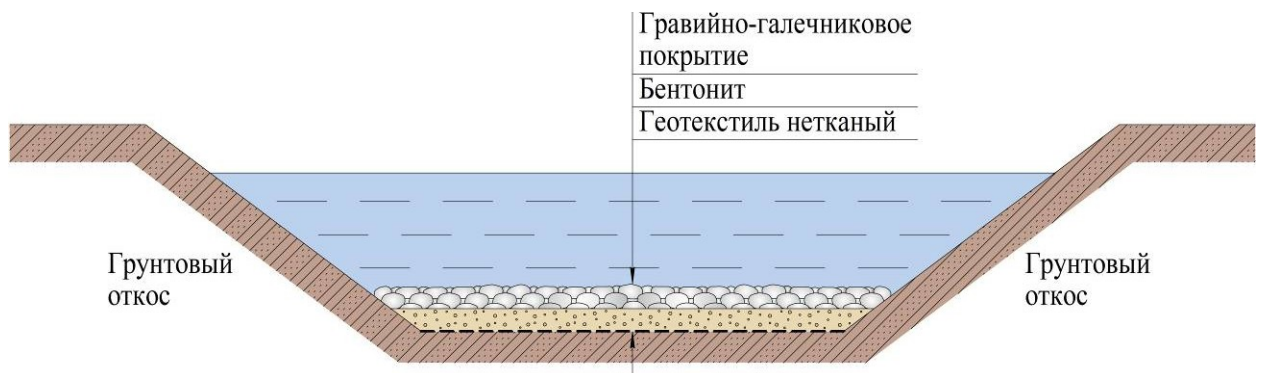


Рисунок 6.31 – Схема поперечного сечения канала Аксыра с противофильтрационным покрытием по дну

Учитывая неудовлетворительное состояние гидротехнических сооружений, отсутствие частей сооружений вследствие их разрушения, низкую прочность железобетонных конструкций, предусматривалась полная замена некоторых сооружений. Общее количество гидротехнических сооружений, подлежащих реконструкции: 51 открытый быстроток и 16 водовыпусков.

На двух участках ПК 13+26 – ПК 13+53 и ПК 13+71 – ПК 14+0,6, где канал имеет резкий разворот, происходил размыв откосов и русла, проводились мероприятия по укреплению монолитным железобетоном по бетонной подготовке ($t = 10$ см). Монолитный железобетон марок В15, F150, W6 укладывался по дну с толщиной слоя $t = 20$ см, на откосы $t = 10$ см. На сопряжении укрепленных участков с земляным руслом предусмотрено устройство зуба из каменной наброски диаметром фракции 10–15 см. Строительства сопрягающих сооружений (быстро-токов открытых с пропускной способностью $Q = 10$ м³/с) выполнялось с гидро-изоляцией бетонных поверхностей.

На всей протяженности магистрального канала при проведении реконструкции была выполнена корчевка деревьев и кустарника, убран камыш.

В качестве противодиффузионного покрытия на участках канала выполнялся экран из суглинка легкого твердого (с максимальной плотностью сухого грунта 1,7 г/см³) толщиной слоя 0,2 м с последующим тщательным послойным уплотнением (коэффициент уплотнения 0,98) и бентонита. Поверх суглинка устраивалось защитное покрытие из гравийно-галечникового материала со средним диаметром фракций 30–40 мм, толщиной слоя 0,2 м (рисунок 6.32).



Рисунок 6.32 – Реконструкция участков магистрального канала Аксыра с применением противодиффузионных покрытий:

а – разработка русла канала на ПК 54+83; б – устройство противодиффузионного экрана

Между противодиффузионным элементом из суглинка и естественным грунтом основания укладывались полотнища из геотекстиля типа «Дорнит» плот-

ностью 300 г/м^2 и более. В местах понижений предусматривались работы по наращиванию берм, а на наиболее опасных участках – устройство облицовок с подсыпкой дна на протяженности 19,4 км.

По данным материалов изысканий, коэффициент фильтрации для противofильтрационного элемента из суглинка составляет 0,57 м/сут, для галечниковых грунтов, залегающих в основании канала, – 65,2 м/сут. Из неблагоприятных процессов на участке канала отмечаются эрозионные процессы по размыву бортов и дна канала. Наиболее интенсивно данные явления наблюдались на участках в пределах ПК 57+50 – ПК 58+10, ПК 121+80 – ПК 124+70. Территория трассы канала в процессе его работы практически всегда была подтоплена. Участки в районе ПК 15+54 и ПК 216+72 являются сезонно подтопляемыми за счет фofильтрационных процессов из магистрального канала.

По данным проведенных натурных обследований магистрального канала Аксыра можно сделать нижеследующие заключения.

1. Противofильтрационная облицовка по дну выполнена из тканого геотекстиля, поверх которого уложен суглинок и бентонит с защитным покрытием из каменно-гравийного материала. Бетонные поверхности и примыкания покрыты герметизирующим полимерным жидким материалом.

2. Русло магистрального канала от ПК 63+10 характеризуется сильным зарастанием водной растительностью, полным разрушением бетонных элементов и входящих в состав гидротехнических сооружений. От ПК 80+53 наблюдается сильное заиление (с толщиной слоя наносов и ила 50 см и более).

3. Пропускная способность канала Аксыра изменилась за период эксплуатации, по сравнению с его проектными значениями. Коэффициент шероховатости русла канала увеличился и достиг значений 0,036–0,040 (в сравнении с проектным коэффициентом шероховатости 0,0225). Увеличение коэффициентов шероховатости связано с зарастанием и заилением русла канала, размывами грунта.

На рисунке 6.33 приведен поперечный разрез канала Аксыра на ПК 20+71, а на рисунке 6.34 – поперечный разрез на ПК 35+55.

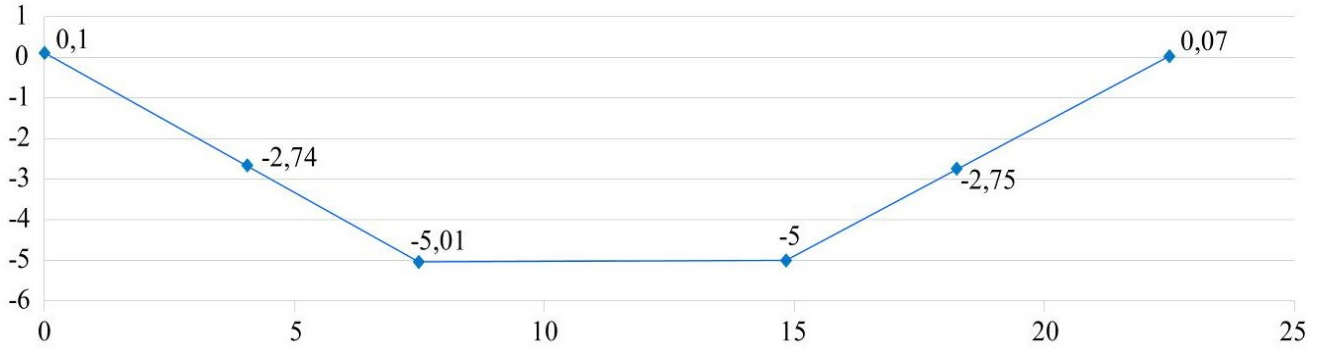


Рисунок 6.33 – Поперечный разрез канала Аксыра на ПК 20+71

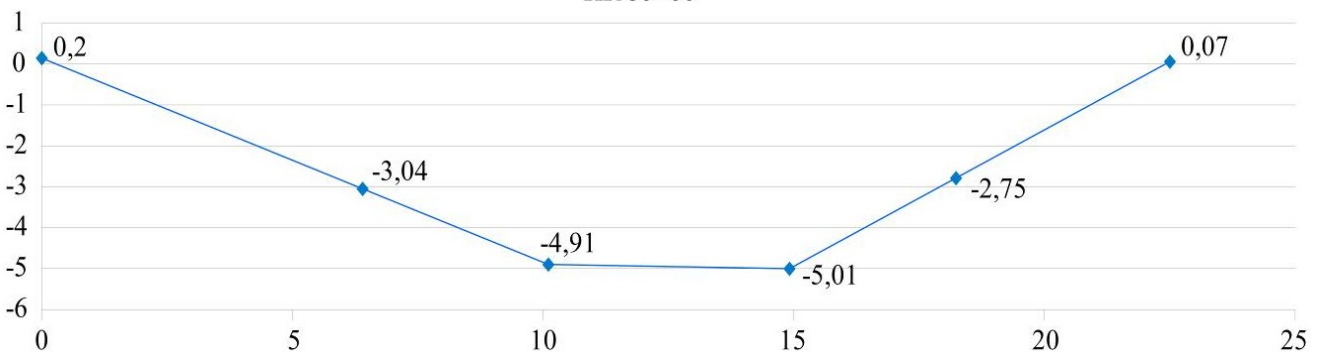


Рисунок 6.34 – Поперечный разрез канала Аксыра на ПК 35+55

Поперечные разрезы по участку обследования канала Аксыра, представленные на рисунках 6.33 и 6.34, получены по результатам геодезической съемки, выполненной с участием автора.

6.4 Натурные данные по обследуемым каналам и сведения о их техническом состоянии

Обобщенные натурные данные по обследуемым каналам (с учетом исследований [82, 106, 125]) и полученные среднестатистические значения КПД для различных типов противофильтрационных облицовок проиллюстрированы в приложении Д. Для необлицованных участков каналов (без учета потерь воды на технологические нужды, испарение, катастрофические сбросы и потерь, связанных с наполнением каналов и поддержанием уровней воды) среднестатистическое КПД составляет $\bar{\eta} = 0,821$, а доверительный интервал (т. е. интервал, относящийся-

ся к средним значениям) – $\bar{\eta} = 0,786–0,856$. Для каналов, выполняемых с бетонными облицовками, полученное среднестатистическое значение КПД составит $\bar{\eta} = 0,863$, доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,817–0,907$. Противофильтрационные покрытия в виде облицовок из полимерных геомембран и защитных покрытий из бетона имеют более высокие показатели: КПД $\bar{\eta} = 0,972$, доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,956–0,982$. Для противофильтрационных покрытий каналов, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов, среднестатистическое значение КПД составит порядка $\bar{\eta} = 0,970$, а доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,965–0,988$.

Натурные данные имеющихся деформаций на обследуемых каналах (с учетом ранее полученных в работах автора и источниках литературы [33, 82]) представлены в таблице 6.1, основными из которых являются: зарастание необлицованных и (или) облицованных каналов (в том числе с защитными покрытиями) водной растительностью (в основном откосов камышом и рогозом), разрушения деформационных швов защитных бетонных покрытий и шелушение бетона, деформации неукрепленных откосов на наиболее опасных участках каналов, фильтрация через дамбы и многие другие.

По результатам анализа таблицы 6.1 можно сделать вывод, что техническое состояние некоторых каналов характеризуется как ограниченно работоспособное. Это объясняется как сроком эксплуатации каналов и многих гидротехнических сооружений, составляющим 50–55 лет и более, так и наличием различного рода деформаций и разрушений, приводящим к потерям воды и ограниченному функционированию некоторых оросительных систем.

Натурные и расчетные данные характеристик обследуемых участков каналов на примере ДМК (до и после реконструкции противофильтрационных облицовок) приведены в таблице 6.2.

На рисунке 6.35 представлена линейная схема Перебросного магистрального канала с обнаруженными при проведении натурных исследований по трассе канала дефектами и повреждениями.

Таблица 6.1 – Сведения по обследованным каналам и обнаруженные дефекты

Наименование канала	Расход, м ³ /с	Длина, км	Глубина воды в канале, м	Характер ложа (земляное, облицованное и др.)	Обнаруженный дефект и деформация	Техническое состояние и уровень безопасности*
1	2	3	4	5	6	7
Азовский	18,0	84,9	0,5–3,7	Земляное	Частичное зарастание откосов растительностью; размывы; обрушения; оплывы; заиление	Ограниченно работоспособное (физический износ > 30 %); неудовлетворительный
Багаевский	34,5	36,4	3,0–4,4	Земляное	Зарастание растительностью по всей длине и заиление	Ограниченно работоспособное (физический износ > 25 %), неудовлетворительный
Бг-Р-6	6,2	24,0	1,6	Ж/б сборная + пленка	Участки разрушения бетонных плит; зарастание канала	Работоспособное
Бг-Р-7	8,7	22,6	1,5	Ж/б сборная + пленка	Разрушение подплитного покрытия и швов; откосы и дно частично заросли водной растительностью	Работоспособное (физический износ до 15 %), удовлетворительный
Бг-Р-8	6,5	7,8	1,7	Ж/б сборная + пленка	Разрушение ж/б покрытия и швов; зарастание откосов	Работоспособное (физический износ до 20 %), удовлетворительный
Садковский	5,0	8,9	1,5	Земляное	Разрушение откосов; зарастание откосов камышом, заиление дна канала	Ограниченно работоспособное (физический износ > 25 %), удовлетворительный
Пролетарский	54,0	83,4	1,8–3,0	Земляное, частично облицованное	Оползание и разрушение грунтовых откосов; местами зарастание откосов и заиление дна канала	Работоспособное (физический износ > 20 %), удовлетворительный
Донской магистральный	160	112	5,8	Земляное, бетонная и ж/б облицовка, покрытие из бентоматов	Инфильтрация воды; подтопление приканальных территорий; зарастание камышом; размывы откосов на наиболее опасных участках	Работоспособное (физический износ > 20 %), удовлетворительный

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7
Невинномысский	75	54	3,9	Земляное, каменная наброска + геотекстиль	Размывы откосов (в том числе в местах закрепления камнем); зарастание водной растительностью; локальные деформации русла и откосов	Работоспособное (физический износ > 20 %), удовлетворительный
Перебросной магистральный	66	4,87	3,8	Земляное, ж/б и комбинированная облицовка	Просадки ж/б плит; пустоты под бетонными покрытиями; трещины, сколы и расхождение деформационных швов	Работоспособное (физический износ до 15 %), удовлетворительный
Аксыра	10,0	21,7	1,3–1,5	Земляное, частично облицованное с бентонитом	Зарастание русла; разрушение бетонных элементов сопрягающих сооружений; заиливание; подтопление участков на ПК 15 + 54 и ПК 216 + 72	Ограниченно работоспособное (физический износ > 25 %), удовлетворительный

Примечание* – показатель не является окончательным, получен по результатам и на дату проведения натуральных исследований, может изменяться с течением времени при проведении реконструкции, модернизации, техническом обслуживании сооружений и др.

Таблица 6.2 – Натурные и расчетные данные характеристик ДМК (по участкам)

Участок, км	Длина, км	Расход, м ³ /с	Потери, 10 ³ м ³ /сут		КПД
			на фильтрацию	на испарение	
до реконструкции					
0–115	115	250/80	1475	31,4	0,89
при подпертой фильтрации					
45–115	70	80	94,4	24,6	0,980/0,970*
при свободной фильтрации					
45–115	70	80	3285	22,7	–
после реконструкции					
45–115	70	110	35,7	23,2	–

Примечание * – с учетом технических потерь (на сброс и утечки через затворы).

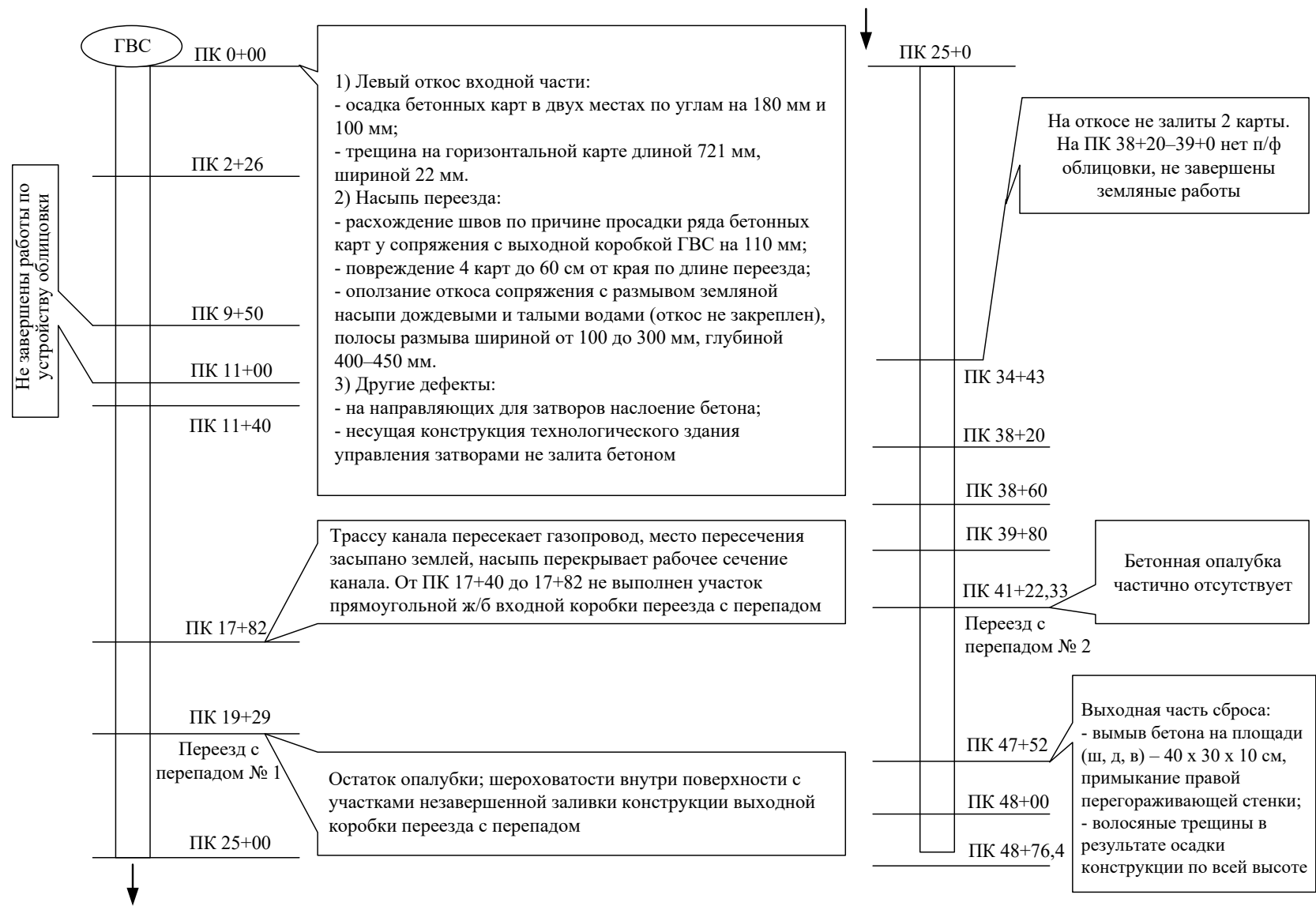


Рисунок 6.35 – Линейная схема Перебросного канала с обнаруженными дефектами

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. Выполненные автором натурные исследования облицованных с применением геосинтетических материалов оросительных каналов позволили получить новые данные об их текущем техническом состоянии, установить прогнозный уровень безопасности и основные деформации, возникающие с течением времени при их эксплуатации. Несовершенство применяемых конструктивных решений на некоторых каналах приводит к их зарастанию (при наличии облицовок), возникновения аварийных ситуаций, связанных с фильтрационными процессами и переливом воды через бровки каналов. Для наиболее опасных участков каналов составлены сведения по обнаруженным деформациям и дефектные ведомости.

2. Накопленный по результатам натурных исследований автором опыт был использован при разработке новых (более эффективных) конструкций противофильтрационных экранов для оросительных каналов. Исследования на опытных участках ДМК с устройством шурфов позволили оценить техническое состояние конструкции экрана и отобрать образцы противофильтрационного материала для проведения дальнейших экспериментальных исследований фильтрационных и физико-механических (прочностных) характеристик.

3. По результатам проведенных натурных исследований получены обобщенные натурные данные по обследуемым каналам и рассчитаны среднестатистические значения КПД для различных типов облицовок. Для необлицованных участков каналов (без учета потерь воды на технологические нужды, испарение, катастрофические сбросы и потери, связанные с наполнением каналов и поддержанием уровней воды) среднестатистическое значение КПД составляет $\bar{\eta} = 0,821$, а доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,786-0,856$. Для каналов, выполненных с бетонными облицовками, полученное среднестатистическое значение КПД составило $\bar{\eta} = 0,863$, доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,817-0,907$. Противофильтрационные покрытия в виде облицовок из полимерных геомембран с защитным слоем из бетона имеют более высокие показатели КПД $\bar{\eta} = 0,930$, доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,956-0,982$. Для противофильтрационных покрытий каналов, выполняемых

из бентонитовых материалов, среднестатистическое значение КПД составило $\bar{\eta} = 0,970$, а доверительный интервал $\bar{\eta} = 0,965-0,988$.

4. Выполненные натурные исследования на Донском магистральном канале показали, что основными проблемами при его эксплуатации является зарастание русла водной и древесно-кустарниковой растительностью, наличие слоя (от 0,15 до 0,30 м) наносов. По результатам исследования выполнены сравнительные расчеты вариантов противofильтрационных облицовок и даны предложения службе эксплуатации ДМК по проведению противofильтрационных мероприятий с применением геосинтетических материалов на наиболее опасных участках.

5. По результатам проведенных натурных обследований Пролетарского канала обнаружены деформации земляного русла, связанные с проявлением оползневых процессов на наиболее опасных участках, разрушения защитных и противofильтрационных устройств. Даны рекомендации по реконструкции и эксплуатации данных участков, автором разработано применительно к условиям Пролетарского канала конструктивное решение противofильтрационного экрана с защитным покрытием из матрацно-тюфячных габионов.

6. По данным проведенных натурных обследований Невинномысского канала на некоторых участках были обнаружены размывы откосов (в том числе в местах закрепления камнем), зарастание водной растительностью, локальные деформации русла по трассе канала. При проведении реконструкции производилось укрепление бортов и ложа каменным материалом, под который укладывался геотекстиль. Определена необходимость усовершенствования конструкции защитного покрытия ввиду оползания каменного материала на поворотных участках канала и его последующему перемещению водным потоком.

7. При проведении натурных обследований на магистральном канале Аксыра производились работы по реконструкции участков канала, в том числе проведение противofильтрационных мероприятий (по дну), заключающихся в применении в качестве гидроизоляционного элемента бентонита. На извилистых и пересекающих ГТС трассах канала предложено устройство защитных облицовок на грунтовых откосах.

Глава 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

7.1 Методика выбора оптимального варианта противофильтрационного покрытия канала

Настоящая методика предназначена для выбора оптимального и экономически эффективного варианта облицовки из наиболее часто применяемых на оросительных каналах, включающих: традиционные облицовки из монолитного бетона и сборного железобетона из предварительно напряженных плит типа НПК, плит крепления типа ПК, варианты исполнения и типовые параметры которых детально рассмотрены и приведены в типовом проекте (ТП 820-207) [214]. Также рассмотрены разработанные и усовершенствованные варианты противофильтрационных облицовок с геомембраной отечественного или зарубежного производства и защитным покрытием из бетона [236]. К новым типам рассмотренных облицовок в методике выбора оптимального варианта относятся облицовки с геомембраной и защитным покрытием из грунта, а также облицовки из геосинтетических материалов на основе бентонита отечественного или зарубежного производства.

Целью данной методики является выбор оптимального варианта противофильтрационной облицовки оросительного канала по приведенной стоимости (или целевой функции), включающей сметную стоимость облицовки, ущерб от недополучения сельхозпродукции за счет орошения возможной дополнительной площади и подтопления приканальных территорий.

Выбор оптимального варианта противофильтрационной облицовки оросительного канала производится из условия минимума суммы затрат и риска от возможных повреждений противофильтрационного элемента по целевой функции следующего вида [107, 122]:

$$C_f = \min(C_{0f} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\tau_0} P_{0ijf} \cdot Y_{0ijf}), \quad (7.1)$$

где C_{0f} – первоначальная стоимость варианта противофильтрационной облицовки f , руб.;

P_{0ijf} – вероятность отдельных повреждений i в срок эксплуатации j для варианта облицовки f ;

Y_{0ijf} – ущерб, обусловленный недополучением сельхозпродукции (за счет уменьшения площади орошения) и возможным подтоплением прилегающих территорий, руб.;

n – число повреждений на облицовке, шт.;

τ_0 – срок службы облицовки, лет;

- при следующих ограничениях: $n > 0$, $\tau_0 > 0$, $C_0 > 0$, $i \in I$, $j \in J$, $f \in F$.

Использование оптимального варианта облицовки для противофильтрационных целей позволит снизить до минимума потери воды на фильтрацию из оросительных каналов гидромелиоративных систем и практически полностью исключить подтопление прилегающих земель. Применение облицовок на оросительных каналах будет экономически и технически оправдано при обеспечении их водонепроницаемости, надежности работы и долговечности.

В методике выбора оптимального варианта противофильтрационной облицовки оросительного канала (вариант бетонной облицовки) использовались рекомендуемые типовые параметры каналов, представленные в ТП 820-207 [214]).

При последующих расчетах вариантов облицовок оросительных каналов применялись следующие параметры, соответствующие рекомендуемым значениям [214]: $b = 5,0$ м, $m = 2,5$, $h_b = 3,0$ м, $\beta = b/h_b = 2,55$, толщина монолитной облицовки принималась равной $\delta_0 = 0,10$ м, толщина сборной облицовки из плит НПК принималась $\delta_0 = 0,06$ м. Типовые параметры каналов (в том числе строительные глубины и толщины) в монолитной бетонной облицовке по дну и откосам, а также параметры каналов в сборной облицовке из плит НПК принимались по рекомендуемым данным ТП 820-207 [214].

В последующем разработанная методика выбора оптимального варианта противофильтрационной облицовки оросительных каналов была автоматизирована и зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ [178]. Используя данную методику, можно производить расчет приведенной стоимости различных наиболее рас-

пространенных вариантов покрытий каналов: бетонных, сборно-монолитных, с использованием полимерных геомембран (отечественного или зарубежного производства) и защитных покрытий из бетона или грунта, геосинтетических бентонитовых материалов (отечественного или зарубежного производства).

7.2 Результаты расчета экономической эффективности различных типов противofильтрационных покрытий каналов

7.2.1 Расчет приведенной стоимости бетонной монолитной и сборной облицовок

Для сравнения вариантов противofильтрационных покрытий оросительных каналов и последующего экономического сопоставления различных типов облицовок, изначально произведем расчеты для наиболее часто применяемых бетонных монолитных, сборных железобетонных и железобетонных облицовок.

Расчетные схемы сечений канала с бетонной монолитной, сборной железобетонной и сборно-монолитной облицовками приведены на рисунке 7.1.

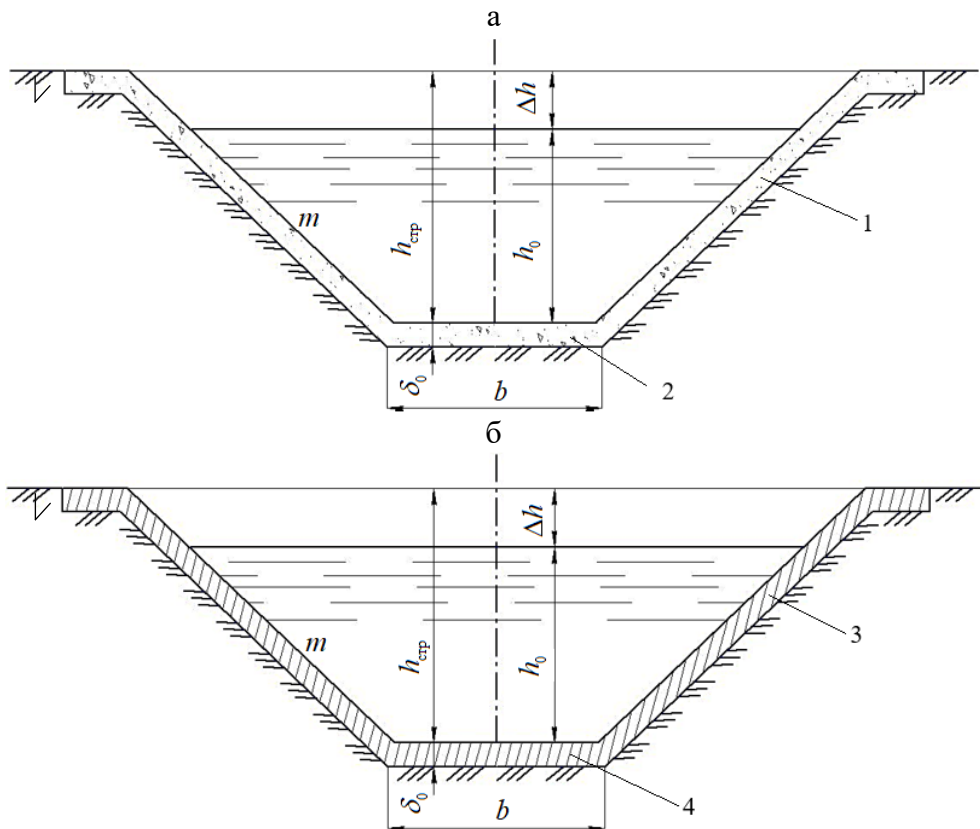


Рисунок 7.1 – Схемы сечений оросительного канала с бетонными облицовками, лист 1

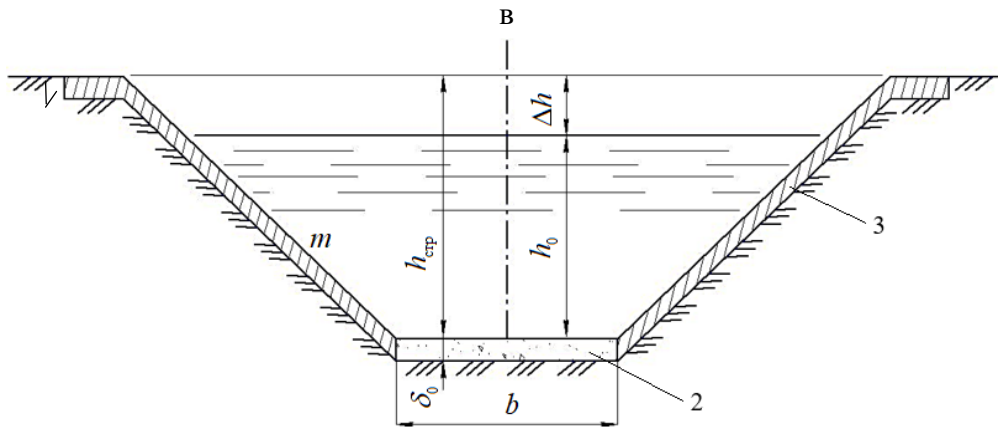


Рисунок 7.1 – Схемы сечений оросительного канала с бетонными облицовками, лист 2:

- а – бетонные монолитные; б – сборные железобетонные из плит НПК;
 в – сборно-монолитные; 1 – монолитная бетонная облицовка на откосах;
 2 – монолитная бетонная облицовка по дну; 3 – устройство плит НПК на откосах;
 4 – плиты НПК по дну канала

Принимаем сметную стоимость бетонной монолитной облицовки согласно ТП 820–207, вып. 4.1 [216] при следующих исходных данных: $b = 5,0$ м; $h_{\text{стр}} = 4,0$ м; $\delta_0 = 0,10$ м; $m = 2,0$; $h_0 = 3,5$ м; $C_{0_{1\text{км}}} = 123680$ руб. на 1 км (в ценах на 1976 г.); $F_{\text{обл}} = 2,06 \cdot 10^5$ м².

Стоимость 1 м² облицовки найдем с учетом длины участка канала $L_k = 1000$ м и периметра при $\chi_k = b + 2h_0\sqrt{1+m^2} = 5,0 + 2 \cdot 3,5\sqrt{1+2,0^2} = 20,65$ м:

$$C_{0_{1\text{м}^2}} = \frac{C_{0_{1\text{км}}}}{L_k \cdot \chi_k} = \frac{123680}{1000 \cdot 20,65} = 5,99 \text{ руб./м}^2.$$

Аналогичные данные приведены в монографии [82], где стоимость монолитной бетонной облицовки принимаем равной:

$$C_{0_{1\text{м}^2}} = 5,0\text{--}6,0 \text{ руб./м}^2 \text{ (в ценах 1984 г.)}.$$

Индекс изменения сметной стоимости к 1984 г. на 01.01.2016 (на примере Ростовской области) составляет $K_{2016} = 1880$ руб. [171].

Тогда стоимость 1 м² облицовки на 01.01.2016 будет:

$$C_{0_{1\text{м}^2}} = C_{1984} \cdot K_{2016} = 6,0 \cdot 1880 = 11280 \text{ руб./м}^2.$$

Отсюда общая сметная стоимость составит:

$$C_0 = C_{0_{1\text{м}^2}} \cdot F_{\text{обл}} = 11280 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 232 \text{ млн руб. на } 10\,000 \text{ м}^2.$$

Ущерб, обусловленный возможными повреждениями бетонной монолитной облицовки, находим по следующей расчетной формуле [107]:

$$Y_0 = Y_1 + Y_2, \quad (7.2)$$

где Y_1 – ущерб от недополучения сельскохозяйственной продукции вследствие потерь воды через возможные повреждения противofильтрационной облицовки, руб.;

Y_2 – ущерб, обусловленный подтоплением прилегающих приканальных территорий или прилегающих сельскохозяйственных угодий, руб.

Ущерб от недополучения сельхозпродукции вследствие потерь оросительной воды через повреждения облицовки составит:

$$Y_1 = F_{\text{ор}} + Y_{\text{с/х}} \cdot C_{\text{с/х}}, \quad (7.3)$$

где $F_{\text{ор}}$ – площадь орошения участка за счет сэкономленной воды от потерь на фильтрацию через облицовку, га;

$Y_{\text{с/х}}$ – урожайность сельскохозяйственной продукции, т/га;

$C_{\text{с/х}}$ – стоимость единицы сельскохозяйственной продукции, руб./кг.

Площадь орошаемого участка найдем как отношение объема потерь воды на фильтрацию ($W_{\text{пот}}$) к оросительной норме ($M_{\text{ор}}$) [107]:

$$F_{\text{ор}} = W_{\text{пот}} / M_{\text{ор}}, \quad (7.4)$$

где $W_{\text{пот}} = k'_{\text{обл}} \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0} \cdot F_{\text{обл}} \cdot T_0$;

$k'_{\text{обл}}$ – осредненный коэффициент фильтрации облицовки, м/с;

h_0 – глубина воды в канале, м;

δ_0 – толщина бетонной облицовки, м;

$F_{\text{обл}}$ – площадь облицовки, м²;

T_0 – срок службы облицовки, лет.

Ущерб от недополучения сельхозпродукции вследствие подтопления прилегающей территории составит:

$$Y_2 = F_{\text{подт}} \cdot \alpha' \cdot Y_{\text{с/х}} \cdot C_{\text{с/х}}, \quad (7.5)$$

где $F_{\text{подт}}$ – площадь подтопления территории за счет фильтрации, га;

α' – коэффициент снижения урожайности сельхозкультур за счет подтопления ($\alpha' = 0,2 - 0,8$).

Для выполнения расчета задаемся следующими исходными данными:

$k'_{\text{обл}} = 1,02 \cdot 10^{-6}$ см/с $= 1,02 \cdot 10^{-8}$ м/с [67]; $b = 5,0$ м; $h_0 = 3,5$ м; $\delta_o = 0,10$ м;
 $L_k = 10000$ м; $F_{\text{обл}} = L_k \cdot \chi_k = 10000 \cdot 20,6 = 2,06 \cdot 10^5$ м²; $M_{\text{оп}} = 4000$ м³/га (овощи),
 $\tau_0 = 25$ лет; $Y_{\text{с/х}} = 65$ т/га; $T_{\text{оп}} = 7$ мес. $= 7 \cdot 30 \cdot 86400 = 1,81 \cdot 10^7$ с; $C_{\text{с/х}} = 25$ руб./кг.

Подставляя исходные данные в вышеприведенные формулы, получим:

$$W_{\text{пот}} = k'_{\text{обл}} \cdot \frac{h_0 + \delta_o}{\delta_o} \cdot F_{\text{обл}} \cdot T_{\text{оп}} = 136,9 \cdot 10^4 \text{ м}^3,$$

$$F_{\text{оп}} = \frac{W_{\text{пот}}}{M_{\text{оп}}} = \frac{136,9 \cdot 10^4}{4000} = 342,5 \text{ га},$$

$$Y_1 = F_{\text{оп}} \cdot Y_{\text{с/х}} \cdot C_{\text{с/х}} = 342,5 \cdot 65000 \cdot 25,0 = 5,56 \cdot 10^8 \text{ руб.},$$

$$Y_2 = F_{\text{подт}} \cdot \alpha' \cdot Y_{\text{с/х}} \cdot C_{\text{с/х}} = 3000 \cdot 0,2 \cdot 65 \cdot 10^3 \cdot 25 = 9,75 \cdot 10^8 \text{ руб.},$$

$$Y_0 = Y_1 + Y_2 = 5,56 \cdot 10^8 + 9,75 \cdot 10^8 = 1,53 \cdot 10^9 \text{ руб.},$$

где $F_{\text{подт}} = 3000$ га; $\alpha' = 0,2$; $Y_{\text{с/х}} = 65$ т/га; $C_{\text{с/х}} = 25$ руб./кг.

Приведенную стоимость противофильтрационной облицовки рассчитываем, исходя из затрат и риска, связанных с потерями воды на фильтрацию через повреждения бетонной монолитной облицовки по упрощенной формуле следующего вида [107]:

$$C_f = C_{0f} + (P_{0f} \cdot Y_{0f} \cdot \tau_{0f}). \quad (7.6)$$

Принимая вероятность повреждения бетонной монолитной облицовки из опыта эксплуатации [82] $P_0 = 0,01$ по зависимости (7.6), приближенно получим:

$$C_f = C_0 + (P_0 \cdot Y_0 \cdot \tau_0) = 2,32 \cdot 10^8 + (0,01 \cdot 1,53 \cdot 10^9 \cdot 25) = 6,14 \cdot 10^8 \text{ руб.},$$

где $C_0 = C_{0_{\text{м}^2}} \cdot F_{\text{обл}} = 11280 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 2,32 \cdot 10^8$ руб.

Стоимость сборной железобетонной облицовки по дну и откосам (варианты конструкций приняты согласно рекомендациям вып. 4.1, лист 23 [215]) при $b = 0,5$ м находим по номограмме, представленной в [216]:

$$\frac{C_{5,0}}{C_{1,0}} = 4,5, \quad C_{1,0} = 1,75, \quad C_{5,0} = \frac{C_{5,0}}{C_{1,0}} \cdot C_{1,0} = 4,5 \cdot 1,75 = 7,87 \text{ руб./м}^2.$$

Сравним стоимость 1 м² ж/б облицовки, по ТП 820-207 [215], со стоимостью железобетонной облицовки (по данным таблицы 1 источника [82]):

- по типовому проекту $C_b = 0,5 \text{ м} = 7,87 \text{ руб./м}^2$ (в ценах 1976 г.);

- по таблице 1 [82] $C_{1984} = 8-9 \text{ руб./м}^2$.

Принимаем стоимость железобетонной сборной облицовки из плит НПК 60-10–НПК 60-15:

$$C_{0,1984} = 8,0 \text{ руб./м}^2.$$

С учетом изменения индекса цен на 01.01.2016 (на примере Ростовской области [171]) $K_{2016} = 1880$ руб., приближенно получим стоимость 1 м² облицовки на настоящий период:

$$C_{0,1\text{м}^2} = C_{0,1984} \cdot K_{2016} = 8,0 \cdot 1880 = 1504 \text{ руб./м}^2.$$

Общая стоимость данного варианта облицовки составит:

$$C_0 = C_{0,1\text{м}^2} \cdot F_{\text{обл}} = 15040 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 3,1 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Далее рассчитаем ущерб (Y_0), который обусловлен возможными повреждениями облицовки:

$$Y_0 = Y_1 + Y_2.$$

Для расчета задаемся следующими исходными данными:
 $k'_{\text{обл}} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ см/с} = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$ по данным каналов МК Заволжской ОС и Р-11 Ингулецкой ОС [82] для сборной железобетонной облицовки: $h_0 = 3,0$ м;
 $\delta_0 = 0,06$ м; $L_k = 10000$ м; $F_{\text{обл}} = 2,06 \cdot 10^5 \text{ м}^2$; $T_{\text{ор}} = 7$ мес. = $1,81 \cdot 10^7$ с;
 $M_{\text{ор}} = 4000 \text{ м}^3/\text{га}$ (овощи); $Y_{\text{с/х}} = 65 \text{ т/га}$; $\tau_0 = 25$ лет, $F_{\text{подг}} = 1000$ га.

Тогда, подставляя исходные данные в ранее приведенные формулы для варианта 1, получим: $W_{\text{пот}} = 0,85 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, $F_{\text{оп}} = 2125 \text{ га}$, $Y_1 = 3,45 \cdot 10^9 \text{ руб.}$, $Y_{\text{подг}} = 3,25 \cdot 10^8 \text{ руб.}$, $Y_0 = 4,08 \cdot 10^9 \text{ руб.}$, $C_f = 1,33 \cdot 10^9 \text{ руб.}$, где $C_0 = 3,1 \cdot 10^8 \text{ руб.}$

По результатам расчета и с целью их упрощения была разработана программа для ЭВМ, которая предназначена для расчета водопроницаемости, надежности и долговечности бетонных облицовок каналов. Применение программы позволяет, задаваясь исходными данными, выполнять расчеты по определению осредненных коэффициентов фильтрации бетонных облицовок при ламинарном и турбулентном режимах с учетом наличия трещин с гладкими и шероховатыми стенками; определять допускаемый коэффициент фильтрации бетонной облицовки; производить сравнение расчетного осредненного коэффициента фильтрации с допускаемым; рассчитывать прогнозный срок службы бетонной облицовки оросительного канала [25].

7.2.2 Расчет приведенной стоимости облицовок с геомембранами и защитным покрытием из грунта

Расчетные схемы канала с противофильтрационной облицовкой из геомембраны отечественного и (или) зарубежного производства даны на рисунке 7.2.

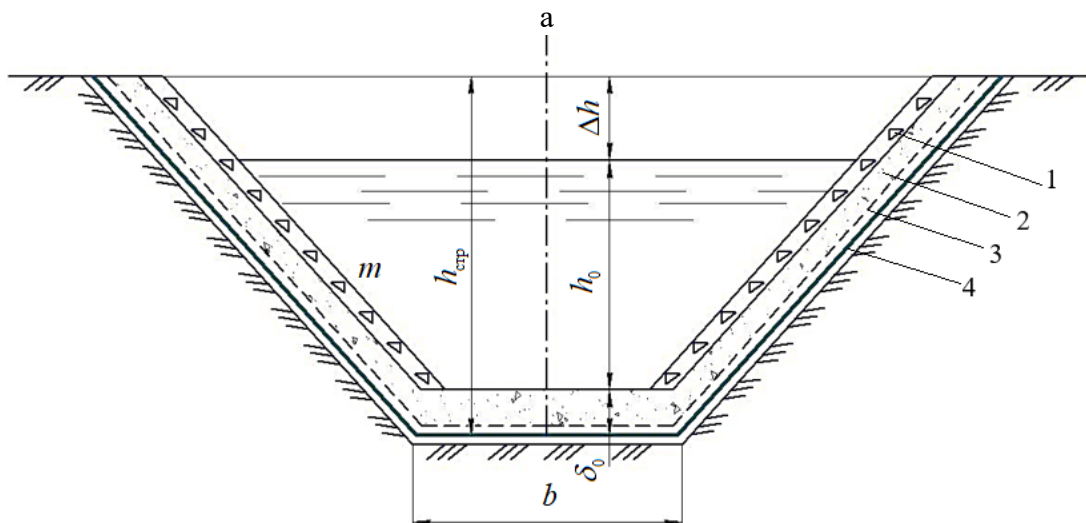


Рисунок 7.2 – Схемы облицовок каналов с применением полимерных геомембран, лист 1

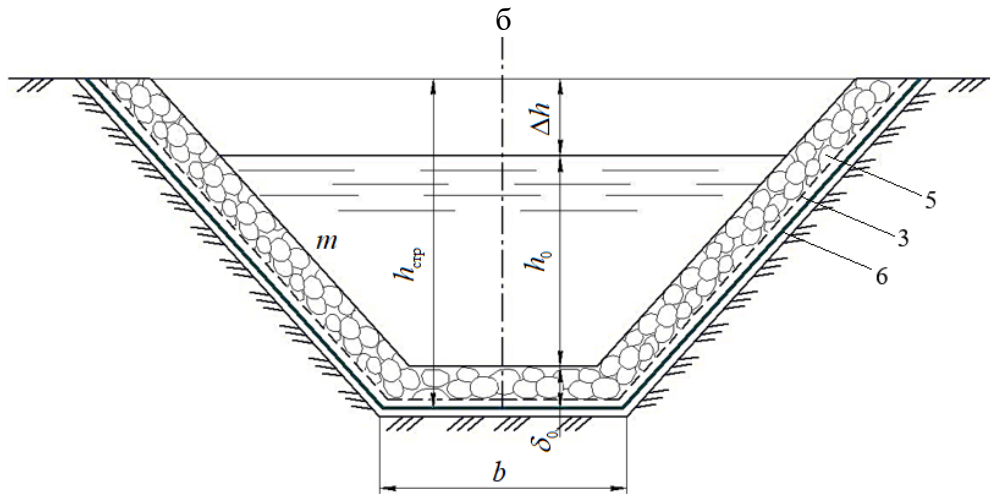


Рисунок 7.2 – Схемы облицовок каналов с применением полимерных геомембран, лист 2:

- а – с защитным покрытием из грунта и геомембраной; б – с противодиффузионным элементом из геомембраны и защитным покрытием из каменной наброски; 1 – щебеночная подсыпка; 2 – пригрузочный грунтовый слой; 3 – защитная геотекстильная прокладка; 4 – геомембрана отечественного производства; 5 – каменная наброска; 6 – геомембрана зарубежного производства

Задаваясь исходными данными и учитывая стоимость устройства полимерных экранов (таблица 1 [82]), стоимость устройства облицовки с геомембраной (толщиной $\delta_{гм} = 1,0$ мм) и защитным покрытием из грунта, с учетом первого слоя геотекстиля составит:

$$C_{0_{1984}} = 1-2 \text{ руб./м}^2, \quad C_{0_{1984}} = 1,87 \text{ руб./м}^2,$$

$$C_{0_{2016}} = C_{0_{1984}} \cdot K_{2016} = 1,87 \cdot 1880 = 3510 \text{ руб./м}^2,$$

$$C_{0_{1м^2}} = C_{0_{2016}} + C_{г/т} = 3510 + 1300 = 4810 \text{ руб./м}^2.$$

Тогда общая стоимость облицовки с геомембраной и защитным покрытием из грунта приблизительно составит:

$$C_0 = C_{0_{1м^2}} \cdot F_{обл} = 481 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 9,91 \cdot 10^7 \text{ руб.}$$

Коэффициент фильтрации облицовки с геомембраной принимаем нижеследующим [133]:

$$k'_{обл} = 10^{-10} - 10^{-12} \text{ м/с (примем } 0,215 \cdot 10^{-11} \text{ м/с)}.$$

Найдем ущербы и приведенную стоимость облицовки:

$$Y_1 = F_{оп} \cdot Y_{с/х} \cdot C_{с/х},$$

$$F_{\text{оп}} = \frac{W_{\text{пот}}}{M_{\text{оп}}}.$$

Исходные данные: $h_0 = 3,0$ м; $\delta_0 = 0,5$ м; $F_{\text{обл}} = 150000 \text{ м}^2$; $T_{\text{оп}} = 1,81 \cdot 10^7$ с; $W_{\text{пот}} = 40,9 \text{ м}^3$; $F_{\text{оп}} = 0,0102$ га; $M_{\text{оп}} = 4000 \text{ м}^3/\text{га}$ – овощи; расчет производим по ранее приведенным формулам. Результаты расчета: $Y_0 = 4,1 \cdot 10^8$ руб.; $Y_1 = 16667 \text{ руб.} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ руб.}$; $Y_2 = 8,18 \cdot 10^8 \text{ руб.}$, где $F_{\text{подт}} = 500$.

При $\tau_0 = 50$ лет, $P_0 = 0,001$, получим:

$$C_{f3} = C_0 + (P_0 \cdot Y_0 \cdot \tau_0) = 9,9 \cdot 10^7 + (0,001 \cdot 8,18 \cdot 10^8 \cdot 50) = 1,40 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Далее рассмотрим вариант облицовки с геомембраной зарубежного производства и защитным покрытием из грунта.

Стоимость геомембраны зарубежного производства (толщиной $\delta = 1-2$ мм) принимаем равной 330 руб./м^2 . Стоимость работ по укладке противодиффузионного элемента из геомембраны и созданию защитного грунтового слоя толщиной $0,5$ м – $C_{01984} = 1-2 \text{ руб./м}^2$ (примем 2 руб./м^2). Таким образом, общая стоимость облицовки составит:

$$C_{02016} = C_{01984} \cdot K_{2016} = 2,0 \cdot 188,0 = 376,0 \text{ руб./м}^2.$$

Для примера также рассмотрим вариант облицовки с геомембраной и защитным покрытием из каменной наброски (см. рисунок 7.2б) с устройством крепления толщиной $0,3$ м:

- каменная наброска фракции $20-100$ мм – 450 руб./м^3 ;
- стоимость укладки каменной наброски – 50 руб./м^3 ;
- всего $450 + 50 = 500 \text{ руб./м}^3$.

Стоимость 1 м^2 облицовки с геомембраной и каменной наброской:

- геомембрана зарубежного производства – 330 руб./м^2 ,
- стоимость работ по укладке геомембраны и устройству защитного крепления – 376 руб./м^2 ,

- стоимость каменной наброски с укладкой площадью 1 м^2 – 150 руб./м^2 ,

$$C_{1\text{м}^2} = 0,3 \cdot 500 = 150 \text{ руб./м}^2.$$

Всего – 856 руб./м².

$$C_0 = C_{0_{1м^2}} \cdot F_{обл} = 856 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 1,76 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Осредненный коэффициент фильтрации облицовки из геомембраны (зарубежного производства) [107] определяем как:

$$k'_{обл} = 10^{-8} - 10^{-10} \text{ см/с} = 10^{-10} - 10^{-12} \text{ м/с} \quad (k'_{обл} = 10^{-12} \text{ м/с}).$$

Потери на фильтрацию находим по выражению:

$$W_{пот} = k'_{обл} \cdot \frac{h_0 + \delta_o}{\delta_o} \cdot F_{обл} \cdot T_{оп} = 10^{-12} \frac{(3,0 + 0,5)}{0,5} 2,06 \cdot 10^5 \cdot 1,81 \cdot 10^7 = 26,1 \text{ м}^3.$$

Дополнительная площадь участка орошения за счет сэкономленной воды определяем как:

$$F_{оп} = \frac{W_{пот}}{M_{оп}} = \frac{26,1}{4000} = 0,0065 \text{ га};$$

$$M_{оп} = 4000 \text{ м}^3/\text{га} - \text{для овощей.}$$

Ущерб, обусловленный потерями на фильтрацию, находим по выражению:

$$Y_0 = Y_1 + Y_2,$$

$$Y_1 = F_{оп} \cdot Y_{c/x} \cdot C_{c/x} = 0,0065 \cdot 65,4 \cdot 1000 \cdot 25 = 106275 \text{ руб.},$$

$$Y_2 = F_{подг} \cdot \alpha' \cdot Y_{c/x} \cdot C_{c/x} = 500 \cdot 0,5 \cdot 65,4 \cdot 1000 \cdot 25 = 4,1 \cdot 10^8 \text{ руб.},$$

где $\tau_0 = 75$ лет, $P_0 = 0,001$.

$$C_{f4} = \sum C_0 + (P_0 \cdot Y_0 \cdot \tau_0) = 1,76 \cdot 10^8 + (0,001 \cdot 4,1 \cdot 10^8 \cdot 75) = 2,07 \cdot 10^8 \text{ руб.},$$

где $Y_0 = Y_1 + Y_2 = 1062 + 4,1 \cdot 10^8 = 4,1 \cdot 10^8$.

Для определения эффективности противофильтрационных облицовок оросительных каналов с геомембранами и защитным покрытием из грунта может быть использована разработанная программа для ЭВМ [179]. Данная программа позволяет производить расчеты по определению осредненных коэффициентов фильтрации облицовок из геомембран, сравнение расчетного осредненного коэффициента фильтрации с допусаемым, расчет вероятности безотказной работы противофильтрационного полимерного элемента, определение прогнозного срока службы конструкции облицовки канала с учетом наличия защитного покрытия из грунта.

7.2.3 Расчет приведенной стоимости облицовок с геомембранами и защитным покрытием из бетона

Схема канала с противофильтрационной облицовкой из геомембраны отечественного и (или) зарубежного производства и защитным покрытием из бетона приведена на рисунке 7.3.

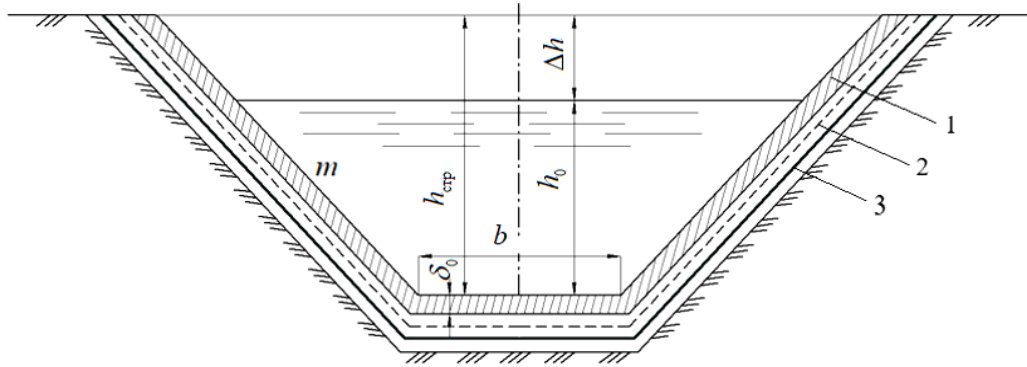


Рисунок 7.3 – Схема облицовки канала с геомембраной и защитным покрытием из бетона:

1 – бетонная облицовка; 2 – геотекстиль; 3 – геомембрана

Сметная стоимость облицовки с отечественной геомембраной (привязка к ТП 820-207, вып. 4.1) [216] и защитным покрытием из бетона, приведенная к ценам 2016 г. [170], включает:

- стоимость 1 м² бетонной монолитной облицовки (см. вариант 1) – 1128,0 руб./м²;

- геомембрана (отечественного производства) – 100 руб./м²;

- геотекстиль 1 слой – 30 руб./м²;

- работы по укладке – 30 руб./м²;

Всего $C_{0,1\text{м}^2} = 12880$ руб./м².

Общая сметная стоимость облицовки при длине канала $L_k = 10000$ м составляет [107]:

$$C_0 = C_{0,1\text{м}^2} \cdot F_{\text{обл}} = 1288 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 2,65 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Ущерб от возможных повреждений облицовки найдем по формулам, приведенным для варианта 1.

Исходные данные: $b=5,0$ м; $h_0=3,0$ м; $\delta_0=0,10$ м; $L_k=10000$ м;
 $F_{\text{обл}}=2,06 \cdot 10^5$ м²; $k'_{\text{обл}}=0,215 \cdot 10^{-10}$ м/с (см. пример 2); $T_{\text{оп}}=7$ мес= $1,81 \cdot 10^7$ с;
 $M_{\text{оп}}=4000$ м³/га (овощи); $C_{\text{сх}}=25$ руб./кг; $Y_{\text{сх}}=65$ т/га; $\tau_0=50$ лет; $P_0=0,001$;
 $F_{\text{подт}}=300-500$ га.

Результаты расчета общего ущерба: $W_{\text{пот}}=2,88 \cdot 10^3$ м³; $F_{\text{оп}}=0,72$ га;
 $Y_1=1,17 \cdot 10^6$ руб.; $Y_2=1,62 \cdot 10^8$ руб.; $Y_0=1,63 \cdot 10^8$; $C_f=2,66 \cdot 10^8$ руб.

Сметная стоимость варианта облицовки с геомембраной зарубежного производства (привязка к ТП 820-207, вып. 4.1 [216]), приведенная к ценам 2016 г. [171], включает:

- стоимость 1 м² бетонной монолитной облицовки (см. вариант 1) – 1128,0 руб./м²,
 - геомембрана (зарубежного производства) – 330,0 руб./м²;
 - геотекстиль 1 слой – 30 руб./м²;
 - работы по укладке и сварке – 60 руб./м².
- Всего $C_{0,1\text{м}^2}=15480$ руб./м².

Определяем общую сметную стоимость варианта облицовки:

$$C_0 = C_{0,1\text{м}^2} \cdot F_{\text{обл}} = 15480 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 3,19 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Исходные данные: $b=5,0$ м; $h_0=3,0$ м; $\delta_0=0,10$ м; $F_{\text{обл}}=2,06 \cdot 10^5$ м²;
 $k'_{\text{обл}}=0,1 \cdot 10^{-10}$ м/с; $T_{\text{оп}}=1,81 \cdot 10^7$ с; $\tau_0=75$ лет; $P_0=0,001$; остальные данные аналогичны предыдущему варианту с учетом данных [119, 120].

Результаты расчета общего ущерба: $W_{\text{пот}}=1,34 \cdot 10^3$ м³; $F_{\text{оп}}=0,335$ га;
 $Y_1=5,44 \cdot 10^5$ руб.; $Y_2=9,75 \cdot 10^7$ руб.; $Y_0=9,80 \cdot 10^7$ руб.; $C_f=3,26 \cdot 10^8$ руб.

Методика оценки эффективности (в том числе водопроницаемости, надежности и долговечности) облицовок каналов, выполненных с использованием полимерных геомембран и защитных покрытий из бетона, автоматизирована и зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ [180].

7.2.4 Расчет приведенной стоимости облицовок с геосинтетическими бентонитовыми материалами и защитным покрытием из каменной наброски

Схема сечения оросительного канала с вариантом противофильтрационной облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов отечественного и (или) зарубежного производства приведена на рисунке 7.4.

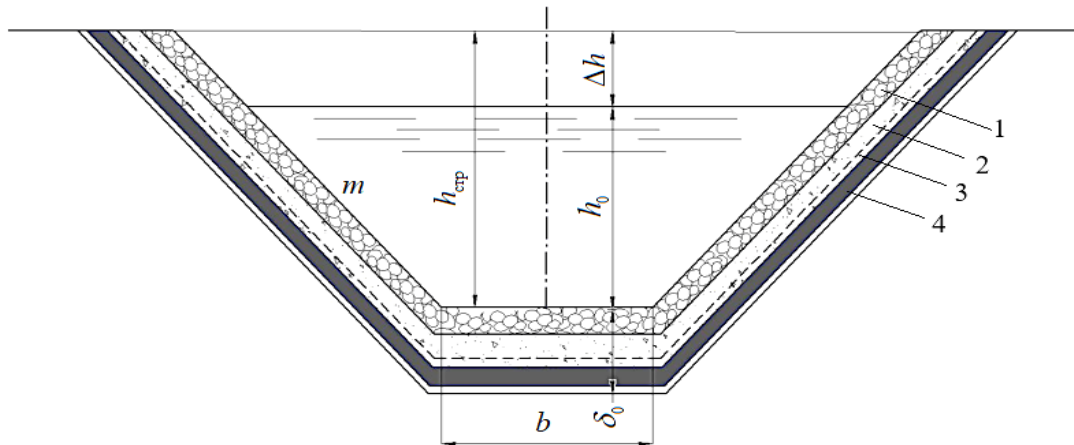


Рисунок 7.4 – Схема сечения канала с облицовкой из бентонитовых материалов и каменной наброской:

1 – крепление откосов и дна каменной наброской; 2 – слой грунта; 3 – защитная прокладка из геотекстиля; 4 – геосинтетический бентонитовый материал

Сметная стоимость облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов (бентоматов), приведенная к ценам 2016 г.[171]:

- стоимость 1 м² бентоматов отечественного производства – 220 руб./м²;
- работы по укладке бентоматов – 35 руб./м²;
- устройство защитного слоя из грунта толщиной 0,3 м – 330,0 руб./м²;
- устройство крепления из каменной наброски толщиной 0,3 м – 35 руб./м².

Всего $C_{0_{1\text{м}^2}} = 440$ руб./м².

Общую сметную стоимость облицовки из бентоматов определяем как:

$$C_0 = C_{0_{1\text{м}^2}} \cdot F_{\text{обл}} = 440 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 0,906 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Ущерб от потерь воды при возможных повреждениях облицовки из бентоматов с учетом их самозалечивания в течение 37,5 ч при количестве $N = 10$ шт. находим по выражению:

$$V_{\text{общ}} = V_{\text{пот}} = 1,223 \text{ м}^3.$$

Расчет общего ущерба выполняем при следующих исходных данных:
 $b = 5,0$ м; $h_0 = 3,0$ м; $\delta_0 = 5$ мм = $0,005$ м; $F_{\text{обл}} = 2,06 \cdot 10^5$ м²; $V_{\text{пот}} = 1,223$ м³;
 $T_{\text{оп}} = 1,81 \cdot 10^7$ с; $\tau_0 = 75$ лет, $P_0 = 0,001$).

Результаты расчета ущерба: $F_{\text{оп}} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ га; $Y_1 = 504$ руб.; $Y_2 = 100$ руб.;
 $Y_0 = 604$ руб.; $C_f = 0,91 \cdot 10^8$ руб.

Сметная стоимость облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов зарубежного производства, приведенная к ценам 2016 г. [171]:

- стоимость 1 м² бентоматов зарубежного производства – 510 руб./м²,
 - работы по укладке бентоматов – 35 руб./м²,
 - устройство защитного слоя из грунта толщиной 0,3 м – 50 руб./м²,
 - устройство крепления из каменной наброски толщиной 0,3 м – 135 руб./м².
- Всего $C_{0,1\text{м}^2} = 730$ руб./м².

Общая сметная стоимость облицовки из бентонитовых материалов определяется как:

$$C_0 = C_{0,1\text{м}^2} \cdot F_{\text{обл}} = 730 \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 15038 \cdot 10^5 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Ущерб от потерь воды при возможных повреждениях облицовки из бентоматов не учитываем ввиду их малости и самозалечивания (см. расчет Y_0 по варианту 7).

Приведенная стоимость облицовки из бентоматов составит:

$$C_f = C_0 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Расчеты эффективности противофильтрационных облицовок каналов с применением геосинтетических бентонитовых материалов могут осуществляться с помощью разработанной с участием автора программы для ЭВМ [181]. Данная программа позволяет производить расчеты водопроницаемости противофильтрационных покрытий, выполненных из бентонитовых материалов при наличии в них повреждений, а также при условии их регенерации; определять вероятность безотказной работы противофильтрационного покрытия; производить расчеты прогнозного срока службы облицовки.

7.3 Анализ результатов расчета рассмотренных типов облицовок и выбор оптимального варианта

При выборе оптимального варианта были рассмотрены расчеты приведенной стоимости различных типов противофильтрационных покрытий каналов.

Среди рассмотренных типов облицовок были выбраны традиционные покрытия, которые уже давно применяются при проектировании и строительстве каналов оросительных систем. К их числу прежде всего относятся бетонные и железобетонные облицовки, включенные в ТП 820–207 «Каналы оросительные с расходом воды до $100 \text{ м}^3/\text{с}$ с бетонной и железобетонной облицовкой русла» [216]. К ним также можно отнести бетонопленочные монолитные, сборные и сборно-монолитные облицовки, но их дополнением – вместо полиэтиленовой пленки низкой плотности толщиной $0,2\text{--}0,4 \text{ мм}$ (по ГОСТ 10354-82 «Пленка полиэтиленовая. Технические условия») применяется геомембрана. Такая замена объясняется тем, что геомембрана (толщиной $1,0\text{--}2,0 \text{ мм}$) в отличие от пленки (толщиной $0,2\text{--}0,4 \text{ мм}$) имеет меньшую повреждаемость при укладке на грунтовое основание, укладке под бетон (или плиты) в $5\text{--}7$ раз. Кроме того, замена пленки на геомембрану позволяет повысить долговечность противофильтрационного элемента в $2\text{--}2,5$ раза, которая составляет не менее 50-ти лет для геомембраны, против 20–25 лет для пленки [107].

При этом следует отметить, что в настоящей методике рассмотрены варианты облицовок не только с геомембраной отечественного, но и зарубежного производства. Наряду с этим, в методике рассмотрены новые типы облицовок – с геомембраной отечественного и (или) зарубежного производства и защитным покрытием из грунта или бетона, а также облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов отечественного и зарубежного производства.

Сводные результаты расчетов приведенной стоимости вариантов облицовок даны в таблице 7.4 (при $b = 5,0 \text{ м}$; $h_0 = 3,5 \text{ м}$; $\delta_0 = 0,06\text{--}0,5 \text{ м}$; $L_k = 2,06 \cdot 10^5 \text{ м}^2$; $M_{\text{оп}} = 4000 \text{ м}^3/\text{га}$ (овощи); $U_{\text{сх}} = 65 \text{ т/га}$; $\tau_0 = 25\text{--}75 \text{ лет}$), а на рисунке 7.5 для наглядности приведена гистограмма приведенной стоимости для этих вариантов [107].

Таблица 7.4 – Сводные результаты расчета приведенной стоимости различных вариантов облицовок [107]

Вариант	Тип облицовки	Стоимость облицовки (по укрупненным показателям), $C_0, \text{м}^2, \text{руб./м}^2$	Общая сметная стоимость облицовки, $C_0, \text{руб.}$	Осредненный коэффициент фильтрации облицовки, $k'_{\text{обл}}, \text{м/с}$	Объем потерь воды на фильтрацию, $W_{\text{пот}}, \text{м}^3$	Площадь орошения за счет потерь, $F_{\text{ор}}, \text{га}$	Ущерб от недополива с.-х. продукции при потерях на фильтрацию, $У_1, \text{руб.}$	Ущерб от недополива с.-х. продукции от подтопления, $У_2, \text{руб.}$	Общий ущерб, $У_0, \text{руб.}$	Вероятность повреждения облицовки, P_0	Приведенная стоимость варианта облицовки, $C_f, \text{руб.}$
1	Бетонная монолитная (по ТП 820-207)	1128,0	$2,32 \cdot 10^8$	$1,32 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^6$	342,5	$5,56 \cdot 10^8$	$9,75 \cdot 10^8$	$1,53 \cdot 10^9$	0,01	$6,14 \cdot 10^8$
2	Бетонная сборная или сборно-монолитная (по ТП 820-207)	1504,0	$3,1 \cdot 10^8$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$1,62 \cdot 10^7$	2125,0	$3,45 \cdot 10^9$	$3,25 \cdot 10^8$	$4,1 \cdot 10^9$	0,01	$13,3 \cdot 10^8$
3	С геомембраной отечеств. пр-ва и покрытием из грунта	481,0	$9,9 \cdot 10^7$	$0,21 \cdot 10^{-11}$	40,9	0,0102	$1,7 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^8$	$8,2 \cdot 10^8$	0,001	$1,40 \cdot 10^8$
4	С геомембраной зарубежн. пр-ва и покрытием из грунта	856,0	$1,76 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{-12}$	26,1	0,0065	1062,7	$4,1 \cdot 10^8$	$4,1 \cdot 10^8$	0,001	$2,07 \cdot 10^8$
5	С геомембраной отечеств. пр-ва и покрытием из бетона	1288,0	$2,65 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{-10}$	2880,0	0,72	$1,17 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^8$	$1,63 \cdot 10^8$	0,001	$2,66 \cdot 10^8$
6	С геомембраной зарубежн. пр-ва и покрытием из бетона	1548,0	$3,19 \cdot 10^8$	$0,1 \cdot 10^{-10}$	1340,0	0,335	$5,44 \cdot 10^5$	$9,75 \cdot 10^7$	$9,8 \cdot 10^7$	0,001	$3,26 \cdot 10^8$
7	Облицовка из бен-тонит. матов отечеств. пр-ва	440,0	$0,91 \cdot 10^8$	–	1,22	0,0003	504,0	100,0	604,0	0,001	$0,91 \cdot 10^8$
8	Облицовка из бен-тонит. матов зарубежн. пр-ва	730,0	$1,5 \cdot 10^8$	–	1,22	0,0003	504,0	100,0	604,0	0,001	$1,50 \cdot 10^8$

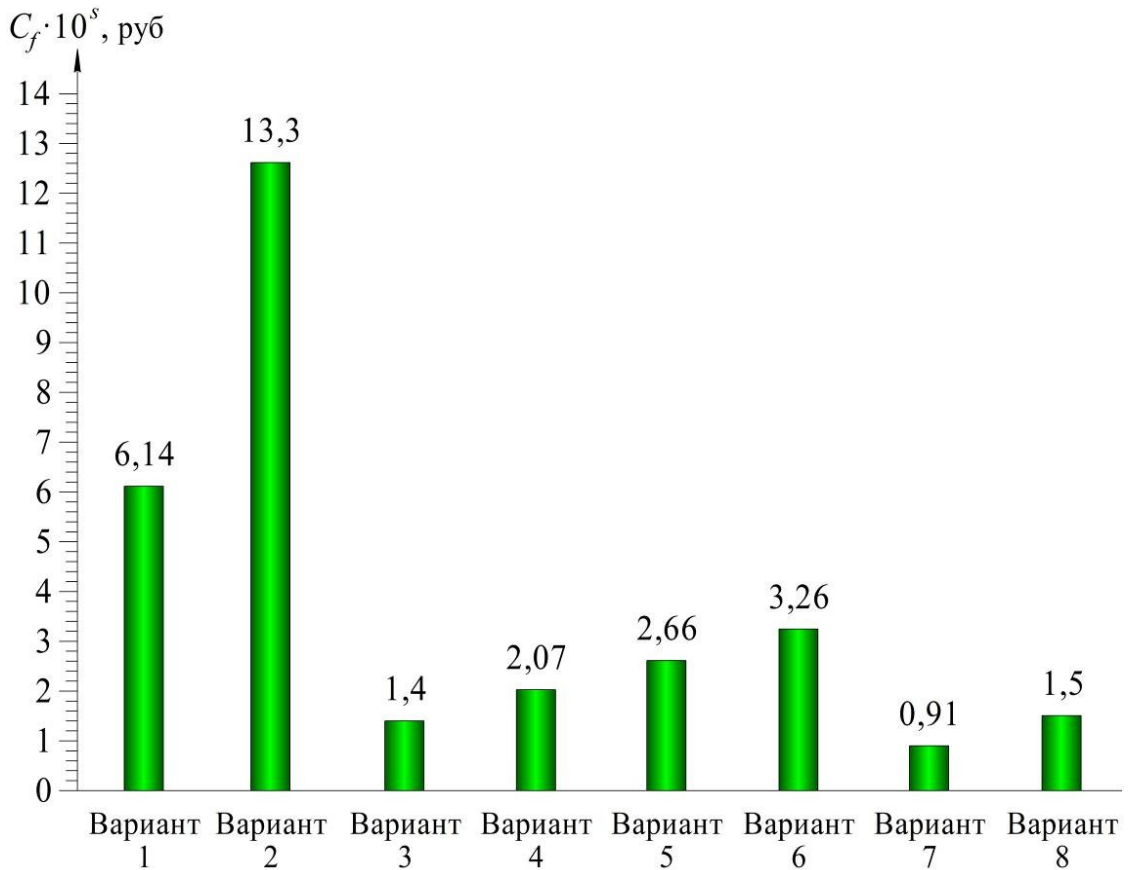


Рисунок 7.5 – Гистограмма приведенной стоимости вариантов противофильтрационных покрытий каналов [107]:

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

Для каждого варианта облицовки определялась первоначальная сметная стоимость, приведенная к ценам 2016 г. [171] Отличительной особенностью данной методики является определение ущерба, обусловленного возможными повреждениями в течение всего периода эксплуатации. В качестве ущерба учитывались две составляющие: ущерб от недополучения сельскохозяйственной продукции при орошении земель и ущерб вследствие подтопления и засоления прилегающих территорий.

При расчете обоих ущербов учитывалась урожайность сельхозкультур, стоимость единицы продукции, площади орошения и подтопления. Кроме ущербов, учитывалась также вероятностная составляющая – вероятность повреждений или

разрушений отдельных элементов облицовки (ПФЭ, защитных покрытий из геотекстильных материалов и пригрузочных слоев из бетона, габионов или грунта и др.).

Таким образом, на основе вышеизложенной методики были проведены необходимые расчеты и получены результаты целевой функции в виде приведенной стоимости каждого варианта облицовки, которые позволяют сравнивать все варианты и определять оптимальный по минимуму приведенной стоимости [107].

Анализ сводных результатов расчета приведенной стоимости вариантов на рисунке 7.5 показывает, что наиболее высокая приведенная стоимость получена для двух вариантов с традиционными облицовками: бетонной монолитной (вариант 1) и бетонной и железобетонной сборной и сборно-монолитной (вариант 2). Особенно высокая приведенная стоимость получена для варианта 2 – сборной и сборно-монолитной облицовкой, которая составляет 1330 млн руб. Это объясняется значительными фильтрационными потерями и, соответственно, большими ущербами от недополучения продукции при орошении и подтоплении сельхоз угодий.

Учитывая большой объем расчетов эффективности, надежности и выбора оптимального варианта облицовки, целесообразно использовать разработанные с участием автора программы для ЭВМ. На рисунке 7.6 представлена структура компьютерных расчетов, которая базируется на вышеизложенных методиках и разработанных программах для ЭВМ [178–181].

Сравнительно невысокая приведенная стоимость получена для трех вариантов: грунтопленочной облицовки с геомембраной отечественного и зарубежного производства (варианты 3 и 4) и облицовки с бентоматом зарубежного производства (вариант 8), где приведенная стоимость составила от 140 до 207 млн руб. Более высокая приведенная стоимость получена для двух вариантов 5 и 6 с бетонопленочной облицовкой, включающей геомембрану отечественного и зарубежного производства с приведенной стоимостью, соответственно, от 266 до 326 млн руб. Самая наименьшая приведенная стоимость была получена по варианту 7 (облицовка из бентонитовых материалов отечественного производства) – 91 млн руб., следовательно, этот вариант можно считать оптимальным для заданных условий.

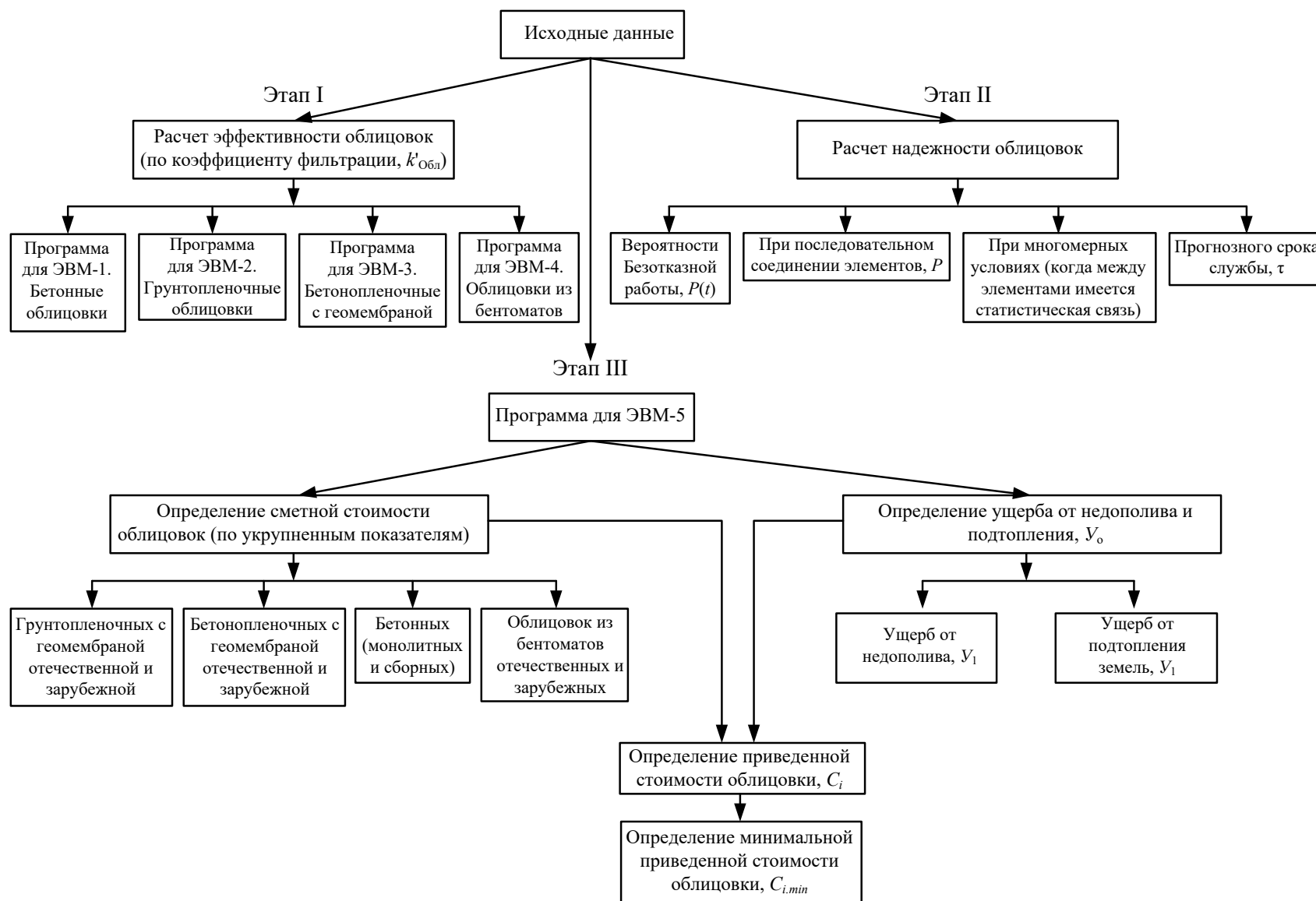


Рисунок 7.6 – Структурная схема расчетов эффективности, надежности и выбора оптимального варианта противофильтрационного покрытия оросительного канала [107]

Структурная схема включает три этапа: этап I – расчет эффективности облицовок по осредненным коэффициентам фильтрации для каждого типа покрытий: бетонных традиционных, по ТП 820-207 [214], монолитных с применением бетоноукладчиков, сборных с использованием железобетонных предварительно напряженных плит НПК, с использованием геомембран и защитных покрытий из грунта или каменной наброски; с использованием полимерных геомембран и защитных покрытий из монолитного бетона (или сборных плит); облицовок из бентонитовых материалов, включающих защитное покрытие из каменной наброски [107].

На этапе II приводится ряд следующих расчетов: надежности (в том числе вероятности безотказной работы $P(t)$ за период времени t); безотказности при последовательном соединении элементов облицовки (например, геомембраны, геотекстиля, защитного покрытия из камня или бетона); безотказности облицовки при последовательном соединении элементов (при частичном или полном их взаимодействии).

На этапе III проводится выбор оптимального варианта противофильтрационной облицовки, в частности, определение сметной стоимости по укрупненным показателям, а при использовании данных прежних лет осуществляется приведение стоимости к современным ценам с учетом коэффициентов приведения по справочным данным о ценообразовании [171]. Эти данные приводятся для бетонных или монолитных облицовок; с геомембраной и защитным покрытием из грунта, которые могут существенно отличаться; облицовок с геомембраной отечественного и зарубежного производства и защитным покрытием из бетона; геосинтетических бентонитовых покрытий отечественного и зарубежного производства с учетом защитных покрытий [107].

Помимо этого, на данном этапе определяются ущербы от недополучения урожайности сельхозкультур вследствие потерь воды на фильтрацию через возможные повреждения и дефекты противофильтрационного экрана, а также при подтоплении сельскохозяйственных земель с возможным выходом грунтовых вод на поверхность или при их близком залегании от поверхности (на глубине до 1,0–1,5 м). Затем определяется приведенная стоимость каждого варианта, как

сумма стоимости облицовки (или первоначальной стоимости) с учетом коэффициента приведения и суммы ущерба [107].

При расчетах на третьем этапе используется разработанная программа выбора оптимального варианта противofильтрационной облицовки [178].

Алгоритмы разработанных программ для ЭВМ приведены в приложении Е настоящей диссертации.

7.4 Новые научные результаты по оптимизации разработанных решений

При составлении новых научных результатов следует учитывать создание противofильтрационных конструкций каналов из материалов с заранее заданными свойствами. Важным направлением исследований является разработка многослойных конструкций экранов оросительных каналов, выполняемых из двух–четырех слоев, а применение к ним функциональных требований позволит создать более эффективные и надежные противofильтрационные покрытия и получить оптимальные варианты по приведенной стоимости, которые будут отличаться повышенными противofильтрационными, прочностными, «противопротечными» и деформативными свойствами.

Особую (перспективную) роль играют противofильтрационные покрытия каналов, выполняемые из геосинтетических бентонитовых материалов, включающие два слоя геотекстиля высокой плотности и один слой натриевого (или кальциевого) бентонита в виде порошка или гранул, которые при увлажнении увеличиваются в объеме в 5–10 раз. Одновременно с этим происходит регенерация, т. е. образование тонких, но в то же время высокоэффективных водонепроницаемых слоев с последующим возможным самозалечиванием повреждений.

К новым научным результатам относятся конструкции противofильтрационных покрытий каналов, состоящие из отдельных не скрепленных слоев геотекстилей или геомембран, между которыми укладываются слои бентонитовой глины или суглинка толщиной (30–50 см). Такие разработанные конструкции экранов использованы при реконструкции участков ДМК и Пролетарского канала и по результатам про-

веденных натуральных и лабораторных исследований эффективно функционируют и в настоящее время. При этом поверх таких экранов устраиваются защитно-пригрузочные покрытия из каменной наброски диаметром фракции от 5,0 до 20,0 см.

Создание многослойных конструктивно-технических решений на каналах, включающих несколько слоев геосинтетических материалов, функционально связанных между собой, обеспечивают достаточную прочность конструкции экрана для геомембран высокого и низкого давления, значительное относительное удлинение при разрыве и стойкость к растрескиванию, плотность защитных покрытий из геотекстилей в пределах 350–500 г/м².

Использование на практике разработанной многослойной конструкции экрана из материалов с заданными свойствами, включающего ряд расчетно-обоснованных однослойных материалов и защитно-пригрузочных слоев с устройством дублирующих противofильтрационных элементов, позволяет создавать практически водонепроницаемые конструкции облицовок, которые могут применяться на участках каналов, выполняемых в сложных и особо сложных инженерных условиях (например, на пучинистых или просадочных грунтах, при наличии карстово-суффозионных и других явлений). При этом дублирующие противofильтрационные элементы из бентонита будут функционировать только при эксплуатации сооружения (заполнении канала водой).

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

Новые модели водопроницаемости разработанных конструкций противofильтрационных покрытий каналов включают методы решения теоретических задач фильтрации через системы дефектов в экране из геосинтетических материалов. Методика исследований основывается на методах конформных отображений и годографа скорости. Расчетная модель включает систему щелей малых размеров, расположенных через расстояние (l) и подстилающее основание неограни-

ченной мощности, где наблюдается движение фильтрационного потока из каждой щели в грунтовое основание на бесконечность. Особенностью водопроницаемости экрана является фильтрация через каждую щель в плоской постановке с формированием самостоятельного фильтрационного потока по граничной линии, отделяющей каждую область фильтрации друг от друга.

К новым научным результатам можно отнести численную модель фильтрации через систему повреждений в противофильтрационном покрытии из геосинтетического материала (геомембраны) при взаимном влиянии близкорасположенных повреждений различной ширины. По результатам получены значения фильтрационного расхода через систему дефектов (повреждений).

В качестве новых научных результатов рассмотрим методику расчета эффективности противофильтрационных покрытий каналов из геосинтетических бентонитовых материалов при их самозалечивании:

- при отношении коэффициентов фильтрации грунта основания и защитного слоя ($k_2/k_1 > 10$) для первоначального контура залечивания экрана:

$$q_0 = \frac{2\pi^2 k_1 r_0 (h_0 + \delta_0)}{\ln(8\delta_0/\pi r_0)}; \quad (7.7)$$

- для последующих контуров залечивания:

$$q_i = \frac{2\pi^2 k_1 r_i (h_0 + \delta_0)}{\ln(8\delta_0/\pi r_i)}. \quad (7.8)$$

Срок службы противофильтрационной облицовки канала из геосинтетиков на основе бентонита может быть определен по выражению:

$$\tau\{P\} = \frac{(-\ln P_{\text{гк}})}{\bar{v}_{\Pi}} \exp \left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau}/K_{\sigma})]^2}{2m_{\Pi\tau_0}^2} \right], \quad (7.9)$$

расшифровка обозначений приведена в п. 4.4 диссертации.

Задачи оптимизации считаются сформулированными, если заданы критерии оптимальности, варьирующие параметры (например, расход и напор воды в канале); математическая модель процесса; ограничения, связанные с конструктивными условиями, возможностями приборов и устройств и т. д. [100].

Оптимизация представляет собой определение наилучшего варианта. Методы оптимизации сводятся к поиску и расчету оптимальной конструкции или технологии, времени для производства технологических процессов и др. Примером метода оптимизации служит итерационный метод Ньютона [100]. В методах оптимизации различают задачи безусловной и условной оптимизации, задачи математического и выпуклого программирования, численные методы оптимизации и др. [100].

В методах принятия решений используются методы при отсутствии полной информации, когда принимается решение путем обработки экспертных или совокупности аналитических точечных оценок. При этом совокупность точечных оценок может быть найдена методами оптимизации [100].

При технико-экономических расчетах часто проводится учет фактора времени (τ), когда водохозяйственные объекты характеризуются большими капитальными вложениями и сравнительно длительными сроками строительства.

Приведенные капиталовложения подсчитывают как единовременные по [231]:

$$\bar{K} = \sum_{t=1}^T K_t (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t}; \quad (7.10)$$

- ежегодные издержки:

$$\bar{I} = \sum_{\varepsilon=t_3}^m \Delta U_t (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t}; \quad (7.11)$$

- приведенные затраты:

$$\bar{Z}_\tau = \sum_{t=1}^m (E_{\text{н.п.}} K_t + \Delta U_t) (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t}, \quad (7.12)$$

где τ – год приведения затрат, который может быть любым календарным годом, лет;

K_t – капиталовложения в год t ;

ΔU_t – приращение ежегодных издержек в год t ;

T – срок строительства, лет;

t_3 – год начала эксплуатации;

m – количество лет, в течение которых производят капитальные вложения.

Приведенные затраты с учетом приращения приведенных затрат будут равны [231]:

$$\bar{Z}_\tau = \sum_{t=1}^m \Delta Z_t (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t} \quad (7.13)$$

Для комплексных водохозяйственных объектов наиболее медленно осваиваются объекты оросительных систем, а для гидроэнергетических систем – наиболее быстро.

Для комплексных водохозяйственных систем и объектов, дающих эффект в нескольких отраслях, приведенные затраты будут определяться по формуле [231]:

$$\bar{Z}_\tau = \sum_{i=1}^S \sum_{t=1}^m (E_{it} K_{it} + \Delta U_{it}) (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t}, \quad (7.14)$$

где S – число отраслей;

E_{it} – нормативный коэффициент;

K_{it} – капиталовложения, руб;

ΔU_{it} – приращение ежегодных издержек в отрасли (i) в год (t).

В случае, когда на водохозяйственных системах будут ущербы ($Y_{\text{ш}}$) или эффекты ($\mathcal{E}_{\text{ф}}$), то они должны быть учтены при выборе объекта. Тогда наивыгоднейший (оптимальный) вариант будет определяться по условию [231]:

$$\bar{Z}_\tau + \bar{Y}_{\text{ш}\tau} - \bar{\mathcal{E}}_{\text{ф}\tau} \rightarrow \min. \quad (7.15)$$

Такое условие носит общий характер, когда сравниваемые варианты не могут быть приведены к одинаковым результатам.

Пример расчета. Определим приведенные значения капитальных вложений, ежегодные издержки, приведенные издержки с учетом фактора времени.

Срок строительства водохозяйственной оросительной системы $T_{\text{oc}} = 5$ лет, капитальные вложения $K = 58,53$ млн руб., которые распределяются по годам $K_1 = 5$, $K_2 = 10$, $K_3 = 20$, $K_4 = 10$, $K_5 = 5$. Приведя капитальные вложения к последнему году $T_{\text{oc}} = 5$, найдем при нормативном коэффициенте $E_{\text{н.п.}} = 0,08$:

$$K_5 = K_1 (1 + E_{\text{н.п.}})^{5-1} + K_2 (1 + E_{\text{н.п.}})^{5-2} + K_3 (1 + E_{\text{н.п.}})^{5-3} + \\ + K_4 (1 + E_{\text{н.п.}})^{5-4} + K_5 (1 + E_{\text{н.п.}})^{5-5}$$

Тогда получим:

$$K_5 = 5 \cdot 1,08^4 + 10 \cdot 1,08^3 + 20 \cdot 1,08^2 + 10 \cdot 1,08^1 + 5 \cdot 1 = 58,53 \text{ млн руб.}$$

Распределение капитальных вложений по годам строительства (I), рост суммарных капитальных вложений (II), приведенных капитальных вложений к году $\tau = 5$ (III), представлены на рисунке 7.7.

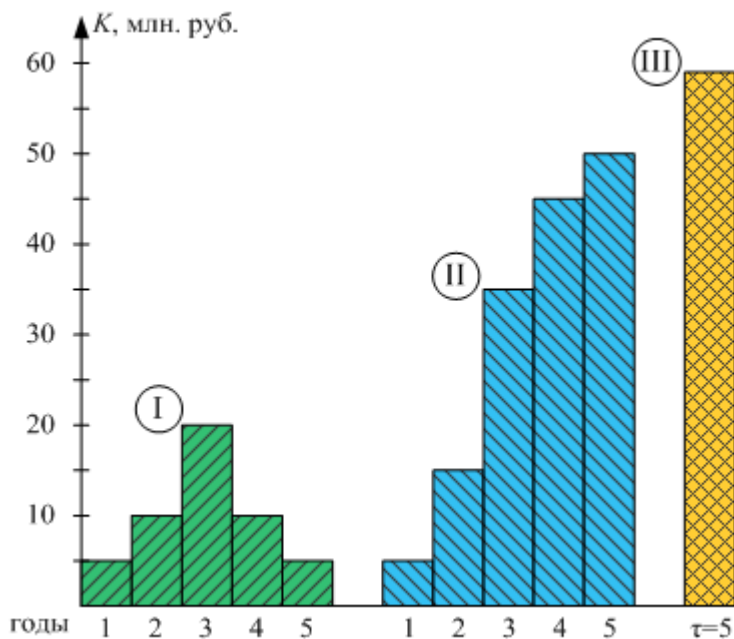


Рисунок 7.7 – Распределение капитальных вложений по годам строительства

Таким образом, распределение капитальных вложений по годам строительства (I) проходит неравномерно с учетом их увеличения в первые три года, а затем снижение в последние два года. На графике (II) наблюдается рост суммарных капитальных вложений в течение всех 5 лет. В то же время, приведенные капитальные вложения (III) к году $\tau = 5$ лет имеют наибольший рост и составляют для данного случая 58,53 млн руб.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 7

1. Необходимость расчета эффективности противofильтрационных облицовок оросительных каналов обуславливается длительным сроком их эксплуатации, как правило, достигающим 30–50 лет и более, значительным снижением их эффективности и эксплуатационной надежности, вызванным деформациями, повреждениями и отказами облицовок. Разработанная методика может служить количественной оценкой с целью принятия решения о текущем, капитальном ремонте или реконструкции облицовки оросительного канала.

2. Приведены сравнительные расчеты эффективности противofильтрационных покрытий каналов по коэффициентам фильтрации для бетонопленочных и грунтопленочных облицовок, выполняемых с применением в качестве ПФЭ полимерных геомембран, рассмотрены расчетные формулы для различных вариантов противofильтрационных покрытий, по которым даны примеры расчета.

3. Анализ результатов расчета эффективности различных типов противofильтрационных облицовок оросительных каналов показывает, что по показателю эффективности – осредненному коэффициенту фильтрации – наиболее эффективными являются облицовки из бентонитовых материалов и облицовка с геомембраной и защитным покрытием из грунта, значения которых составляют, соответственно, $0,5 \cdot 10^{-11}$ и $0,1 \cdot 10^{-10}$ м/с.

4. Анализ сводных результатов расчета приведенной стоимости для каждого варианта облицовки показывает, что наиболее высокая приведенная стоимость получена для двух вариантов: сборной и сборно-монолитной облицовок, которая составляет 1330 млн руб. Сравнительно невысокая приведенная стоимость получена для трех вариантов: облицовки с геомембраной отечественного и зарубежного производства и защитным покрытием из грунта и облицовки с бентонитовым материалом зарубежного производства, где приведенная стоимость составила от 140 до 207 млн руб. Самая наименьшая приведенная стоимость была получена для облицовки из бентонитовых материалов отечественного производства – 91 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Проведенный анализ и обзор исследований позволяет сделать вывод, что в нашей стране недостаточно изученными остаются вопросы применения новых геосинтетических покрытий на оросительных каналах и условия их работы при повреждаемости и самозалечивании, разработки конструкций противofильтрационных облицовок каналов повышенной надежности для различных условий применения, развития методов оценки эффективности и долговечности покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов.

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

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

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

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

мости автора и других отечественных исследователей для определения суммарного расхода фильтрации через систему щелей в противofильтрационном экране из геомембраны.

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

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

6. Впервые решена задача водопроницаемости через дефект противofильтрационного покрытия из геосинтетического бентонитового материала (с учетом самозалечивания повреждения) для условий оросительных каналов. Для расчета водопроницаемости и самозалечивания единичных повреждений в покрытиях каналов, выполняемых из геосинтетических бентонитовых материалов, сделан вывод о целесообразности использования метода последовательной смены стационарных состояний, когда нестационарный процесс фильтрации через единичное повреждение разбивается на ряд стационарных состояний за интервал времени Δt . По ре-

зультатам были установлены: время и скорость самозалечивания круглых повреждений в зависимости от их диаметра, радиус изменения отверстия в экране от времени, фильтрационный расход для первоначального и последующего контуров изменения положения повреждения, фильтрационный расход за весь период самозалечивания для конкретных условий.

7. По результатам сравнительного анализа эффективности и надежности различных типов противофильтрационных покрытий оросительных каналов установлено, что наиболее эффективными являются покрытия из геосинтетических бентонитовых материалов по коэффициенту фильтрации, который, соответственно, в 50–25 раз меньше облицовки с полимерной геомембраной и защитным покрытием из грунта или бетона, и более, чем в $4 \cdot 10^6$ раз больше бетонной облицовки. Кроме того, установлено, что противофильтрационные покрытия из геосинтетических бентонитовых материалов на оросительных каналах имеют наиболее высокую эксплуатационную надежность с вероятностью безотказной работы $P(t) \geq 0,90–0,98$.

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

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

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

10. По результатам проведенной оценки экономической эффективности для восьми типов противofильтрационных покрытий каналов установлено, что минимальная приведенная стоимость для варианта облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов отечественного производства составляет 91 млн руб. на $10\,000 \text{ м}^2$. Сравнительно невысокая приведенная стоимость получена для трех вариантов – грунтопленочной облицовки с геомембраной отечественного и зарубежного производства и облицовки из бентонитовых материалов зарубежного производства. Остальные варианты облицовок: бетонная монолитная и железобетонная сборная из плит НПК (или сборно-монолитная), с полимерной геомембраной отечественного и зарубежного производства, и защитным покрытием из бетона имеют высокую приведенную стоимость.

11. С целью выбора оптимального варианта противofильтрационного покрытия канала разработана обобщенная методика, включающая расчеты эффективности, надежности и определения приведенной стоимости для восьми различных

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

Некоторые из разработанных конструктивных решений нашли применение на объектах водохозяйственного и природоохранного назначения, что подтверждается 6 актами внедрения с экономическим эффектом 3,93 млн руб. и 1 актом внедрения результатов исследований в учебный процесс.

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГКМ – геокомпозитный материал

Ж/Б – железобетон

КПД – коэффициент полезного действия

ПК – пикет

ПФП – противofильтрационное покрытие

ПФУ – противofильтрационное устройство

ПФЭ – противofильтрационный элемент

ПЭВД – полиэтилен высокого давления

ПЭНД – полиэтилен низкого давления

ТП – типовой проект

УВ – уровень воды

УГВ – уровень грунтовых вод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков, Ф. К. Исключение непроизводительных потерь водных ресурсов из оросительной сети за счет использования инновационных облицовочных материалов / Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 10. – С. 91–94.
2. Абдразаков, Ф. К. Оценка перспективы использования бетонного полотна в качестве облицовочного материала оросительных каналов / Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 4. – С. 327–339.
3. 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 международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР академ. МАЭП и РАВН Бочкарева Я. В. – Часть II. – Рязань: РГАТУ, 2020. – С. 16–20.
4. 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 международным участием, Саратов, 22–23 октября 2020 г. – Саратов, 2020. – С. 11–14.
5. 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.
6. Аверьянов, В. Н. Оценка водоупорной способности экрана из аллювиальных суглинков на основе изучения микроструктуры грунта и фильтрационных исследований / В. Н. Аверьянов // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 8. – С. 15–20.

7. Аверьянов, С. Ф. Вопросы установления величины фильтрационных потерь в системе оросительных каналов (свободная фильтрация) / С. Ф. Аверьянов // Гидротехника и мелиорация. – 1950. – № 9. – С. 62–73.
8. Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – М.: Колос, 1982. – 237 с.
9. Алимов, А. Г. Новые методы и методология исследования водопроницаемости противofильтрационных облицовок каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2011. – Т. 262. – С. 55–67.
10. Алимов, А. Г. Современные противofильтрационные конструкции защитных облицовок каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 7. – С. 26–36.
11. Алимов, А. Г. Методика обоснования и выбора конструкций противofильтрационных облицовок каналов / А. Г. Алимов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2008. – № 3. – С. 42–44.
12. Алимов, А. Г. Противofильтрационная защита каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 4. – С. 36–42.
13. Амшоков, Б. Х. Методы фильтрационного расчета земляных плотин с грунтовыми и негрунтовыми противofильтрационными устройствами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07. Новочеркасск, 2008. – 24 с.
14. Анахаев, К. Н. О фильтрации через перемычку с экраном / К. Н. Анахаев, В. В. Беликов, К. А. Гегиев // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 3. – С. 57–60.
15. Анахаев, К. Н. О фильтрационном расчете земляных плотин с ядром / К. Н. Анахаев, Б. Х. Амшоков, А. В. Ищенко // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 5. – С. 26–34.
16. Анахаев, К. Н. Расчет фильтрации в земляных плотинах с противofильтрационными диафрагмами / К. Н. Анахаев, Б. Х. Амшоков, К. А. Гегиев // Мелиорация и водное хозяйство. – 2007. – № 2. – С. 27–29.
17. Анахаев, К. Н. Гидромеханический расчет свободной фильтрации из водотоков криволинейного профиля со смещенным тальвегом / К. Н. Анахаев // Докл. РАН. – 2004. – Т. 395. – № 6. – С. 761–766.

18. Анахаев, К. Н. Расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемом основании разной мощности / К. Н. Анахаев, Ж. Х. Шогенова, Б. Х. Амшоков // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 2. – С. 29–33.

19. Анахаев, К. Н. Свободная фильтрация из водотоков / К. Н. Анахаев // Известия РАН. МЖГ. – 2004. – № 5. – С. 94–99.

20. Анискин, Н. А. Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях / Н. А. Анискин, А. С. Антонов // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 10. – С. 4–9.

21. Анискин, Н. А. Прогноз фильтрационного режима грунтовой плотины Юмагузинского гидроузла и ее основания / Н. А. Анискин, То Ван Тхань // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 6. – С. 19–25.

22. Анискин, Н. А. Неустановившаяся фильтрация в грунтовых плотинах и основаниях / Н. А. Анискин // Вестник МГСУ. – 2009. – № 2. – С. 200–209.

23. Аравин, В. И. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений / В. И. Аравин, С. Н. Нумеров. – М.: Госстройиздат, 1955. – 456 с.

24. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде / В. И. Аравин, С. К. Нумеров. – М.: Госуд. изд-во технико-теоретической литературы, 1953. – С. 559–563.

25. Баев О. А., Косиченко Ю. М. Особенности гидравлических условий эксплуатации крупных каналов // Экология и водное хозяйство. – 2019. – № 3 (03). – С. 145–160.

26. Баев, О. А. Вопросы реконструкции крупных каналов и оценка их эффективности / О. А. Баев, Ю. М. Косиченко // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 287–301. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1250> (дата обращения: 01.08.2022). DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-287-301.

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

28. Баев, О. А. Дренажно-защитные покрытия с использованием профилированных мембран / О. А. Баев // Trends in world of science: сб. науч. тр. по мате-

риалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Смоленск, 20 мая 2019 г. – Смоленск: Наукосфера, 2019. – С. 66–69.

29. Баев, О. А. Исследования в области применения полимерных материалов для противofiltrационных целей / О. А. Баев // Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения. Материалы междунар. научн. конф. – Т. I. – М.: Изд-во. ВНИИА. – 2016. – С. 45–49.

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

31. Баев, О. А. Методы оценки эффективности и водопроницаемости противofiltrационных покрытий каналов / О. А. Баев, Е. О. Складенко // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2020. – № 3 (06). – С. 98–109. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=81>. – DOI: 10.31774/2658-7890-2020-3-98-109.

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

33. Бакланова, Д. В. Обоснование влияния фfiltrационных факторов на вероятность аварийных ситуаций потенциально опасных участков каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Бакланова Дарья Викторовна. – Новочеркасск, 2014. – 23 с.

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

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

36. Бакланова, Д. В. Расчетное обоснование вероятности разрушения потенциально опасных участков крупного канала от фильтрационных воздействий / Д. В. Бакланова // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 43–48.

37. Бакланова, Д. В. Факторы, влияющие на возникновение аварийных ситуаций на крупных каналах / Д. В. Бакланова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2011. – № 3 (03). – 9 с. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=37&id=41>.

38. Баламирзоев, А. Г. Методика оценки гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности каналов / А. Г. Баламирзоев // Бассейн реки Терек: проблемы регулирования, восстановления и реабилитации водных объектов: сб. науч. тр. Всероссийской науч.-практ. конф., Махачкала, Нальчик, Пятигорск, 27–30 мая 2015 г. – 2015. – С. 62–65.

39. Баламирзоев, А. Г. О решении задачи осесимметричной фильтрации воды в деформируемых водонасыщенных грунтах / А. Г. Баламирзоев, В. В. Иванов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 4. – С. 72–75.

40. Баламирзоев, А. Г. Численное моделирование осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости / А. Г. Баламирзоев, В. В. Иванов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 11–1. – С. 15–20.

41. Бандурин, М. А. Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Бандурин Михаил Александрович. – Москва, 2017. – 41 с.

42. Бандурин, М. А. Обследование состояния оросительных лотковых каналов Азовской оросительной системы неразрушающими методами / М. А. Бандурин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2006. – № 24. – С. 72–76. – Режим доступа: <http://ej.kub-agro.ru/2006/08/pdf/34.pdf>.

43. Белов, В. А. Инженерная защита крупных каналов в сложных условиях эксплуатации / В. А. Белов, А. А. Кондратенко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – № 1 (129). – С. 87–88.

44. Белов, В. А. Расчет потерь воды из малого водоема с экраном / В. А. Белов, А. Э. Пасенчук, А. П. Кильюшик // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 3. – С. 19–21.
45. Белов, В. А. Экспериментальные исследования фильтрации через плотину в заиленном малом водоеме / В. А. Белов, А. С. Смеловский // Мелиорация и водное хозяйство. – 2010. – С. 116–120.
46. Белогай, С. Г. Гидротехнические сооружения внутрихозяйственной мелиоративной сети: монография / С. Г. Белогай, В. А. Волосухин, А. И. Тищенко. – М.: ИЦ РИОР; ИНФРА-М, 2013. – 321 с.
47. Битюрин, А. К. Методическое обеспечение инженерных расчетов температурно-фильтрационного режима гидроузлов в условиях вечной мерзлоты на ПЭВМ / А. К. Битюрин, С. Г. Соболев // Гидротехническое строительство. – 1993. – № 11. – С. 22–24.
48. Блажко, Л. С. О коэффициенте водоотдачи геотекстильных материалов / Л. С. Блажко, В. И. Штыков // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 10. – С. 26–27.
49. Ведерников, В. В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. – М. – Л.: Госстройиздат, 1939. – 248 с.
50. Ведерников, В. В. Фильтрация из каналов / В. В. Ведерников. – М.; Л.: Госстройиздат, 1934. – 68 с.
51. Веригин, Н. Н. Фильтрация воды из оросителя ирригационной системы / Н. Н. Веригин // Доклады АН СССР. – 1949. – Т.66. – № 4. – С. 589–592.
52. Волосухин, В. А. Основы теории и методы расчета тканевых сооружений мелиоративных систем / В. А. Волосухин, В. А. Кузнецов. – Новочеркасск: НГМА, 2001. – 266 с.
53. Волосухин, В. А. Разработка и применение многофункциональных быстровозводимых гибких защитных инженерных сооружений из высокопрочных тканевых материалов с резиновым или полимерным покрытием / В. А. Волосухин, С. Г. Новиков, Е. А. Чижов, А. Е. Чижов // Гидротехника, 2017. – № 3. – СПб.: Изд-во Колорит. – С. 77–81.
54. Волосухин, В. А. Тканевые и сетчатые конструкции в водном хозяйстве / В. А. Волосухин, В. Л. Бондаренко. – Новочеркасск: НИМИ, 1994. – 100 с.

55. Гайбуллаева, Д. А. Состояние оросительных каналов и необходимость совершенствования их проектирования / Д. А. Гайбуллаева // Лучшая научная статья 2019: сб. ст. XXIV Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 апреля 2019 г. – Пенза, 2019. – С. 22–25.

56. Гарбуз, А. Ю. Ремонт повреждений облицовок длительно работающих каналов с использованием полимерных композиций / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2015. – № 2 (58). – С. 33–39.

57. Гарбуз, А. Ю. Технология ремонта бетонных облицовок каналов битумно-полимерной мастикой / А. Ю. Гарбуз, В. Ф. Талалаева // Мелиорация и гидротехника. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 299–313.

58. 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.

59. Глаговский, В. Б. Геосинтетические материалы в гидротехническом строительстве / В. Б. Глаговский [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 9. – С. 23–27.

60. Гладштейн, О. И. Геомембраны – уже не инновации, еще не классика / О. И. Гладштейн // Строительство и городское хозяйство. – 2012. – № 138. – С. 22–23.

61. Гладштейн, О. И. Применение геомембран для устройства противofильтрационных экранов объектов и сооружений хранения нефти и нефтепродуктов / О. И. Гладштейн // Сфера. Нефть и газ. – 2010. – № 3. – С. 94–96.

62. Глебов, В. Д. Некоторые проблемы устройства полимерных пленочных противofильтрационных элементов / В. Д. Глебов, В. П. Лысенко // ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: труды координационных совещаний по гидротехнике, 1972. – Вып. 74. – С. 93–98.

63. Глебов, В. Д. Противofильтрационные конструкции грунтовых гидротехнических сооружений / В. Д. Глебов // Гидротехническое строительство. – 1985. – № 1. – С. 17–20.

64. Голованов, А. И. Математическая модель переноса влаги и растворов солей в почвогрунтах на орошаемых землях / А. И. Голованов, О. С. Новиков // М.: Труды МГМИ, 1974. – Вып. 36. – С. 87–95.

65. Голованов, А. И. Метод расчета фильтрационных куполов под днищем бассейнов суточного регулирования ГЭС / А. И. Голованов, Ю. И. Сухарев, С. В. Сольский // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 37–42.

66. Гольдин, А. Л. Проектирование грунтовых плотин / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов. – М: Изд-во АСВ, 2001. – 374 с.

67. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – Введ. 2017-05-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

68. ГОСТ 33068-2014 (EN 13252:2005). Международный стандарт. материалы геосинтетические для дренажных систем. Общие технические требования. – Введ. 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 48 с.

69. ГОСТ ISO 9862-2014. Материалы геосинтетические. Порядок отбора и подготовки образцов для испытаний. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 10 с.

70. ГОСТ ISO 9862-2014. Материалы геосинтетические. Порядок отбора и подготовки образцов для испытаний. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

71. ГОСТ Р 50277-92 (ИСО 9864-90). Материалы геотекстильные. Метод определения поверхностной плотности. – Введ. 1992-16-09. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 2 с.

72. ГОСТ Р 53225-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Материалы геотекстильные. Термины и определения. Geotextiles. Terms and definitions. – Введ. 2010-01-01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 30 с.

73. ГОСТ Р 56586-2015. Геомембраны гидроизоляционные полиэтиленовые рулонные. Технические условия. – Введ. 2016-0-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 9 с.

74. ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования. – Введ. 2019-07-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 59 с.

75. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2016 году» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii.

76. Гурьев, А. П. Гидравлические исследования условий работы покрытия из геокомпозитного материала – геомата марки «Энкамат А20» / А. П. Гурьев, Д. В. Козлов, Н. В. Ханов, К. Д. Козлов // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 150-летию РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева: сб. тр. – М.: РГАУ-МСХА, 2015. – С. 305–307.

77. Елшин, И. М. Полимерные материалы в ирригационном строительстве / И. М. Елшин. – М.: Колос, 1974. – 192 с.

78. Елшин, И. М. Натурные исследования долговечности противofильтрационных полимерных пленочных экранов / И. М. Елшин, В. В. Сокольская, В. Я. Ващук // Гидротехническое строительство. – 1975. – № 1. – С. 19–21.

79. Еремеев, А. В. Исследование фofильтрационных характеристик геомата с наполнителем из щебня и битум-полимера / А. В. Еремеев, А. П. Гурьев, Н. В. Ханов // Природообустройство. – 2018. – № 4. – С. 48–52.

80. Еремеев, А. В. Некоторые результаты исследований характеристик геомата на щебне с битум-полимерным вяжущим / А. В. Еремеев, А. П. Гурьев, Н. В. Ханов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2019. – Т. 291. – С. 22–28.

81. Жиленков, В. Н. Рекомендации по проектированию и строительству противofильтрационных экранов золоотвалов и накопителей производства сточных вод электростанций (П 82-79) / В. Н. Жиленков, В. Д. Глебов, Н. В. Стабников. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1980. – 78 с.

82. Защитные покрытия оросительных каналов / В. С. Алтунин, В. А. Бородин, В. Г. Ганчиков, Ю. М. Косиченко. – М.: Колос, Агропромиздат, 1988. – 160 с.

83. Зверев, А. О. Противofильтрационные элементы грунтовых плотин из геосинтетических материалов / А. О. Зверев, М. П. Саинов // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 1. – С. 202–210.

84. Зверев, А. О. Экспериментальные исследования работы геомембран при сдвиге по бетону и щебню / А. О. Зверев, М. П. Саинов // Вестник Евразийской науки. – 2018. – № 2. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/78SAVN218.pdf>.

85. Золотозубов, Д. Г. Исследование влияния прокола на сопротивление разрыву геосинтетических материалов / Д. Г. Золотозубов, О. А. Золотозубова // Вестник Пермского национального исследовательского Политехнического университета. Строительство и архитектура. – Пермь, 2014. – № 1. – С. 80–90.

86. Зоценко А. Ф. Противофильтрационная эффективность бетонных облицовок каналов. Мелиорация и водное хозяйство. 1988. № 5. С. 25–27.

87. Ищенко, А. В. Анализ потерь на фильтрацию и КПД крупных облицованных каналов / А. В. Ищенко // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2006. – № 1. – С. 53–61.

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

89. Ищенко, А. В. Разработка и научное обоснование конструктивно-технических решений для противофильтрационной защиты накопителей отходов / А. В. Ищенко, В. Ф. Сильченко // Мелиорация и водное хозяйство: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Шумаковские чтения) с междунар. участием. – 2018. – С. 162–167.

90. Ищенко, А. В. Расчет эффективности дренажных устройств комбинированных противофильтрационных облицовок / А. В. Ищенко, Ю. М. Косиченко, Е. И. Ильиченко // Мелиорация антропогенных ландшафтов. Т. 17. Рациональное использование земельных и водных ресурсов Юга России. – Новочеркасск: НГМА. – 2002. – С. 51–60.

91. Ищенко, А. В. Теоретическая модель водопроницаемости бетонопленочного противофильтрационного покрытия канала / А. В. Ищенко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 93–97.

92. Ищенко, А. В. Гидравлическая модель водопроницаемости и эффективности противофильтрационных облицовок крупных каналов / А. В. Ищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 51–64.

93. Калинин, Н. К. О неустановившемся движении грунтовых вод со свободной поверхностью / Н. К. Калинин, П. Я. Полубаринова-Кочина // ПММ. – 1947. – Т. 11. – Вып. 2. – С. 231–236.

94. Кашарин, Д. В. Защитные инженерные сооружения из композитных материалов в водохозяйственном строительстве / Д. В. Кашарин. – Новочеркасск, 2012. – 344 с.

95. Кашарин, Д. В. Оценка надежности облегченных конструкций из композитных материалов / Д. В. Кашарин // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 6. – С. 22–29.

96. Кашарина, Т. П. Исследование надежности работы мембранно-вантовых конструкций из композитных материалов / Т. П. Кашарина, С. И. Шиян, А. М. Кореновский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2009. – № 13 (32). – С. 180–187.

97. Кашарина, Т. П. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации облегченных плотин с водовыпускными устройствами / Т. П. Кашарина, В. И. Кашарин. – Новочеркасск, 1985. – 90 с.

98. Кильдишев, Н. А. Совершенствование технологии строительства пленочных экранов оросительных водоемов-каналов / Н. А. Кильдишев // Технология и механизация мелиоративных работ: сб. науч. тр. – Л.: СевНИИГИМ, 1978. – С. 51–55.

99. Козлов, В. В. Гидроизоляционные материалы / В. В. Козлов, В. П. Камсков. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 239 с.

100. Козлов, В. Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учеб. пособие / В. Н. Козлов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 244 с.

101. Козлов, К. Д. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала / К. Д. Козлов, А. П. Гурьев, Н. В. Ханов // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 80–86.

102. Козлов, К. Д. Исследования гидродинамического воздействия водного потока на защитное покрытие из геосинтетического материала / К. Д. Козлов, Н. В. Ханов, В. А. Фартуков, Д. В. Козлов // Строительство: наука и образование. – 2018. – № 1. – С. 108–117.

103. Колганов, А. В. Результаты натурных исследований магистрального канала в Республике Калмыкия / А. В. Колганов, О. А. Баев, Д. В. Бакланова // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 108–114.

104. Колганов, А. В. Гидравлическая эффективность и надежность оросительных каналов / А. В. Колганов, Ю. М. Косиченко. – М: Рома, 1997. – 160 с.
105. Колганов, А. В. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России / А. В. Колганов, В. Н. Щедрин, Н. А. Сухой, В. Н. Шкура. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 222 с.
106. Косиченко, Ю. М. Вероятностная модель эксплуатационной надежности крупных каналов / Ю. М. Косиченко, Ю. И. Иовчу, М. Ю. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 12. – С. 39–45.
107. Косиченко, Ю. М. Выбор эффективной противofильтрационной облицовки каналов из традиционных и геосинтетических материалов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 10. – С. 19–25.
108. Косиченко, Ю. М. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – Вып. 8. – С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162.
109. Косиченко, Ю. М. Исследования фильтрации через каменно-земляную плотину Юмагузинского гидроузла на реке Белой / Ю. М. Косиченко, В. Л. Бондаренко, А. В. Ищенко, С. Н. Полубедов, М. Ю. Косиченко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2000. – № 3. – С. 67–72.
110. Косиченко, Ю. М. Исследования фильтрационных потерь с каналов оросительных систем / Ю. М. Косиченко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 6. – С. 24–25.
111. Косиченко, Ю. М. Методы расчета водопроницаемости полимерных противofильтрационных экранов гидротехнических сооружений / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2017. – Т. 286. – С. 10–21.
112. Косиченко, Ю. М. Многослойные конструкции противofильтрационных покрытий с бентонитовыми матами и оценка их сравнительной эффективности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 3. – С. 37–43.
113. Косиченко, Ю. М. Надежность применения дренажных геоконпозитных матов в гидромелиоративном строительстве / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2020. – № 1. – С. 14–19.

114. Косиченко, Ю. М. Обзор геосинтетических материалов, применяемых в гидротехническом строительстве / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Технология очистки воды «Техновод–2019»: материалы XII Международной науч.-практ. конф. 22–23 окт. 2019 г. Москва / ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова. Т. 384. – Новочеркасск: Лик, 2019. – С. 55–61.
115. Косиченко, Ю. М. Обоснование применения защитных прокладок из геотекстиля и оценка водопроницаемости противofильтрационных покрытий из геомембран / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник МГСУ, 2015. – № 3. – С. 48–58.
116. Косиченко, Ю. М. Обоснование расчетных зависимостей фильтрационных сопротивлений конструкций облицовок каналов / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2015. – Т. 278. – С. 35–46.
117. Косиченко, Ю. М. Обоснование эффективности Пролетарского магистрального канала при реконструкции / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 77–84. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-77-84.
118. Косиченко, Ю. М. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 90–98. – DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.
119. Косиченко, Ю. М. Особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закоматированными швами с учетом проницаемости основания / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ, 2018. – Т. 13. – № 5 (116). – С. 633–642. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.633-642.
120. Косиченко, Ю. М. Оценка водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закоматированными швами при длительной эксплуатации каналов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ, 2016. – № 7. – С. 113–133.
121. Косиченко, Ю. М. Оценка достоверности расчетов удельного фильтрационного расхода через насыпную дамбу необлицованного канала / Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2022. – № 2 (86). – С. 135–142.

122. Косиченко, Ю. М. Оценка комплексной реконструкции и модернизации оросительных систем / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 6–12.

123. Косиченко, Ю. М. Оценка надежности плотины Юмагузинского гидроузла с точки зрения фильтрации / Ю. М. Косиченко, В. Л. Бондаренко, А. В. Ищенко, М. А. Морозов // Водное хозяйство России. – 1999. – Т. 1. – № 4. – С. 374–379.

124. Косиченко, Ю. М. Применение бентонитовых матов – путь к созданию непроницаемых экранов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехника. – 2019. – № 1 (54). – С. 74–77.

125. Косиченко, Ю. М. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов: монография / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев. – Новочеркасск: «РосНИИПМ», 2014. – 239 с.

126. Косиченко, Ю. М. Расчет водопроницаемости грунтопленочного экрана в случае неполного размыва защитного покрытия / Ю. М. Косиченко, Т. В. Клодина, И. А. Бондаренко // Актуальные вопросы водной мелиорации на Кубани. – 1996. – С. 206–210.

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

128. Косиченко, Ю. М. Расчет противофильтрационной эффективности облицовок с пленочными экранами / Ю. М. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 1983. – № 12. – С. 82–86.

129. Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности конструкций противофильтрационных экранов из геокомпозитов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2015. – Т. 275. – С. 68–77.

130. Косиченко, Ю. М. Рекомендации по расчету и эксплуатации крупных каналов с частично облицованными руслами / Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурин. – Новочеркасск, 2001. – 33 с.

131. Косиченко, Ю. М. Теоретическая оценка водопроницаемости противофильтрационной облицовки нарушенной сплошности / Ю. М. Косиченко,

О. А. Баев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 68–74.

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

133. Косиченко, Ю. М. Обеспечение противofильтрационной эффективности и надежности облицовок оросительных каналов / Ю. М. Косиченко // Доклады ВАСХНИЛ. – 1988. – № 3. – С. 41–43.

134. Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 240 с.

135. Кулабухова, И. И. О неустановившейся фильтрации при неполной насыщенности грунта / И. И. Кулабухова, П. Я. Полубаринова-Кочина // Изв. АН СССР, мех. и маш. – 1959. – № 2.

136. Лаврик, В. И. Справочник по конформным отображениям / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. – Киев: Наукова думка, 1970. – 252 с.

137. Лапина, О. Ю. Геомембраны: от инноваций – до стандарта / О. Ю. Лапина // Сфера. Нефть и Газ. – 2015. – № 4 (48). – С. 102–105.

138. Лупачев, О. Ю. Исследования повреждаемости геомембран частицами грунта защитных слоев / О. Ю. Лупачев // Гидротехника. – 2011. – № 2 (22). – С. 36–39.

139. Лупачев, О. Ю. Исследования повреждаемости геомембран частицами грунта защитных слоев / О. Ю. Лупачев // Геосинтетические материалы в промышленном и гидротехническом строительстве: сб. материалов I-й Международной науч. техн. конф. – СПб., – 2011. – С. 35–49.

140. Лупачев, О. Ю. Противofильтрационные элементы из геомембран. Опыт применения в гидротехническом строительстве / О. Ю. Лупачев, В. И. Телешев // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 6. – С. 35–43.

141. Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1974. – 279 с.

142. Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

143. Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов / С. В. Сольский, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, С. Г. Шульман. – СПб.: «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2006. – 300 с.

144. Недрига, В. П. О вероятностном расчете повреждений пленочных противofiltrационных экранов гидротехнических сооружений / В. П. Недрига, В. А. Бородин // Применение модифицированных полимерных материалов в конструкциях мелиоративных систем. Елгава. – 1983. – С. 145–151.

145. Недрига, В. П. О водопроницаемости противofiltrационных пленочных экранов искусственных водоемов / В. П. Недрига // Труды ВНИИ ВОДГЕО. Инженерная гидрогеология. Вып. 52. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1976. – С. 22–26.

146. Новосельский, С. Н. Теория Филипа и ее обобщение на нестационарные задачи влагопереноса при капельном орошении / С. Н. Новосельский // Гидравлика и инженерная гидрология. – Калинин, 1981. – С. 114–120.

147. Овчаров, А. С. Определения прочностных характеристик геосинтетических материалов / А. С. Овчаров, Д. Г. Золотозубов // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – Пермь, 2011. – № 1. – С. 54–57.

148. Охапкин, Г. В. Анализ подходов к выбору способов нанесения или укладки ремонтных материалов при восстановлении бетона конструкций ГТС / Г. В. Охапкин, Л. С. Василевская // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 3. – С. 39–45.

149. Охапкин, Г. В. Подходы к восстановлению объемной структуры бетона гидротехнических сооружений / Г. В. Охапкин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2020. – Т. 294. – С. 13–21.

150. Охапкин, Г. В. Проектное обоснование рациональных технических решений по ремонту локальных и площадных разрушений бетона гидротехнических сооружений / Г. В. Охапкин, В. М. Давиденко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2019. – Т. 294. – С. 104–114.

151. Павловский, Н. Н. О фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях / Н. Н. Павловский. – Л.: КУБУЧ, 1932. – VIII. – 195 с.

152. Павловский, Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения: собр. соч. / Н. Н. Павловский. – М. – Л.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1956. – Т. 2. – 771 с.

153. Пат. 2385984 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Противофильтрационный экран / Ягин В. П., Вайкум В. А., Лейманн Т. В., Данилкова Н. Н.; заявитель и патентообладатель Ягин В. П. – № 2009104296/03; заявл. 09.02.09; опубл. 10.04.10, Бюл. № 10. – 10 с.

154. Пат. 2434098 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ противофильтрационного экранирования дна водоема / Ягин В. П., Зубченко Г. В., Лейманн Т. В., Генкин С. А., Данилкова Н. Н.; заявитель и патентообладатель Ягин В. П. – № 2010136435/13; заявл. 30.08.10; опубл. 20.11.11, Бюл. № 32. – 12 с.

155. Пат. 2312182 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ определения потерь воды на фильтрацию из каналов / Алимов А. Г.; заявитель и патентообладатель Поволжский науч.-исслед. ин-т эколого-мелиор. технологий РАСН. – № 2006109077/03; заявл. 22.03.06; опубл. 10.12.07, Бюл. № 34. – 10 с.: ил.

156. Пат. 2408761 Российская Федерация, МПК E02B 3/16, E02B 5/02. Способ и устройство создания противофильтрационного покрытия оросительных каналов / Бандурин М. А., Волосухин В. А., Ковшевацкий В. Б., Бандурин В. А., Волосухин Я. В.; заявитель и патентообладатель Новочеркасская гос. мелиоратив. акад. – № 2009112150/21; заявл. 01.04.09; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1. – 5 с.

157. Пат. 2530995 Российская Федерация, МПК E02B 3/16, E02B 13/00. Способ определения потерь воды на фильтрацию из каналов с противофильтрационной облицовкой / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Чернов М. А., Кореновский А. М., Сундеев Ю. С.; заявитель и патентообладатель ОАО «Юж. науч.-исслед. ин-т. гидротехники и мелиорации» – № 2013100691/13; заявл. 09.01.13; опубл. 20.07.14, Бюл. № 29. – 9 с.

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

159. Пат. 2614580 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Противофильтрационное композитное полотно / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. – № 2016108403, заявл. 09.03.2016; опубл. 28.03.2017, Бюл. № 10. – 8 с.

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

161. Пат. 2621540 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Способ контроля целостности полимерного противофильтрационного экрана / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. – № 2016110346; заявл. 21.03.16; опубл. 06.06.17, Бюл. № 16. – 4 с.

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

163. Пат. 2654084 Российская Федерация, МПК E02B 3/16, E02B 5/02. Способ реконструкции деформационных швов сборных противофильтрационных бетонных и железобетонных облицовок гидротехнических сооружений / Семенов С. Я., Дубенок Н. Н., Арьков Д. П., Марченко С. С., Чушкин А. Н., Скворцов В. Ф., Попов П. С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». – № 2016123743; заявл. 15.06.16; опубл. 16.05.18, Бюл. № 14. – 8 с.

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

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

166. Пат. 2718805 Российская Федерация, МПК E02B 3/16. Многослойное противofильтрационное покрытие с дренирующим элементом / Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Баев О. А. – № 2019117682; заявл. 05.06.19; опубл. 14.04.20, Бюл. № 11. – 10 с.

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

168. Перелыгин, А. И. Об эксплуатации крупных каналов в условиях реконструкции / А. И. Перелыгин, В. А. Белов // Гидротехника. – 2014. – № 2 (35). – С. 50–51.

169. Печенежская, И. А. Водопроницаемость полимерных противofильтрационных экранов для условий установившегося и неуставившегося характера фильтрации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / Печенежская Ирина Александровна. – Новочеркасск, 1988. – 19 с.

170. Печенежская, И. А. Методика расчета фильтрации из каналов и водоемов с полимерными противofильтрационными экранами / И. А. Печенежская. – Ростов н/Д.: Малыш, 1998. – 3 с.

171. Письмо Координационного центра по ценообразованию и сметному нормированию в строительстве от 12 января 2016 г. № КЦ/2016-01 «Об индексах изменения сметной стоимости строительства по Федеральным округам и регионам Российской Федерации на январь 2016 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ocenchnik.ru/docsf/2482-index-kccsn-smetnoy-stoimosti-january16.html>.

172. Положий, Г. Н. Теория и применение p -аналитических и (p, q) -аналитических функций / Г. Н. Положий. – Киев, 1973. – 422 с.

173. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

174. Полубедов, С. Н. Задача фильтрации бетонной облицовки при наличии в ней одиночной волосяной трещины. // Актуальные вопросы мелиорации и природопользования: Тезисы докладов научно техн. конф. НГМА. – Новочеркасск. – 1997. – С. 33–34.

175. Поляков, С. А. Надежность противofильтрационных облицовок и экранов с применением пленочных материалов на оросительных каналах и водоемах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. Новочеркасск, 1993. – 24 с.

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

177. Пономарев, А. Б. Геотехнические аспекты применения геосинтетических материалов в строительстве. Области применения. Результаты / А. Б. Пономарев // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении. Материалы межд. науч.-техн. конф. – 2018. – С. 18–32.

178. Программа выбора оптимального варианта противofильтрационной облицовки канала: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020610563 / Васильев С. М., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю., Сильченко В. Ф.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». Заявка № 2019667389; заявл. 26.12.2019; опубл 16.01.2020. – 1 с.

179. Программа расчета водопроницаемости и надежности облицовки из геомембраны с защитным покрытием из грунта: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019660670 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». Заявка № 2019619740; заявл. 05.08.2019; опубл 09.08.2019. – 1 с.

180. Программа расчета водопроницаемости и надежности облицовки из геомембраны с защитным покрытием из бетона: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019619394 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». Заявка № 2019618037; заявл. 02.07.2019; опубл 16.07.2019. – 1 с.

181. Программа расчета эффективности противofильтрационных покрытий из бентонитовых матов: свидетельство о гос. регистрации программы для

ЭВМ 2019660671 / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». Заявка № 2019619741; заявл.05.08.2019; опубл 09.08.2019. – 1 с.

182. Просвиряков, А. С. Прочность и деформируемость геомембран разных видов / А. С. Просвиряков, М. П. Саинов, А. О. Зверев, Р. В. Лукичев // Строительство: наука и образование. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 1–4. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.4.

183. Прямицкий, А. В. Bentonитовые маты как альтернативный материал для противofiltrационных элементов гидротехнических сооружений / А. В. Прямицкий, Ю. Шлее // Гидротехника. XXI век. – 2010. – С. 52–56.

184. Прямицкий, А. В. Основные свойства бентонитовых глин / А. В. Прямицкий // Гидротехника. XXI век. – № 2. – С. 66–71.

185. Работы по гидроизоляции бентонитовыми матами БентИзол. Проекты и работы компании БентИзол по гидроизоляции различных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bentizol.ru/our-works/>.

186. Радченко, В. Г. Применение геосинтетических материалов при строительстве плотин / В. Г. Радченко, В. М. Семенов // Гидротехническое строительство. – 1992. – № 10. – С. 50–54.

187. Рассказов, Л. Н. Напряженно-деформированное состояние, фильтрационная прочность, устойчивость и оптимизация грунтовых плотин / Л. Н. Рассказов, В. П. Недрига, А. Л. Можевитинов // Гидротехническое строительство. – 1987. – № 5. – С. 25–28.

188. Рассказов, Л. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений и оснований / Л. Н. Рассказов, Н. А. Анискин // Гидротехническое строительство. – 2000. – № 11. – С. 2–7.

189. Рубин, В. М. Бетонная облицовка каналов / В. М. Рубин, А. Г. Шлаен // Гидротехника и мелиорация, 1987. – 183 с.

190. Саинов, М. П. Напряженно-деформированное состояние перемычки с зигзагообразной геосинтетической диафрагмой / М. П. Саинов, А. О. Зверев, М. К. Скляднева // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – № 9 (120). – С. 1080–1089.

191. Сергеев, Б. И. Пятьдесят лет научной школе мягких гидротехнических конструкций в водохозяйственном строительстве / Б. И. Сергеев, В. Л. Бондаренко, В. А. Волосухин, А. И. Блясов. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – 248 с.
192. Сильченко, В. Ф. Исследования в области противofильтрационной защиты каналов, водоемов и накопителей / В. Ф. Сильченко // European science of the future: сб. науч. тр. по материалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Смоленск, 8 апреля 2019 г. – Смоленск: Наукосфера, 2019. – С. 79–82.
193. Сильченко, В. Ф. Применение быстровозводимого бетонного покрытия для укрепления откосов каналов // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2021. – Т. 3. – № 1. – С. 36–44. – URL: <http://rosniipm-sm1.ru/article?n=100> (дата обращения: 01.06.2021).
194. Скляренко, Е. О. Методы экранирования оросительных каналов и водоемов / Е. О. Скляренко, Э. Н. Вертыганова // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – № 2 (70). – С. 29–34.
195. Скляренко, Е. О. Экспериментальные исследования противofильтрационных и дренажных защит накопителей промышленных отходов / Е. О. Скляренко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 5. – С. 71–72.
196. Скляренко, Е. О. Анализ водопроницаемости противofильтрационных экранов в программном комплексе «Comsol multiphysics» / Е. О. Скляренко, О. А. Баев // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3104.
197. Скуеро, А. М. Геомембраны – хорошо зарекомендовавшие себя водонепроницаемые системы на гидротехнических сооружениях / А. М. Скуеро, Г. Л. Васкетти // Международный дайджест по гидроэнергетике и плотинам. – 2007. – С. 59–68.
198. Соболев, С. В. Температурный режим фильтрующих таликов в основании гидроузла и берегах водохранилища / С. В. Соболев, А. В. Февралев // Известия вузов. Строительство. – 1992. – № 5-6 – С. 106–110.

199. Созаев, А. А. Эксплуатационная надежность облицованных каналов: монография / А. А. Созаев, С. О. Курбанов. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 174 с.

200. Сольский, С. В. Исследование самозалечивания трещин в глиноцементнобетонных диафрагмах (На примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) / С. В. Сольский, Р. Н. Орищук, М. Г. Лопатина, Н. Л. Орлова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2017. – Т. 283. – С. 19–29.

201. Сольский, С. В. Применение геомембран в гидротехническом строительстве. Проблемы использования в конструкциях противofильтрационных элементов / С. В. Сольский, С. А. Быковская // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства, Москва, 17 июня 2020 г. – М., 2020. – С. 27–28.

202. Сольский, С. В. Проблемы применения геосинтетических материалов (геомембран) в конструкции противofильтрационных элементов гидротехнических сооружений / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, С. А. Быковская, В. А. Клушнцев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2020. – Т. 296. – С. 22–43.

203. Сольский, С. В. Лабораторные исследования геосинтетических материалов для обоснования их применения в конструкциях грунтовых гидротехнических сооружений / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, Н. Л. Орлова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 27. – С. 84–91.

204. Сольский, С. В. Результаты лабораторных исследований фofильтрационных характеристик глиноцементобетона / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, Е. Е. Легина, Р. Н. Орищук, Н. Л. Орлова // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 36–40.

205. СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения: актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. 17.06.17. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 209 с.

206. СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. – Введ. 2013-01-01. – М.: Минрегион РФ, 2012. – 70 с.

207. СП 421.1325800.2018 Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 24.12.18: введ. в действие с 25.06.19. – М.: Стандартинформ, 2019. – 91 с.

208. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль, Н. В. Данильченко, А. А. Каспарсон [и др.]. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

209. СТО 1.1-1-2020 Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Правила обследования технического состояния и проведения ремонтных работ на мелиоративных системах и гидротехнических сооружениях. – Введ. 2020-07-14. – Энгельс: ВолжНИИГиМ, 2020. – 51 с.

210. СТО 4.2-6-2015 Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Магистральные каналы. Определение потерь на фильтрацию. – Введ. 2015-06-29. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 43 с.

211. СТО 65396612-016-2017. Bentonитовые маты гидроизоляционные марки «Vento-GR». Технические условия. – 2017. М. – Геопродукт. – 19 с.

212. Татьянников, Д. А. Определение характеристик трения для двух типов геосинтетических материалов путем проведения испытаний на сдвиг / Д. А. Татьянников, А. Б. Пономарев, В. И. Клевеко и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 174–186. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.1.15.

213. Технологическая карта на устройство гидроизоляции материалами геосинтетическими бентонитовыми рулонными видов «Bentizol» и «Masterbent» (СТО 8729967.003-2015; СТО 8729967.004-2015). Бентизол, Курган, 2015. – 44 с.

214. Типовой проект 820-207 «Каналы оросительные с расходом воды до 100 м³/с с бетонной и железобетонной облицовкой русла». Альбом III. Разрешенные к применению типовые секции канала. Вып. 3.3. Секции каналов с креплением дна и откосов сборными плитами. Чертежи. Объемы работ / ЦИТП Госстроя СССР, Киевский филиал. – 1977. – 24 с.

215. Типовой проект 820-207 «Каналы оросительные с расходом воды до 100 м³/с с бетонной и железобетонной облицовкой русла». Альбом III. Разрешенные к применению типовые секции канала. Вып. 3.2. Секции каналов со сборной и сборно-монолитной облицовкой. Пояснительная записка / ЦИТП Госстроя СССР, Киевский филиал. – 1977. – 27 с.

216. Типовой проект 820-207 «Каналы оросительные с расходом воды до 100 м³/с с бетонной и железобетонной облицовкой русла». Альбом IV. Производство работ. Вып. 4.1. Секции каналов с монолитной бетонной облицовкой / ЦИТП Госстроя СССР, Киевский филиал. – 1977. – 24 с.

217. Ткачев, А. А. Анализ методов исследования и борьба с фильтрацией с применением глиноцементбетонного материала / А. А. Ткачев, Д. В. Прочий // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы межд. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 13–20 июля 2020. – С. 132–140.

218. Ткачев, А. А. Анализ методов исследования и борьба с фильтрацией с применением глиноцементбетонного материала / А. А. Ткачев, Д. В. Прочий // Вестник мелиоративной науки. – 2020. – № 1. – С. 32–39.

219. Ткачев, А. А. Берегоукрепительные конструкции в гидротехническом строительстве / А. А. Ткачев, В. В. Зарубин // Siberian journal of life sciences and agriculture. – 2019. – Т. 11. – № 42. – С. 58–64.

220. Ткачев, А. А. Особенности использования габионных конструкций при проведении берегоукрепительных работ в водохранилищах / А. А. Ткачев, З. А. Бегахмедов, А. И. Аржанова // Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы. Междунар. Науч.-практ. конф.: сб. ст. – 2018. – С. 44–49.

221. Фильчаков, П. Ф. Метод последовательного конформного отображения и его приложения к задачам фильтрации / П. Ф. Фильчаков // УМЖ. – 1955. – № 4. – С. 453–470.

222. Фильчаков, П. Ф. Приближенные методы конформных отображений / П. Ф. Фильчаков. – Киев: Наукова думка, 1964. – 532 с.

223. Ханов, Н. В. Обзор применения полимернобетонной композиции на основе уретановых связей в гидротехническом строительстве / Н. В. Ханов, А. В. Еремеев // Наука молодых – агропромышленному комплексу. Международ. Науч. конф. молодых ученых и специалистов: сб. ст. – 2016. – С. 221–223.

224. Ханов, Н. В. Обзор применения современных геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве / Н. В. Ханов, А. В. Еремеев // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная

150-летию РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, 2–3 июня 2015 г. – М., 2015. – С. 336–339.

225. Хевиленд, Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность / Р. Хевиленд. – М., 1966. – 232 с.

226. Чернов, М. А. Обоснование противотриационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов / М. А. Чернов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 108–114.

227. Чернов, М. А. Оценка эксплуатационной надежности конструкций бетонопленочных облицовок каналов / М. А. Чернов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 136–139.

228. Чугаев, Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета) / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергия: Ленинградское отделение, 1967. – 460 с.

229. Чумаганов, А. П. За порогом надежности эксплуатации гидротехнических сооружений, входящих в промышленные комплексы различных предприятий / А. П. Чумаганов, Ю. Я. Сирота // Гидротехника XXI век. – 2010. – № 1. – С. 46–51.

230. Штыков, В. И. О расчете размывающих скоростей при проектировании фильтрующих сооружений в связных грунтах / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 303–312.

231. Щавелев, Д. С. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства: учеб. для гидротехн. спец. вузов / Д. С. Щавелев, М. Ф. Губин, В. Л. Куперман, М. П. Федоров; под общ. ред. Д. С. Щавелева. – М.: Стройиздат, 1986. – 422 с.

232. Щедрин, В. Н. Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов. – М.: Росинформагротех, 2011. – 268 с.

233. Щедрин, В. Н. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Баев, Е. Д. Михайлов. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 282 с.

234. Щедрин, В. Н. Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / В. Н. Щедрин [и др.]; под общ. ред. В.Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 361 с.
235. Щедрин, В. Н. Ресурсы агромелиоративных систем / В. Н. Щедрин [и др.]; под ред. В. Н. Щедрина. – М.: Росинформагротех, 2021. – 312 с.
236. Щедрин, В. Н. Усовершенствованные конструкции облицовок оросительных каналов и водоемов с использованием новых противофильтрационных материалов / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник сельскохозяйственного консультирования. – 2015. – № 4. – С. 99–105.
237. Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – М.: Мелиоводинформ, 2004. – 388 с.
238. Щербина, Е. В. Геосинтетические материалы в строительстве / Е. В. Щербина. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 112 с.
239. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2017 году» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/upload/uf/842/%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017\(1\).pdf](https://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/upload/uf/842/%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017(1).pdf).
240. AbdelRazek, A. Y. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants / A. Y. AbdelRazek, R.K. Rowe // Geotextiles and geomembranes. – 2019. – Vol. 47. – Pp. 60–74. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.10.001.
241. AbdelRazek, A. Y. Interface Transmissivity of Multicomponent GCLs / A. Y. AbdelRazek, R. K. Rowe // Geotechnical Special Publication. – 2016 (273 GSP). – Pp. 719–729. DOI: 10.1061/9780784480168.070.
242. Baev, O. A Composite polymer coatings for repair of concrete linings of channels / O. A. Baev, A. Y. Garbuz, Y. M. Kosichenko // Defect and Diffusion Forum, 2021. – Vol. 410. – Pp. 799–805. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.799.
243. Baev, O. A. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect / O. A. Baev, Y. M. Kosichenko, V. F. Silchenko // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – 111 (3). Art. № 11109. DOI: 10.34910/MCE.111.9.

244. Bandurin, M. A. Technology for water economy monitoring of technical state of closed drainage of irrigation systems / M. A. Bandurin, V. A. Voloshukhin, V. V. Vanzha // International conference on construction and architecture: theory and practice of industry development. – 2018. – C. 214–218.

245. Bannour, H. Interface transmissivity measurement in multicomponent geosynthetic clay liners / H. Bannour, N. Touze-Foltz, A. Courté, K. P. Von Maubeuge // ASTM special technical publication. – 2013. – Pp. 47–61. DOI: 10.1520/STP156220120089.

246. Barroso, M. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner / M. Barroso, N. Touze-Foltz, K. P. Von Maubeuge, P. Pierson // Geotextiles and geomembranes. – 2006. – Vol. 24(3). – Pp. 139–155. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2006.01.003.

247. Bhowmik, R. Failure analysis of a geomembrane lined reservoir embankment / R. Bhowmik, J. T. Shahu, M. Datta // Geotextiles and Geomembranes. – 2018. – Vol. 46, iss. 1. – Pp. 52–65. DOI: doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.10.005.

248. Blanco, M. Behaviour of an EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir / M. Blanco, F. Castillo, N. Touze-Foltz, B. Amat [et al.] // International journal of geomate. – 2015. – Vol. 9 (1). – Pp. 1348–1352. DOI: 10.21660/2015.17.4137.

249. Blond, E. Applications of Geosynthetics to Irrigation, Drainage and Agriculture / E. Blond [et al.] // Irrigation and Drainage. – 2019. – Vol. 68, iss. 1. – Pp. 67–83. DOI: 10.1002/ird.2300.

250. Bonaparte, R. Rates of leakage through landfill liners / R. Bonaparte, J. P. Giroud, B. A. Gross // Proceedings of geosynthetics. IFAI, San Diego, California, USA, february 1989. – 1989. – Vol. 1. – Pp. 18–29.

251. Bowei, Yu. Irrigated composite liner designs for fast hydration and prevention of thermal desiccation of geosynthetic clay liners / Yu. Bowei, E-Z. Abbas // Geotextiles and Geomembranes. – 2020. – Vol. 48, iss. 6. – Pp. 950–961. DOI: doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.08.004.

252. Brachman, R. W. I. Reductions in GCL overlap beneath an exposed geomembrane / R. W. I. Brachman, R. K. Rowe, W. Andy Tak // Journal of geotech-

nical and geoenvironmental engineering. – 2018. – Vol. 144(12). – Art. No. 04018094. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001985.

253. Cazzuffi, D. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams / D. Cazzuffi, D. Gioffre // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2020. – Vol. 48, iss. 2. – Pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.11.015.

254. Cen, W. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control / W. Cen, H. He, D. Li // *Advances in science and technology of water resources*. – 2017. – Vol. 37. – No. 3. – Pp. 61–65.

255. Cen, W. J. Experimental investigations and constitutive modeling of cyclic interface shearing between HDPE geomembrane and sandy gravel / W. J. Cen [et al.] // *Geotextiles and geomembranes*. – 2019. – Vol. 47 (2). – Pp. 269–279. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.12.013.

256. Cen, W. J. Impact of underliner on the local deformation of HDPE geomembranes / W. J. Cen, X. H. Du, H. Wang, J. Yan [et al.] // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2021. – Vol. 147, iss. 6. – Art. No. 06021004. DOI: 10.1061 / (ASCE) GT.1943-5606.0002533.

257. Comer, A. Remediation of existing canal linings // A. Comer, M. Kube, K. Sayer // *Geotextiles and Geomembranes*. – 1996. – Vol.14, iss. 5–6. – Pp. 313–325. DOI: 10.1016/0266-1144(96)00019-2.

258. Davey, C. J. N. Introduction of geomembranes for seepage control from irrigation canals in Pakistan: The Fordwah-Eastern Sadiqia (South) Canal Lining Project / C. J. N. Davey, M. A. Majeed Bhatti // *ICID Journal*. – 1998. – Vol. 47, iss. 2. – Pp. 59–76.

259. Davila, L. I. Study of flow through mechanical damages in PVC geomembranes under high hydraulic heads / L. I. Davila, E. M. Palmeira // *10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014*. Berlin, 21–25 September 2014. ISBN: 978-398139539-6.

260. DIN EN ISO 13433-2006 Geosynthetics – Dynamic perforation test (cone drop test) (ISO 13433:2006). Геосинтетические материалы. Испытания перфорации при динамической нагрузке [Electronic resource]. October. 1, 2006. URL: <https://gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4058771> (date of access: 27.05.2021).

261. Eldesouky, H. M. G. Viscoplastic modelling of HDPE geomembrane local stresses and strains / H. M. G. Eldesouky, R. W. I. Brachman // *Geotextiles and geomembranes*. – 2020. – Vol. 48 (1). – Pp. 41–51. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.103503.

262. Fox, P. J. Geomembrane damage due to static and cyclic shearing over compacted gravelly sand / P. J. Fox, J. D. Ross, J. M. Sura, R. S. Thiel // *Geosynthetics international*. – 2011. – Vol. 18(5). – Pp. 272–279. DOI: 10.1680/gein.2011.18.5.272.

263. Giroud, J. P. Evaluation of the rate of leakage through composite liners / J. P. Giroud, A. Khatami, K. Badu-Tweneboah // *Geotextiles and geomembranes*. – 1989. – Vol. 8, No. 4. – Pp. 337–340.

264. Giroud, J. P. Hydrated area of a bentonite layer encapsulated between two geomembranes / J. P. Giroud, R. S. Thiel, E. Kavazanjian // *Geosynthetics international*. – 2004. – Vol. 11. – Pp. 330–354. DOI: 10.1680/gein.11.4.330.51769.

265. Giroud, J. P. Liquid migration in an encapsulated bentonite layer due to geomembrane defects / J. P. Giroud, D. E. Daniel // *Geosynthetics international*. – 2004. – Vol. 11, iss. 4. – Pp. 311–329.

266. Giroud, J. P. Theoretical analysis of geomembrane puncture / J. P. Giroud, K. Badu-Tweneboah, K. L. Soderman // *Geosynthetics international*. – 1995. – Vol. 2, iss. 6. – Pp. 1019–1048.

267. GRI GM13 Test methods. Test properties and testing frequency for high density polyethylene smooth and textured geomembranes. – 2016. – 11 p.

268. GRI GM17 Test methods. Test properties and testing frequency for linear low density polyethylene smooth and textured geomembranes». – 2016. – 11 p.

269. Han, X. A fully coupled three-dimensional numerical model for estimating canal seepage with cracks and holes in canal lining damage / X. Han [et al.] // *Journal of hydrology*. – 2021. – Vol. 597. – Art. No. 126094. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126094.

270. Han, X. An experimental study on concrete and geomembrane lining effects on canal seepage in arid agricultural areas / X. Han, X. Wang, Y. Zhu, J. Huang [et al.] // *Water (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 12(9). – Art. No. 3410. DOI: 10.3390/W12092343.

271. Hanna, R. Novel geocomposite liner system for the irrigation channels and waterways / R. Hanna, B. Bennet, J. Scheirs // 9th International Conference on Geosynthetics – Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010. – 2010. Pp. 1345–1350.

272. Hsuan, Y. G. Aging of geomembranes used in hydraulic structures / Y. G. Hsuan, R. M. Koerner // Geosynthetics research and development in progress. conference information geo-frontiers congress January 24–26, 2005. – 2005. – Pp. 1–7. DOI: 10.1061/40782(161)40.

273. ICOLD. Rehabilitation of dams and appurtenant works-stat of the art and case histories. Appendix 1. Classification of reported failures. – Paris, 2001. – 119 p.

274. International standard. Geosynthetics – part 1: terms and definitions. ISO 10318. – Введ. 2015-04-01. – 8 с.

275. ISO 10319-2015 Geosynthetics – Wide-width tensile test. Материалы геосинтетические. Испытание на растяжение с применением широкой полосы [Electronic resource]. May. 15, 2015. URL: <https://gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6098112> (date of acces: 27.05.2021).

276. Iyer, A. Haryana canal lining-cost benefit analysis of geocomposite system adopted for multiple functions-a case study / A. Iyer, R. Mahajan, M. Korulla // GA 2012 – 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for Sustainable Adaptation to Climate Change, 2012. Bangkok, 13–16 December 2012. – id 110914. – Pp. 917–921.

277. Johnson, W. Polymeric geosynthetic barriers promote irrigation canal efficiency and installation options / W. Johnson // Restoring Our Natural Habitat – Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress. – 2007. – 10 p. DOI: 10.1061/40927(243)230.

278. Kapadia, V. P. Geosynthetics in irrigation canals in swelling soils of Gujarat, India: A case study / V. P. Kapadia // 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018. – 2018. – Vol. 1. – Pp. 16–23.

279. Koerner, G. R. The durability of exposed geomembrane covers / G. R. Koerner, R. M. Koerner // Geotechnical special publication. – 2017. – Vol. 276. – Pp. 139–147. DOI: 10.1061/9780784480434.014.

280. Koerner, R. M. Exposed geomembrane geosynthetic clay liner composites for solid waste covers, liquid Impoundment liners, and canal liners / R. M. Koerner, G. R. Koerner, Y. Hsuan // Geotechnical special publication. – 2016. – Vol. 274. – Pp. 22–35. DOI: 10.1061/9780784480175.002.

281. Koerner, R. M. Lifetime predictions of eposed geotextiles and geomembranes / R. M. Koerner, Y. G. Hsuan, G. R. Koerner // Geosynthetics international. – 2017. – Vol. 24 (2). – Pp. 198–212. DOI:10.1680/jgein.16.00026.

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

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

284. Kosichenko, Y. M., Baev O. A., Vasilyev S. M. Geo-composite drainage material for hydro-technical and civil engineering / Y. M. Kosichenko, // Solid state phenomena. – 2021. – Vol. 316. – Pp. 1025–1030. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1025.

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

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

287. Li, T. A. preliminary study of the self-healing of a fully penetrating hole in GCLs on full hydration / T. Li, R. K. Rowe // Geotechnical special publication. – 2017. – Pp. 278–287. DOI: 10.1061/9780784480472.030.

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

289. Morgado, F. Portuguese irrigation canals: Lining solutions, anomalies, and rehabilitation / F. Morgado, G. J. Lopes, J. De Brito, J. Feiteira // Journal of Perfor-

mance of Constructed Facilities. – 2012. – Vol. 26, iss. 4. – Pp. 507–515. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000230.

290. Newman, E. J. Thirty-year durability of a 20-mil PVC geomembrane / E. J. Newman, T. D. Stark, F. P. Rohe, P. Diebel // *Journal of Vinyl and Additive Technology*. – 2004. – Vol. 10, iss. 4. – Pp. 168–173. DOI: 10.1002/vnl.20025.

291. Plusquellec, H. Experience with geosynthetics in canal irrigation projects supported by the world bank / H. Plusquellec // *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018*. – 2018. – Vol. 4. – id 166341. – Pp. 2748–2754. ISBN: 978-171380608-0.

292. Poulain, D. Feedback and guidelines for geomembrane lining systems of mountain reservoirs in France / D. Poulain, L. Peyras, P. Meriaux // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2011. – Vol. 29, iss. 4. – Pp. 415–424. DOI: doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.12.002.

293. Prabakaran, P. A. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geosynthetic material, cement mortar and material lining / P. A. Prabakaran, G. L. Sathyamoorthy, M. Adhimayan // *International journal of recent technology and engineering*. – 2019. – Vol. 7. – No 4. – Pp. 81–83.

294. Rahimi, H. Failure of concrete canal lining on fine sandy soils: A case study for the Saveh project / H. Rahimi, N. Abbasi // *Irrigation and Drainage*. – 2008. – Vol. 57, iss. 1. – Pp. 83–92. DOI: 10.1002/ird.350.

295. Rowe, R. K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste / R. K. Rowe // *Keynote paper, proceedings of the sixth international conference on geosynthetics*. IFAI, Atlanta, Georgia, USA, march 1998. – 1998. – Vol. 1. – Pp. 27–103.

296. Rowe, R. K. Insight into hydraulic conductivity testing of geosynthetic clay liners (GCLs) exhumed after 5 and 7 years in a cover / R. K. Rowe [et al.] // *Canadian geotechnical journal*. – 2017. – Vol. 54 (8). – Pp. 1118–1138. DOI: 10.1139/cgj-2016-0473.

297. Sainov, M. P. Workability of high rockfill dam with a polymer face / M. P. Sainov, A. O. Zverev // *Magazine of civil engineering*. – 2017. – No. 7. – Pp. 76–83. DOI: 10.18720/MCE.75.7.

298. Scalia, IV. J. Long-term hydraulic conductivity of a bentonite-polymer composite permeated with aggressive inorganic solutions / IV. J. Scalia [et al.] // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2014. – Vol. 140(3). – Art. No. 04013025. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001040.

299. Scuro, A. M. Geomembrane experience on dams and canals in South East Asia / A. M. Scuro, G. L. Vaschetti // *International journal on hydropower and dams*. – 2006. – Vol. 13(5). – Pp. 141–147.

300. Scuro, A. M. Rehabilitation of canals with watertight geomembranes, in the dry and underwater / A. M. Scuro, G. L. Vaschetti // *Sustainable civil infrastructures. 2nd geomeast international congress and exhibition on sustainable civil infrastructures, Egypt 2018 – The official international congress of the soil-structure interaction group in Egypt, SSIGE 2018, 24 November 2018*. – 2019. – Pp. 59–76. DOI: 10.1007/978-3-030-01944-0_6.

301. Sembenelli, P. Geosynthetic system for the facing of bovilla dam / P. Sembenelli, G. Sembenelli, A. M. Scuro // *Proceedings, sixth international conference on geosynthetics*. – 1998. – Vol. 2. – Pp. 1099–1106.

302. Shehzad, T. Performance Evaluation of Sodium Bentonite Material for Seepage Control in Irrigation Channels / T. Shehzad, M. Yaseen, M. Afzal, K. Khan [et al.] // *Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan*. – 2017. – Vol. 22. – Art. No. 1. Pp. 2–7.

303. Shu, Y.-M. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China / Y.-M. Shu, H.-M. Wu, X.-Z. Jiang // *Yantu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol. 38. – Pp. 1–9. DOI: 10.11779/CJGE2016S1001.

304. Sinmez, B. Geosynthetic barrier systems used in dams, ponds, and reservoirs of Turkey / B. Sinmez, S. Demirdogen // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2022. – Vol. 7, iss. 1. – Art. No. 27. DOI: 10.1007/s41062-021-00632-8.

305. Snell, M. Lining old irrigation canals: Thoughts and trials / M. Snell // *Irrigation and Drainage*. – 2001. – Vol. 50, iss. 2. – Pp. 139–157. DOI: 10.1002/ird.13.

306. Stoltz, G. Assessment of long term water flow capacity of geocomposites / G. Stoltz [et al.] // 11th International Conference on geosynthetics 2018, ICG 2018. – 2018. – Vol. 3. – Pp. 2202–2209.

307. Take, W. A. Observations of bentonite erosion from solar-driven moisture migration in GCLs covered only by a black geomembrane / W. A. Take, R. W. I. Brachman, R. K. Rowe // Geosynthetics international. – 2015. Vol. 22 (1). – Pp. 78–92. DOI: 10.1680/gein.14.00033.

308. Tian, K. Polymer elution and hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners / K. Tian, W. J. Likos, C. H. Benson / Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2019. – Vol. 145 (10). – Art. No. 04019071. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002097.

309. Touze-Foltz, N. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects / N. Touze-Foltz, J.P. Giroud // Geosynthetics international. – 2003. – Vol. 10. – Pp. 215–233. DOI: 10.1680/gein.10.6.215.37243.

310. Touze-Foltz, N. Large scale tests for the evaluation of composite liners hydraulic performance / N. Touze-Foltz // A preliminary study. Proceedings of the seventh international waste management and landfill symposium. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy. October 1999. – 1999. Vol. 3. – Pp. 157–164.

311. Touze-Foltz, N. Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems / N. Touze-Foltz, R. K. Rowe, C. Duquennoi // Geosynthetics international. 1999. – Vol. 6, No. 6. – Pp. 455–479. DOI: 10.1680/gein.6.0160.

312. Vasilyev, S. M. New types of geo-composite materials for anti-filtration systems / S. M. Vasilyev, Y. M. Kosichenko, O. A. Baev // Solid state phenomena, 2021. 6th International conference on industrial engineering, ICIE. – 2021. – Vol. 316. – Pp. 1031–1037. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1031.

313. Yu, B. Effect of added polymer on the desiccation and healing of a geosynthetic clay liner subject to thermal gradients / B. Yu, A. El-Zein, R. K. Rowe // Geotextiles and geomembranes. – 2020. – Vol. 48(6). – Pp. 928–939. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2020.08.001.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Копии патентов на изобретения и свидетельств
на программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2579482

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЙ
ЭКРАН**

Патентообладатель(ли): *Баев Олег Андреевич (RU)*

Автор(ы): *Баев Олег Андреевич (RU)*


Заявка № 2014142662

Приоритет изобретения 22 октября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 10 марта 2016 г.

Срок действия патента истекает 22 октября 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иванев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2644952

**БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНОЕ И
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ**

Патентообладатель: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Автор: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Заявка № 2017118308

Приоритет изобретения 25 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 15 февраля 2018 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 25 мая 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2662187

**СПОСОБ И УСТРОЙСТВО СОЗДАНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ**

Патентообладатель: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Автор: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Заявка № 2017117983

Приоритет изобретения 23 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 мая 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2762413

СПОСОБ ДРЕНИРОВАНИЯ ОБЛИЦОВКИ КАНАЛА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации" (ФГБНУ "РосНИИПМ") (RU)*

Авторы: *Косиченко Юрий Михайлович (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Чураев Александр Анатольевич (RU)*

Заявка № 2020137948

Приоритет изобретения 18 ноября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 18 ноября 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2616801

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ

Патентообладатель: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Автор: *Баев Олег Андреевич (RU)*

Заявка № 2016112250

Приоритет изобретения 31 марта 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 31 марта 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019660670

**Программа расчета водопроницаемости и надежности
облицовки из геомембраны с защитным покрытием из
грунта**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Российский научно-исследовательский институт
проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ») (RU)*

Авторы: *Щедрин Вячеслав Николаевич (RU), Косиченко Юрий
Михайлович (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Гарбуз Александр
Юрьевич (RU)*

Заявка № 2019619740

Дата поступления 05 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 августа 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019619394

**Программа расчета водопроницаемости и надежности
облицовки из геомембраны с защитным покрытием из
бетона**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Российский научно-исследовательский институт
проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ») (RU)*

Авторы: *Щедрин Вячеслав Николаевич (RU), Косиченко Юрий
Михайлович (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Гарбуз Александр
Юрьевич (RU)*

Заявка № **2019618037**

Дата поступления **02 июля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 июля 2019 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 *Г.П. Ильев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019660671

**Программа расчета эффективности
противофильтрационных покрытий из бентонитовых матов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ») (RU)*

Авторы: *Щедрин Вячеслав Николаевич (RU), Косиченко Юрий Михайлович (RU), Баев Олег Андреевич (RU), Гарбуз Александр Юрьевич (RU)*

Заявка № 2019619741

Дата поступления 05 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 августа 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020610563

**Программа выбора оптимального варианта
противофильтрационной облицовки**

Правообладатель: *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), Сильченко Виктория Федоровна (RU), Гарбуз Александр Юрьевич (RU)*

Заявка № **2019667389**

Дата поступления **26 декабря 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 января 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



Приложение Б

Акты внедрения результатов исследований



УТВЕРЖДАЮ

Директор Сальского филиала ФГБУ
«Управление «Ростовмелиоводхоз»

В. И. Сопельняк В. И. Сопельняк

« 11 » мая 2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим подтверждаю, что результаты работы:

Конструкция противофильтрационного экрана из геосинтетического материала

(наименование работы)

сроки внедрения 2018–2019 гг.

(сроки выполнения)

внедрены Сальским филиалом ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»

(наименование организации)

1. Вид внедренных результатов: Конструкция противофильтрационного экрана

(наименование мероприятия)

2. Характеристика масштабов внедрения: единичное

(уникальное, единичное, массовое, серийное)

3. Форма внедрения:

Внедрение в проектную практику реконструкции участка оросительного канала Манычской оросительной системы, протяженностью 3,0 км

(методика)

4. Новизна внедряемого мероприятия заключается в использовании противофильтрационного экрана, характеризующегося повышенной водонепроницаемостью и долговечностью, с прогнозным сроком службы от 50 до 60 лет. Применение конструкции противофильтрационного экрана с использованием геосинтетических материалов позволит снизить потери воды на фильтрацию, а также создать более благоприятную экологическую обстановку за счет исключения подтопления приканальных территорий.

5. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения конструкции противофильтрационного экрана составит – 201135 руб. Расчет экономического эффекта прилагается (приложение 1).

Представитель автора/патентообладателя:
Ст. науч. сотр. ФГБНУ «РосНИИПМ»

О. А. Баев
Баев О. А.



УТВЕРЖДАЮ

 Директор Сальского филиала ФГБУ
 «Управление «Ростовмелиоводхоз»


 В. И. Сопельняк

« 11 » мая 2018 г.

РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения

Внедряемое мероприятие: Конструкция противофильтрационного экрана из геосинтетического материала

Базовый вариант: Противофильтрационный экран из суглинка

Объект внедрения: Проект реконструкции оросительного канала Маньчской оросительной системы.

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 ³ /с	17,5	20,0	25,0
Длина канала	L_k	км	3,0	3,0	3,0
КПД канала	η	–	0,73	0,90	0,95
Стоимость экрана из суглинка	$K_{обл}$	руб./м ²	–	340	620
Прибавка урожайности при орошении яровой пшеницы	$U_{пр}$	ц/га	–	–	10,2
Реализационная цена продукции (яровой пшеницы)	$Ц$	руб./кг	–	–	7,3
Оросительная норма при поливе яровой пшеницы	M	м ³ /га	–	–	3200
Время оросительного сезона	$T_{ор}$	с	–	–	$5 \cdot 2,59 \cdot 10^6$
Срок службы экрана	T	лет	–	25	75
Нормативный срок службы экрана	$T_{нор}$	лет	–	50	50
Осредненный коэффициент фильтрации экрана	$K'_{обл}$	см/с	–	10^{-6}	10^{-8}
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м ²	–	10500	10500
Глубина воды в канале	h_0	м	1,7	1,7	1,7
Толщина облицовки	δ_0	м	–	0,5	0,3

Расчеты приведенных затрат по базовому и внедряемому мероприятиям приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет затрат по базовому варианту 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 ²	$C_1=0,05 \cdot 340=17,0$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	C_2	руб/м ²	$C_2=0,05 \cdot 620=31,0$
Капитальные затраты по базовому варианту (экран из суглинка)	K_1	руб/м ²	340
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию (комбинированный экран с геомембраной и 2-я слоями геотекстиля)	K_2	руб/м ²	620
Нормативный коэффициент эффективности	E_n	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n K_1$	Z_1	руб/м ²	$Z_1=17,0+0,15 \cdot 340=68,0$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n K_2$	Z_2	руб/м ²	$Z_2=31,0+0,15 \cdot 620=124,0$
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 $T_1=25$ лет; $T_2=75$ лет; $T_{\text{норм}}=50$ лет	φ	–	$\varphi = \frac{25 / 50 + 0,15}{75 / 50 + 0,15} = 0,394$

Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедряемой конструкции по сравнению с базовым вариантом выполняется по формуле:

$$\mathcal{E}_r = [(Z_1 - \varphi \cdot Z_2) \cdot (F_{\text{обл}} / L_k) + \text{ЧД}] \cdot L_k,$$

где \mathcal{E}_r – годовой ожидаемый экономический эффект, руб.;

$Z_1 = C_1 + E_n \cdot K_1$ – приведенные затраты по базовому варианту, руб./м²;

L_k – длина канала, км; $Z_2 = C_2 + E_n \cdot K_2$ – приведенные затраты по внедряемому мероприятию руб./м²;

$\varphi = \frac{T_1 / T_{\text{норм}} + E_n}{T_2 / T_{\text{норм}} + E_n}$ – коэффициент, учитывающий изменение срока службы экрана; T_1, T_2 – срок службы базового и внедряемого мероприятия, лет; $T_{\text{норм}}$ – нормативный срок службы, лет; C_1, C_2 – ежегодные издержки (эксплуатационные затраты) по базовому и внедряемому варианту, руб./м²;

K_1, K_2 – капитальные вложения по базовому варианту и внедряемому мероприятию, руб./м²; E_n – нормативный коэффициент эффективности; $F_{\text{обл}}$ – площадь экрана участка канала, м²; ЧД – чистый доход от уменьшения потерь

на фильтрацию и орошения дополнительной площади при внедряемом мероприятии, руб./км.

Расчеты чистого дохода от орошения дополнительной площади при поливе яровой пшеницы по внедряемому мероприятию приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет чистого дохода от орошения дополнительной площади по внедряемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. изм.	Расчет показателей
Снижение коэффициента фильтрации облицовки за счет внедряемого мероприятия	$\Delta k_{\text{обл}}$	м/сут.	$\Delta k_{\text{обл}} = (10^{-6} - 10^{-8}) \cdot 86,4 = 0,0000864$
Снижение расхода на фильтрацию от внедряемого мероприятия $Q_{\text{доп}} = \Delta k'_{\text{обл}} \cdot \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}$	$\Delta Q_{\text{фит}}$	м ³ /с	$\Delta Q_{\text{фит}} = 0,0000864 \cdot \frac{1,7 + 0,3}{0,3} = 0,00058$
Дополнительный объем экономленной воды от снижения потерь на фильтрацию $W = \Delta Q_{\text{фит}} \cdot T_{\text{ор}}$	$W_{\text{фит}}$	м ³	$W_{\text{фит}} = 0,00058 \cdot 5 \cdot 2,59 \cdot 10^6 = 0,0074 \cdot 10^6$
Дополнительная площадь орошения от снижения потерь на фильтрацию $F_{\text{ор}} = \frac{W \cdot \eta}{M}$	$F_{\text{ор}}$	га	$F_{\text{ор}} = \frac{0,0074 \cdot 10^6 \cdot 0,95}{3200} = 2,19$
Чистый доход от орошения дополнительной площади при увеличении КПД канала $ЧД = \frac{F_{\text{ор}} \cdot U_{\text{гр}} \cdot Ц}{L_{\text{к}}}$	ЧД	млн. руб./км	$ЧД = \frac{2,19 \cdot 10,2 \cdot 7,3}{3,0} = 0,000041$

Подставляя найденные значения приведенных затрат и чистого дохода из таблиц 2 и 3 в расчетную формулу ожидаемый годовой экономический эффект от использования конструкции противofiltrационного экрана из геосинтетического материала на участке оросительного канала составит:

$$\mathcal{E}_r = [(68 - 124 \cdot 0,394) \cdot (10500 / 3) + 0,000041 \cdot 10^6] \cdot 3 = 201135 \text{ руб.}$$

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования внедряемого мероприятия в проекте реконструкции участка оросительного канала Манычской мелиоративной системы составит 201135 руб.

Представитель автора/патентообладателя:
Ст. науч. сотр. ФГБНУ «РосНИИПМ»


Баев О. А.

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ФГБУ «Управление
«Ростовмелиоводхоз»



В. А. Назаренко

« 6 » апреля 2020 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Настоящим подтверждаю, что результаты работы:

Конструкция противofильтрационного экрана (по авторскому патенту на
изобретение № 2579482 «Комбинированный противofильтрационный экран»)
(наименование работы)

проводимой с 22 октября 2019 г. по 18 февраля 2020 г.

(сроки выполнения)

внедрены ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»

(наименование организации)

1. Вид внедренных результатов: Конструкция комбинированного противofильтрационного экрана

(наименование мероприятия)

2. Характеристика масштабов внедрения: единичное

(уникальное, единичное, массовое, серийное)

3. Форма внедрения:

Внедрение в проект реконструкции оросительной системы на участке канала
протяженностью 4,0 км, расходом 15 м³/с

(методика)

4. Новизна внедряемого мероприятия заключается в использовании новой
конструкции комбинированного противofильтрационного экрана повышенной
надежности, водонепроницаемости и долговечности, с прогнозным сро-
ком службы до 75 лет. Применение конструкции комбинированного противofильтрационного экрана с использованием геосинтетических бентонитовых материалов позволит значительно экономить водные ресурсы (за счет исключения интенсивной фильтрации на наиболее опасных участках каналов) при их транспортировке от водозабора до орошаемых участков.

5. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения конструк-
ции комбинированного противofильтрационного экрана составит –
698 000 руб. Расчет экономического эффекта прилагается (приложение 1).

От автора/ патентообладателя

От ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»

Начальник отдела:

Баев О. А.

В. М. Попов

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ФГБУ «Управление
«Ростовмелиоводхоз»



В. А. Назаренко

6 апреля 2020 г.

РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов
научно-исследовательской работы

Внедряемое мероприятие: Конструкция противодиффузионного экрана (по патенту на изобретение РФ № 2579482).

Базовый вариант: Противодиффузионный экран из суглинка

Объект внедрения: Проект реконструкции оросительной системы.

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 ³ /с	15,0	20,0	25,0
Длина канала	L_k	км	4,0	4,0	4,0
КПД канала	η	–	0,70	0,90	0,95
Стоимость экрана из суглинка	$K_{обл}$	руб./м ²	–	340	620
Прибавка урожайности при орошении яровой пшеницы	$Y_{пр}$	ц/га	–	–	10,2
Реализационная цена продукции (яровой пшеницы)	$Ц$	руб./кг	–	–	7,3
Оросительная норма при поливе яровой пшеницы	M	м ³ /га	–	–	3200
Время оросительного сезона	$T_{ор}$	с	–	–	$5 \cdot 2,59 \cdot 10^6$
Срок службы экрана	T	лет	–	25	75
Нормативный срок службы экрана	$T_{нор}$	лет	–	50	50
Осредненный коэффициент фильтрации экрана	$K'_{обл}$	см/с	–	10^{-6}	10^{-8}
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м ²	–	36400	36400
Глубина воды в канале	h_0	м	1,8	1,8	1,8
Толщина облицовки	δ_0	м	–	0,5	0,3

Расчеты приведенных затрат по базовому и внедряемому мероприятиям приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет затрат по базовому варианту 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 ²	$C_1=0,05 \cdot 340=17,0$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	C_2	руб/м ²	$C_2=0,05 \cdot 620=31,0$
Капитальные затраты по базовому варианту (экран из суглинка)	K_1	руб/м ²	340
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию (комбинированный экран с геомембраной и 2-я слоями геотекстиля)	K_2	руб/м ²	620
Нормативный коэффициент эффективности	E_n	–	$E_n=0,15$
Приведенные затраты по базовому варианту $Z_1=C_1+E_n K_1$	Z_1	руб/м ²	$Z_1=17,0+0,15 \cdot 340=68,0$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n K_2$	Z_2	руб/м ²	$Z_2=31,0+0,15 \cdot 620=124,0$
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 $T_1=25$ лет; $T_2=75$ лет; $T_{\text{норм}}=50$ лет	φ	–	$\varphi = \frac{25/50 + 0,15}{75/50 + 0,15} = 0,394$

Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедряемого мероприятия по сравнению с базовым вариантом выполняется по формуле:

$$\Delta_{\Gamma} = [(Z_1 - \varphi \cdot Z_2) \cdot (F_{\text{обл}} / L_{\text{к}}) + \text{ЧД}] \cdot L_{\text{к}}, \quad (1)$$

где Δ_{Γ} – годовой ожидаемый экономический эффект, руб.; $Z_1 = C_1 + E_n \cdot K_1$ – приведенные затраты по базовому варианту, руб./м²; $L_{\text{к}}$ – длина оросительного канала, км; $Z_2 = C_2 + E_n \cdot K_2$ – приведенные затраты по внедряемому мероприятию руб./м²; $\varphi = \frac{T_1 / T_{\text{норм}} + E_n}{T_2 / T_{\text{норм}} + E_n}$ – коэффициент учитывающий изменение срока службы экрана; T_1, T_2 – срок службы базового и внедряемого мероприятия, лет; $T_{\text{норм}}$ – нормативный срок службы, лет; C_1, C_2 – ежегодные издержки (эксплуатационные затраты) по базовому варианту и внедряемому мероприятию, руб./м²; K_1, K_2 – капитальные вложения по базовому варианту и внедряемому мероприятию, руб./м²; E_n – нормативный коэффициент эффективности; $F_{\text{обл}}$ – площадь экрана участка канала, м²; ЧД – чистый доход от умень-

шения потерь на фильтрацию и орошения дополнительной площади при внедряемом мероприятии, руб./км.

Расчеты чистого дохода от орошения дополнительной площади при поливе яровой пшеницы по внедряемому мероприятию приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет чистого дохода от орошения дополнительной площади по внедряемому мероприятию

Показатели и расчетные формулы	Обозначения	Ед. изм.	Расчет показателей
Снижение коэффициента фильтрации облицовки за счет внедряемого мероприятия	$\Delta k_{\text{обл}}$	м/сут.	$\Delta k_{\text{обл}} = (10^{-6} - 10^{-8}) \cdot 86,4 = 0,0000864$
Снижение расхода на фильтрацию от внедряемого мероприятия $Q_{\text{доп}} = \Delta k'_{\text{обл}} \cdot \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}$	$\Delta Q_{\text{фил}}$	м ³ /с	$\Delta Q_{\text{фил}} = 0,0000864 \cdot \frac{1,8 + 0,3}{0,3} = 0,0042$
Дополнительный объем экономленной воды от снижения потерь на фильтрацию $W = \Delta Q_{\text{фил}} \cdot T_{\text{ор}}$	$W_{\text{фил}}$	м ³	$W_{\text{фил}} = 0,0042 \cdot 5 \cdot 2,59 \cdot 10^6 = 0,053 \cdot 10^6$
Дополнительная площадь орошения от снижения потерь на фильтрацию $F_{\text{ор}} = \frac{W \cdot \eta}{M}$	$F_{\text{ор}}$	га	$F_{\text{ор}} = \frac{0,053 \cdot 10^6 \cdot 0,95}{3200} = 15,7$
Чистый доход от орошения дополнительной площади при увеличении КПД канала $ЧД = \frac{F_{\text{ор}} \cdot Y_{\text{пр}} \cdot Ц}{L_{\text{к}}}$	ЧД	млн. руб./км	$ЧД = \frac{15,7 \cdot 10,2 \cdot 7,3}{4,0} = 0,00029$

Подставляя найденные значения приведенных затрат и чистого дохода из таблиц 2 и 3 в расчетную формулу (1), ожидаемый годовой экономический эффект от использования комбинированной конструкции противифльтрационного экрана на участке канала составит:

$$\mathcal{E}_r = [(68 - 124 \cdot 0,394) \cdot (36400 / 4) + 0,00029] \cdot 4 = 689000 \text{ руб.}$$

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования в проекте реконструкции участка оросительной системы внедряемого мероприятия (конструкции ПФЭ по патенту на изобретение РФ № 2579482) составит 698 000 руб.

От автора / патентообладателя:

 Баев О. А.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Волгодонскводстрой»



Зарубин В. П.

2018

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

1. Сведения о внедрении: Патент на изобретение Российской Федерации № 2579482 «Комбинированный противофильтрационный экран». Заявитель и патентообладатель Баев О. А.

2. Новизна внедряемого изобретения: Состоит, в том, что применение конструкции комбинированного противофильтрационного экрана из геокомпозитных материалов позволит предотвратить загрязнение грунтовых вод фильтратом из накопителей отходов, а также создать более благоприятную экологическую обстановку на оросительных каналах и водоемах за счет исключения фильтрации. Разработанная конструкция комбинированного экрана позволит обеспечить высокий противофильтрационный эффект и значительный срок службы за счет применения современных строительных материалов (геосинтетических и геокомпозитных). Прогнозный срок службы комбинированного противофильтрационного экрана составляет 75-100 лет, с коэффициентом фильтрации $10^{-10} - 10^{-12}$ см/с.

3. Срок ожидаемого внедрения: 2018-2019 годы.

4. Объекты внедрения: Внедрение в проектную практику строительства и реконструкции, выполняемой ООО «Волгодонскводстрой»

5. Ожидаемый экономический эффект от внедрения: Составит – 916560,0 руб.

Разработчик и
патентообладатель

 Баев О. А.

УТВЕРЖДАЮ

Зам. технического директора

ОАО «Севкавтипроект»

Дуэль М. Б.

2016 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских работ

1. Сведения о внедрении: Конструкция многослойного противофильтрационного экрана (по патенту на изобретение РФ № 2579482 «Комбинированный противофильтрационный экран»).

2. Ожидаемый эффект от внедрения. Заключается в том, что разработанная конструкция комбинированного противофильтрационного экрана будет обеспечивать высокие противофильтрационные свойства, что позволит снизить потери воды на фильтрацию, исключить подтопление и вторичное засоление приканальных территорий. Сэкономленные водные ресурсы за счет уменьшения фильтрационных потерь будут использованы для полива дополнительных угодий и подачи воды на обводнение мало-водных водотоков.

Разработанное конструктивное решение в виде противофильтрационного экрана характеризуется повышенным сроком службы, большей гибкостью и деформативной способностью. Практическая новизна конструкции подтверждается патентом на изобретение РФ № 2579482.

3. Срок внедрения: 2016–2017 гг.

4. Объекты внедрения: Внедрение в проектную практику строительства, реконструкции и модернизации оросительных каналов и других ГТС мелиоративного назначения.

Представитель автора /
патентообладателя

Баев О. А.



ООО «БентИзол»
641321, РФ, Курганская обл., Кетовский район,
п. Введенское, ул. Промышленная, 14.
Тел/факс + 7 (35 231) 37-233,
bentizol@bentizol.ru
www.bentizol.ru

Акт внедрения

Настоящим подтверждаю, что разработанные Баевым Олегом Андреевичем конструкции противофильтрационных экранов из геосинтетических материалов внедрены в проекты реконструкции оросительных каналов и водоемов, а также накопителей промышленных отходов.

По результатам проведения дополнительных испытаний, выполненных в ООО «БентИзол» было установлено, что внедрение разработанных Баевым О. А. конструктивных решений противофильтрационных покрытий и способов их создания позволит предотвратить негативное воздействие вод на оросительных каналах мелиоративных систем за счет исключения фильтрационных процессов, а также создать более благоприятную экологическую обстановку на накопителях отходов. Применение разработанных конструкций (вариантов) с применением геосинтетических материалов (в том числе бентонитовых) и научно-обоснованных защитных и пригрузочных слоев, выполненных в составе конструкций, позволит обеспечить высокий противофильтрационный эффект с коэффициентом фильтрации в пределах $1 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-12}$ см/с и сроком службы противофильтрационного экрана от 75 до 100 лет.


Внедрение осуществлено в период с 2018 по 2020 гг.

Генеральный директор
ООО «БентИзол»



Яковлев В. А.
10 августа 2020 г.

СОГЛАСОВАНО

Врио директора ФГБНУ «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 противоточных мероприятий на оросительных каналах и выбор наиболее эффективных типов противоточных 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 ФГБНУ «РосНИИПМ»
Разработчики:
 Ю. М. Косиченко
 О. А. Баев
 А. Ю. Гарбуз
От ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз»
Начальник отдела:
 В. М. Попов

Приложение 1
УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ФГБУ «Управление
«Ростовмелиоводхоз»



В. А. Назаренко

« 20 » декабря 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 ³ /с	6,0	6,5	6,5
Длина канала	L_k	км	2,5	2,5	2,5
КПД канала	η	–	0,83	0,87	0,90
Стоимость Бетонной облицовки	$K_{обл}$	руб./м ²	–	1128,0	1362,0
Площадь облицовки (экрана)	$F_{обл}$	м ²	–	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Срок службы экрана	T	лет	–	30	65
Продление срока службы	ΔT	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 ²	$C_1=0,05 \cdot 1128,0=56,4$
Эксплуатационные затраты по внедряемому мероприятию $C_2=0,05 \cdot K_2$	C_2	руб./м ²	$C_2=0,05 \cdot 1362,0=68,1$
Капитальные затраты по базовому варианту	K_1	руб./м ²	1128,0
Капитальные затраты по внедряемому мероприятию	K_2	руб./м ²	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 ²	$Z_1=56,4+0,15 \cdot 1128,0=225,6$
Приведенные затраты по внедряемому мероприятию $Z_2=C_2+E_n \cdot K_2$	Z_2	руб./м ²	$Z_2=68,1+0,15 \cdot 1362,0=272,4$
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	φ	–	$\varphi = \frac{30/50 + 0,15}{65/50 + 0,15} = 0,517$

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./м²;

Z_2 – приведенные затраты по внедряемому мероприятию руб./м²;

φ – 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, м².

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

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО заместителя директора по учебно-методической работе НИМИ им. А. К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»

/ В. П. Дьяков

« 26 » августа 2021 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы,
выполненной в рамках диссертационного исследования**

Результаты научно-исследовательской работы, выполненной в рамках диссертационного исследования канд. техн. наук Баева О. А. по теме: «Научное обоснование применения противofильтрационных покрытий каналов и развитие методов их расчета» внедрены в учебный процесс кафедры «Гидротехническое строительство».

Указанные результаты включены в курс специальности: «Мелиорация, рекультивация и охрана земель»,

(название курса)

направления: 200302 «Природообустройство и водопользование»,

(шифр и название направления подготовки)

при изучении дисциплины: «Мелиоративные гидротехнические сооружения».

Основные результаты: конструкции противofильтрационных покрытий водопроводящих гидротехнических сооружений (оросительных каналов) и методы их фильтрационных расчетов.

Основание: решение кафедры (протокол № 1 от «26» августа 2021 г.).

Декан инженерно-мелиоративного факультета, канд. техн. наук, доц.

/ Федорян А. В. /

« 26 » августа 2021 г.

Начальник учебно-методического отдела

/ Мушта А. Ю. /

« 26 » августа 2021 г.

Заведующий кафедрой д-р техн. наук, доц.

/ Ткачев А. А. /

« 26 » августа 2021 г.

Соискатель ученой степени

/ Баев О. А. /

« 26 » августа 2021 г.

Приложение В

Рекомендации по применению геосинтетических покрытий при проектировании, строительстве и эксплуатации каналов

В настоящих рекомендациях кратко рассматриваются вопросы применения геосинтетических бентонитовых материалов в конструкциях противofильтрационных покрытий оросительных каналов при их проектировании, строительстве и эксплуатации, в том числе: рекомендации по укладке и соединению; рекомендации по эксплуатации оросительных каналов, выполненных с покрытиями из геосинтетических бентонитовых материалов; технологические решения по ремонту и восстановлению противofильтрационных облицовок каналов.

В.1. Рекомендации по укладке и соединению противofильтрационных покрытий из бентонитовых материалов на оросительных каналах

В.1.1. При устройстве противofильтрационных покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов на оросительных каналах необходимо учитывать уровень грунтовых вод, который должен быть как минимум на 1 м ниже dna противofильтрационного экрана. В качестве грунта основания под противofильтрационную облицовку из бентонитовых материалов может служить естественная уплотненная поверхность, не содержащая остроугольных и недопустимых по крупности частиц ($d \leq 10$ мм), льда, воды, снега, растений, мусора и других включений, которые могут вызвать повреждения полотнищ.

В.1.2. Грунт, на который укладывается геосинтетический бентонитовый материал, рекомендуется утрамбовать с коэффициентом уплотнения не менее 0,9. Для размокания твердых комьев грунта основания необходимо произвести его увлажнение. В случае, если грунт основания не удовлетворяет требованиям, то в качестве подстилающего основания рекомендуется устраивать дополнительный слой из песка или супеси (толщиной 0,2–0,3 м), или геотекстильных материалов.

В.1.3. При наличии подпора грунтовыми водами (или инфильтрационных процессов) для снижения градиентов напора необходимо устройство дренажного

слоя (или дренирующих элементов по представленным в главе 2 конструктивным решениям), предназначенного для отвода излишних вод.

В.1.4. При устройстве противофильтрационных покрытий из геосинтетических бентонитовых материалов в сложных инженерных условиях производства работ (на просадочных и пучинистых грунтах с максимальной величиной просадки до 0,5 м) дополнительно в составе конструкций рекомендуется применять полимерную георешетку.

В.1.5. Покрытие откосов должно удовлетворять требованиям нормативных документов и обладать необходимой устойчивостью к оползанию, размыву. В ином случае рекомендуется закрепление откосов полимерной геосеткой (георешеткой) или другими материалами при соответствующем технико-экономическом обосновании [94].

В.1.6. Геосинтетические бентонитовые материалы могут быть уложены на замерзшее подстилающее основание при условии соблюдения требований, предъявляемым к основаниям гидротехнических сооружений по СП 23.13330.2018.

В.1.7. Полотна бентонитовых материалов при экранировании каналов должны укладываться между собой внахлест (150–200 мм). Для большей надежности места соединения рекомендуется скреплять степлером или саморезами.

В.1.8. Полотна геосинтетических бентонитовых материалов перехлестываются в направлении потока воды в каналах. Продольные края полотен рекомендуется перехлестывать на 300 мм, а поперечные края – на 500 мм. Нахлесты должны оставаться в таком состоянии во время обратной засыпки или при устройстве пригрузочных (защитных) слоев.

В.1.9. На крутых откосах (более 1В:4Г) места соединения двух рулонов геосинтетического материала по ширине полотна должны находиться на расстоянии не менее 1 м от линии дна котлована/откоса. Места нахлестов по ширине отдельного полотна на откосах должны быть выполнены таким образом, чтобы верхний рулон перекрывал нижний.

В.1.10. Для герметизации и обеспечения дополнительной надежности места нахлестов полотнищ рекомендуется просыпать непрерывным слоем гранул бентонита. Рекомендуемый расход гранул бентонита 0,4–0,5 кг/м.п.

В.1.11. Устройство защитного и (или) пригрузочного слоев экрана должно быть произведено непосредственно после укладки во избежание преждевременной гидратации бентонитового материала под воздействием атмосферных осадков.

В.1.12. Покрывающий (защитный) слой грунта не должен содержать частиц размером более 25 мм, камней, строительного мусора, крупных и острых включений, которые могут механически повредить противofильтрационный элемент.

В.1.13. При выполнении обратной засыпки механизированным способом необходимо следить за тем, чтобы между гидроизоляционным материалом и колесами (гусеничными опорами) строительной техники, находился слой грунта толщиной не менее 300 мм во избежание повреждения противofильтрационного элемента.

В.1.14. Противofильтрационный элемент экрана должен обладать:

- механической прочностью к нагрузкам и воздействию водного потока, которые могут возникнуть при строительстве и эксплуатации каналов;
- стойкостью к перепадам температур и ультрафиолетовому воздействию;
- достаточной прочностью на растяжения, деформируемостью, надежностью и долговечностью.

В.1.15. Чтобы предотвратить сползание рулона, а также попадание поверхностных вод между бентонитовыми материалами и грунтовым основанием, на каналах рекомендуется анкеровать противofильтрационный элемент в траншее, расположенной в верхней части откоса.

В.1.16. Конец рулона гидроизоляционного материала должен быть положен в траншею таким образом, чтобы он полностью покрывал дно, но не заходил на противоположную стенку траншеи. После того, как гидроизоляционные материалы уложены в траншею, производится обратная засыпка грунтом с уплотнением, для исключения сползания полотнищ. Размер и форма траншеи, условия обратной засыпки должны соответствовать проекту.

В.1.17. Крепление гидроизоляционных бентонитовых материалов на откосах оросительных каналов рекомендуется осуществлять пригрузом (например, слоем каменной наброски, тьюфячными габионами, плитами или путем устройства защитного слоя из георешетки, заполненной камнем). Возможны и иные варианты крепления при соответствующем технико-экономическом обосновании.

В.1.18. Контроль качества до устройства защитного слоя включает проведение визуального осмотра соединения отдельных полотнищ геосинтетических бентонитовых материалов на предмет отсутствия расхождения стыков (нахлестов) материала и возможных механических повреждений.

В.1.19. При повреждении геосинтетических бентонитовых материалов во время укладки, заделку мест повреждения следует осуществлять с использованием заплат. Заплату необходимо вырезать таким образом, чтобы нахлест составлял не менее 300 мм от любой из сторон, а вокруг повреждения рекомендуется нанести бентонитовый порошок (или бентонитовую глину).

В.1.20. Противофильтрационные покрытия на оросительных каналах необходимо проектировать с учетом:

- 1) типа объекта и его функционального назначения, условий эксплуатации.
- 2) данных, полученных при проведении инженерных изысканий.
- 3) возможности применения местных материалов (особенно в случае устройства защитных и подстилающих слоев).

В.1.21. Необходимые данные должны включать следующее:

- геометрические характеристики сооружения;
- напор на сооружении, представляющий разность уровней воды верхнего и нижнего бьефа, скорость течения воды в канале, режим и условия работы;
- уровни грунтовых вод в весенний и осенний периоды;
- характеристику подстилающих грунтов и др.

В.1.22. Инженерные изыскания, проводимые при проектировании нового противофильтрационного покрытия на оросительных каналах, должны включать:

- инженерно-геологические данные: состав и строение толщи грунтов, наличие неблагоприятных грунтовых явлений (просадок, пучений, набуханий, карста и оползней);
- гидрогеологические данные: уровень грунтовых вод и его сезонные колебания, наличие нескольких горизонтов грунтовых вод;
- климатическую характеристику района строительства и др.

В.1.23. При проектировании противofильтрационных покрытий на оросительных каналах рекомендуется проводить следующие расчеты:

- толщины противofильтрационного элемента из условий неповреждаемости при укладке и прочности на период эксплуатации оросительного канала;
- устойчивости откосов, в том числе на оползание защитного слоя (при наличии).

В.1.24. Расчет толщины полимерного противofильтрационного элемента из геомембраны ($\delta_{\text{ПМ}}$), применяемой в составе бентонитового покрытия, следует рассчитывать исходя из условия обеспечения ее неповреждаемости по формуле [111, 202] и в соответствии с инструкцией (СН 551-82 от 31.05.1982 № 148).

В.1.25. Расчет толщины профилированной геомембраны ($\delta_{\text{ПМ}}$) из условия работы полимерного элемента как мембраны на сплошном основании по [111].

В.1.26. В качестве окончательного варианта принимается противofильтрационное покрытие, обеспечивающее наибольшую надежность при равных показателях по стоимости, трудоемкости и технологичности возведения.

В.1.27. При эксплуатации противofильтрационных покрытий, выполненных с применением геосинтетических бентонитовых материалов, на оросительных каналах рекомендуется соблюдение следующих требований:

- ограниченное передвижение техники по противofильтрационному экрану, выполненному без дополнительных защитных и подстилающих слоев;
- очистка оросительных каналов должна производиться с соблюдением требований, исключающих повреждение машинами и механизмами противofильтрационного элемента и защитных слоев;
- периодический (визуальный) осмотр противofильтрационного покрытия на предмет размыва и оползания защитных и пригрузочных слоев, зарастания, деформаций, образования ходов фильтрации и других явлений.

В.1.28. Для производства и дальнейшего применения геосинтетических материалов (в том числе новых для противofильтрационных целей) на оросительных

каналах с участием автора разрабатывались технические условия. Полный перечень технических условий на геосинтетические материалы представлен в таблице В.1.

Таблица В.1 – Разработанные технические условия на геосинтетические материалы, применяемые в конструкциях ПФЭ каналов

№ п/п	Наименование технического условия	Номер СТО	Область применения
1	Материал рулонный гидроизоляционный гладкий из полиэтилена	СТО 65396612-019-2017	Гидроизоляция каналов, плотин, накопителей, прудов и водоемов
2	Материал рулонный профилированный гидроизоляционный – геомембрана трех типов	СТО 65396612-017-2017	Противофильтрационная защита каналов, гидроизоляция оснований, ремонт бетонных покрытий
3	Геоматы	СТО 65396612-022-2017	Защита береговых зон, укрепление грунтовых сооружений каналов, откосов, склонов
4	Геотекстиль тканый	СТО 65396612-024-2017	В качестве защитных, армирующих, разделительных и укрепительных прослоек
5	Геосетка	СТО 65396612-025-2017	Армирование оснований, укрепление слабых грунтов и конструкций
6	Материал геосинтетический дренажный	СТО 65396612-018-2017	В качестве дренажной, разделяющей, фильтрующей и армирующей прослойки
7	Бентонитовые маты гидроизоляционные	СТО 65396612-016-2017	Противофильтрационные экраны гидротехнических и природоохранных сооружений

По разработанным и представленным выше техническим условиям уже изготавливаются некоторые геосинтетические материалы (профилированные полимерные геомембраны, геосинтетики на основе геотекстиля и геомембран), а конструктивно-технические решения с применением новых материалов на основе бентонита защищены рядом патентов.

В.2. Технологические решения по ремонту и восстановлению противофильтрационных облицовок каналов

При проведении реконструкции оросительных каналов, выполненных с бетонными, железобетонными и бетоноплочными покрытиями, может осуществляться ремонт отдельных элементов существующих облицовок без их полной замены (при частичных разрушениях покрытия). С этой целью может быть использовано разработанное автором (совместно с В. Ф. Талалаевой) конструктивно-технологическое решение по патенту на изобретение РФ № 2779173 от

05.09.2022 г. для ремонта противофильтрационных облицовок оросительных каналов с использованием геосинтетических и геокомпозитных материалов.

Цель технологического решения – повышение эксплуатационной надежности и водонепроницаемости противофильтрационных покрытий оросительных каналов, продлении срока их службы. Конструктивно-технологическое решение может также использоваться при замене отдельных разрушенных бетонных плит. Технологическое решение выполняется нижеследующим образом (рисунок В.1).

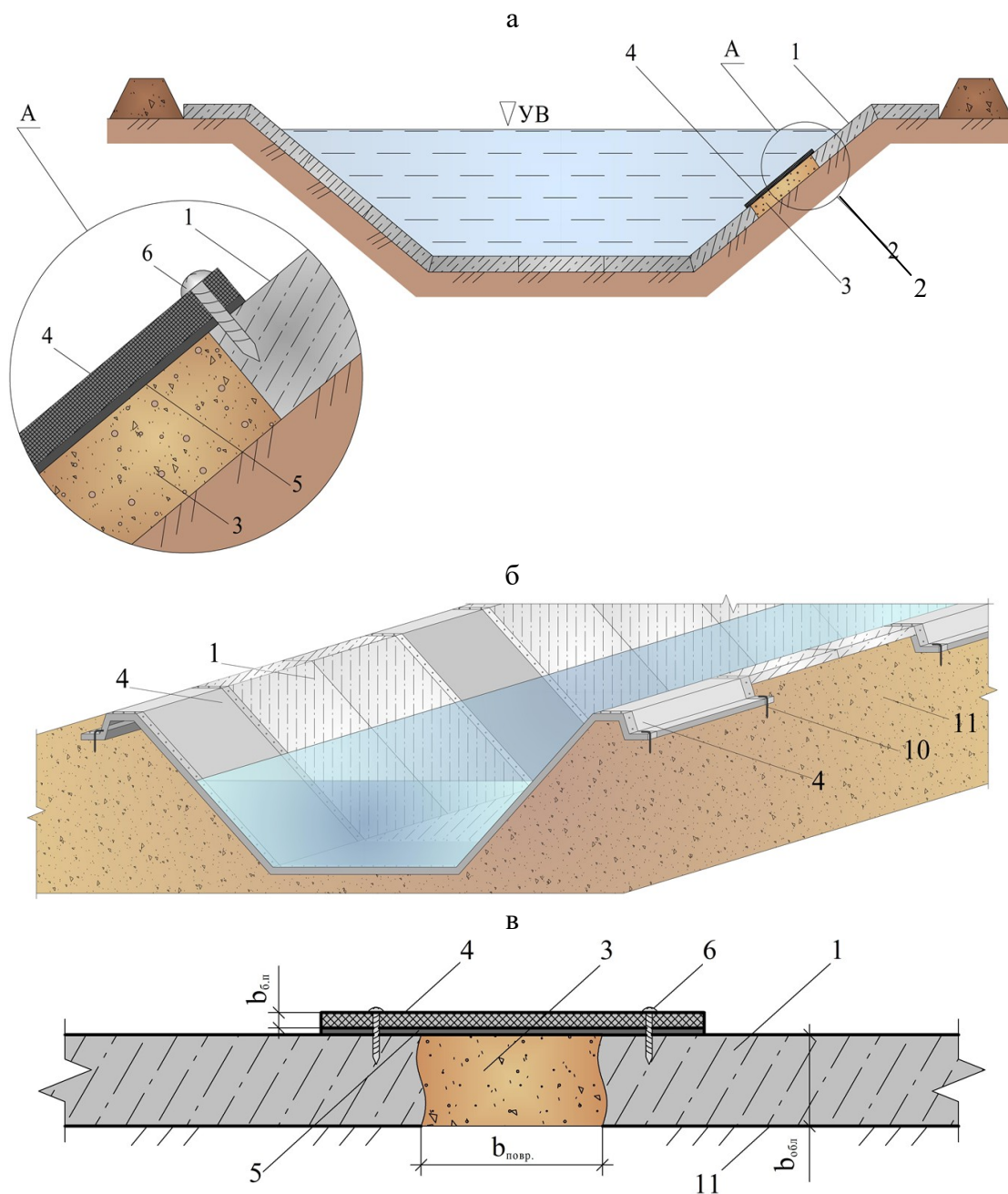


Рисунок В.1 – Технологическое решение ремонта облицовок оросительных каналов, лист 1

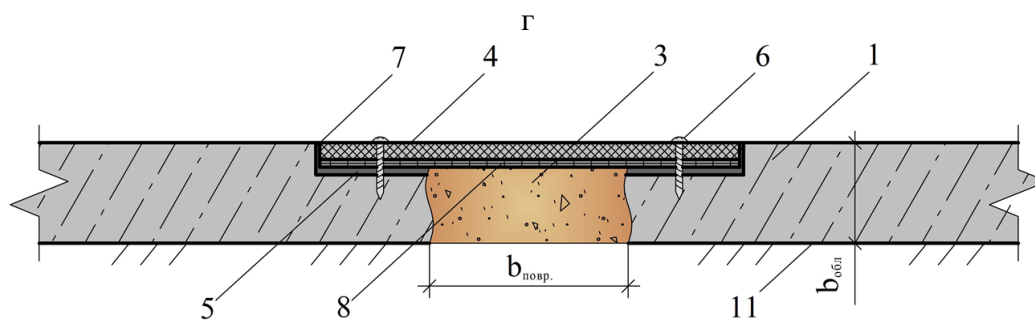


Рисунок В.1 – Технологическое решение ремонта облицовок оросительных каналов, лист 2:

- а – схема ремонта повреждения бетонной облицовки с применением бетонного полотна;
 б – схема замены отдельных поврежденных бетонных плит; в – схема крепления заплата к бетонной облицовке на откосе; г – схема устройства заплата по дну; 1 – бетонная облицовка;
 2 – дефектный участок; 3 – заполнитель дефектного участка; 4 – бетононаполняемое покрытие;
 5 – адгезионный слой; 6 – дюбель; 7 – пазы в бетонной облицовке; 8 – плоская георешетка;
 9 – траншея; 10 – анкер; 11 – грунтовое основание

Производятся работы, направленные на подготовку дефектного участка, заключающиеся в удалении разрушений бетонного покрытия, очистке поверхности бетонной облицовки, обеспыливании поверхности, удалении отслаивающихся частей бетонного покрытия с последующим его увлажнением. Участок разрушения защитного бетонного покрытия заполняется щебеночным или песчано-гравийным материалом, который в последующем разравнивается и уплотняется. Поверх дефектного участка производится укладка быстровозводимого бетононаполняемого покрытия, устраиваемого в виде заплата и крепящегося к поверхности бетонной облицовки. При этом быстровозводимое бетононаполняемое покрытие выполнено в виде композитного материала, между двумя геотекстильными полотнищами которого расположен слой твердеющего наполнителя на основе цемента, соединение отдельных элементов геотекстильных полотнищ произведено термоскреплением.

Для обеспечения герметизации соединения быстровозводимого бетононаполняемого покрытия с бетонной облицовкой устраивается адгезионный слой из полимерного герметика, наносимого по контуру на поверхность облицовки. Крепление быстровозводимого бетонного покрытия к поверхности бетонной облицовки осуществляется с помощью дюбелей. Данный вариант (см. рисунок В.1в) рекомендуется при устройстве на откосах оросительных каналов.

По дну на оросительных каналах рекомендуется производить устройство заплат в один уровень с бетонной облицовкой. С этой целью с каждой из сторон облицовки вырезаются пазы, выполняемые на глубину защитной заплаты. Для усиления конструкции, а также исключения провисания заплаты, производится укладка плоской георешетки. Заплаты из быстровозводимого бетонного покрытия устраиваются с запасом с каждой из сторон, принимаемым равным от 0,3 до 0,5 м. В случае проведения ремонтных работ по дну и на откосах канала, бетононаполняемое покрытие укладывается в траншею с последующим его креплением анкерами к основанию. Все работы рекомендуется производить при температуре воздуха не менее плюс 5 °С.

Преимуществом технологического решения является возможность ремонта крупных разрушений бетонных и железобетонных облицовок каналов, простота производства работ, отсутствие необходимости доставки и замены отдельных бетонных плит. При этом обеспечивается водонепроницаемость противотрационного покрытия, повышается надежность и предотвращается образование подплитных пустот.

Для восстановления частично разрушенных бетонных покрытий оросительных каналов рекомендуется проведение противотрационных мероприятий, заключающихся в герметизации трещин различной ширины раскрытия, деформационных швов, участков шелушения с использованием жидких композиционных материалов на основе полимеров и других составляющих. С этой целью была разработана технология производства работ, включающая пять этапов: 1) подготовительный, заключающийся в подготовке ремонтируемого участка покрытия (его очистке от наносов и других включений, просушке); 2) заполнение участка повреждения гравийно-галечниковым или песчаным материалом; 3) армирование участка покрытия (для крупных повреждений, а также частично или полностью отсутствующих плит); 4) механизированная (или ручная) укладка противотрационного материала на бетонную поверхность; 5) визуальный контроль целостности противотрационного покрытия.

Приложение Г
Примеры расчетов эффективности и надежности
покрытий каналов из геосинтетических материалов

Г 1. Расчет облицовки с геомембраной и защитным покрытием из бетона

Рассмотрим примеры расчетов эффективности и надежности противодиффузионных покрытий каналов (основные формулы для расчета приведены в главах 4 и 5 диссертации).

Исходные данные: $L_k = 10 \text{ км} = 10000 \text{ м}$; $\chi_k = 15 \text{ м}$; $m = 0,003 \text{ м}$; $l_{\text{ш}} = 1,0 \text{ м}$; $\delta_o = 0,10 \text{ м}$; $b = 5 \text{ м}$; $h_o = 3,0 \text{ м}$; $m_o = 2$; $n = 10$; $k_1 = 1,0 \text{ м/сут}$; $k_2 = 1,0 \text{ м/сут}$; $H_k = 0,5 \text{ м}$; $Q = 25 \text{ м}^3/\text{с}$.

1. Определяем осредненный коэффициент фильтрации облицовки ($k'_{\text{обл}}$).

2. Для вычисления $k'_{\text{обл}}$ определяем параметр h_1 – пьезометрический напор в щели экрана, м, из следующего соотношения:

$$h_1 = \frac{1(3 + 0,1) \text{Arch}(1/\sqrt{1,00002-1}) - 0,5 \ln(16 \cdot 0,1/3,14 \cdot 0,003)}{1 \cdot \text{Arch}(1/\sqrt{1,00002-1}) + \ln(16 \cdot 0,1/3,14 \cdot 0,003)} = \frac{16,35}{11,24} = 1,45 \text{ м},$$

где $\sigma = k_1/k_2 = 1,0/1,0 = 1,0$;

$$\text{Arch}(223,71) \approx \ln(2 \cdot 223,71) = 6,10;$$

$$\alpha = 1,00002; H_k = 0,5 \text{ м}.$$

В первом приближении определяем по выражению:

$$\bar{m} = 0,003/(3,0 + 0,1) = 0,00097.$$

Находим параметр α :

$$F_1(\alpha) = 0,00097 \rightarrow \alpha = 1,00002.$$

Во втором приближении вычисляем \bar{m} :

$$\bar{m} = 0,003/(1,45 + 0,5) = 0,00153.$$

По справочным данным уточняем параметр α :

$$F_1(\alpha) = 0,00153 \rightarrow \alpha \approx 1,0000008.$$

Вычисляем параметр (h_1) по формуле:

$$h_1 = \frac{3,1 \cdot \text{Arch}(1/\sqrt{0,0000008}) - 0,5 \cdot 5,14}{\text{Arch}(1/\sqrt{0,0000008}) + 5,14} = \frac{23,91 - 2,57}{7,71 + 5,14} = \frac{21,34}{12,85} = 1,66 \text{ м.}$$

Вычисляем значение коэффициента фильтрации (с учетом $h_1 = 1,66$ м):

$$k'_{\text{обл}} = \frac{3,14 \cdot 1,0 \cdot 10 \cdot (3 + 0,1 - 1,66) \cdot 0,1 \cdot 1,0}{(3 + 0,1) \cdot 10000 \ln(16 \cdot 0,1 / 3,14 \cdot 0,003) \cdot 15} = 0,189 \cdot 10^{-7} \text{ м/с.}$$

3. Вычисляем допускаемый коэффициент фильтрации облицовки ($k_{\text{обл.доп}}$):

$$k_{\text{обл.доп}} = \frac{0,085 \cdot 25 \cdot 0,10}{(5 + 2 \cdot 3\sqrt{1+2^2}) \cdot (3 + 0,1) \cdot 10000} = 0,00372 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 0,372 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

4. Проверяем условие выполнения эффективности облицовки по показателю водопроницаемости (коэффициентам фильтрации):

- при $k'_{\text{обл}} > k_{\text{обл.доп}}$ ($0,189 \cdot 10^{-7} < 0,372 \cdot 10^{-6}$), м/с – условие эффективности выполняется.

5. Определяем вероятность безотказной работы и отказа облицовки из геомембраны с защитным покрытием из бетона по соотношению:

$$P = \frac{10000 - 10}{1000} = 0,99,$$

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0} = \frac{10}{10000} = 0,01,$$

где $n(t)$ – количество поврежденных участков, $n(t) = 10$;

N_0 – число однородных элементов облицовки по длине канала, определяется как:

$$N_0 = \frac{L_{\text{к}}}{L_{\text{уч}}} = \frac{10000}{10} = 1000,$$

где $L_{\text{к}}$ – длина канала, принимаем $L_{\text{к}} = 10000$ м;

$L_{\text{уч}}$ – длина поврежденного участка, принимаем $L_{\text{уч}} = 10$ м.

6. Определение прогнозного срока службы облицовки.

Исходные данные: $\tau = 25$ лет; $P_{\text{гм}} = 0,99$; $\bar{v}_{\text{п}} = N_0 / \tau_0 = 0,1 / 25 = 0,004$;

$$P_{\tau} = 2,5 \cdot 10^{-10}; \quad K_{\varepsilon} = \varepsilon_{\tau} / \varepsilon_0 = 500 / 600 = 0,833; \quad m_{\text{п}\tau}^2 = 0,01 \cdot P_{\tau}^2 = 0,961 \cdot 10^{-10};$$

$$P_{\text{доп}} = 7,0 \cdot 10^{-10}.$$

Прогнозный срок службы облицовки ($\tau_{\text{обл}}$) из геомембраны с защитным покрытием из бетона определяется по формуле:

$$\tau_{\text{обл}} = \frac{(-\ln P_{\text{гм}})}{v_{\text{п}}} \exp \left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau} / K_{\varepsilon})]^2}{2m_{\text{птр}}^2} \right],$$

$$\tau_{\text{обл}} = \frac{(-\ln 0,99)}{0,004} \exp \left[\frac{[6,0 \cdot 10^{-10} - (3,0 \cdot 10^{-10} / 0,833)]^2}{2 \cdot 0,10 \cdot (3,0 \cdot 10^{-10})^2} \right] = 2,5 \cdot 24,53 = 61,3 \text{ лет.}$$

Г 2. Расчет облицовки с геомембраной и защитным покрытием из грунта

Коэффициент фильтрации противофильтрационного покрытия определяется при наличии в геомембране малых отверстий – проколов с учетом проницаемости основания при условии $k_2 / k_1 < 10$.

Исходные данные: $k_1 = 1,0$ м/сут; $\delta_0 = 0,5$ м; $h_0 = 3,0$ м;
 $F_0 = L_{\text{к}} \cdot \chi_{\text{к}} = 10000 \cdot 15 = 150000 \text{ м}^2$; $n = 30$ шт.; $r_0 = 0,001$ м; $d_0 = 2 \cdot r_0 = 2 \cdot 1,0 \text{ мм} = 0,002$ м; $\sigma = k_1 / k_2 = 1,0$.

1. Для вычисления коэффициента фильтрации ($k'_{\text{обл}}$) определим параметр (h_1):

$$h_1 = \frac{3,14^2 \cdot 1 \cdot (3,0 + 0,5) - 2 \cdot 0,5 \cdot \ln(8 \cdot 0,5 / 3,14 \cdot 0,001)}{3,14^2 \cdot 1 + 2 \ln(8 \cdot 0,5 / 3,14 \cdot 0,001)} = \frac{27,36}{24,16} = 1,132 \text{ м.}$$

2. Определяем коэффициент фильтрации ($k'_{\text{обл}}$):

$$k'_{\text{обл}} = 2 \cdot 3,14^2 \cdot 1,0 \frac{0,5 \cdot (3,0 + 0,5 - 1,13) \cdot 30 \cdot 0,001}{(3,0 + 0,5) \cdot 10000 \cdot 15 \cdot \ln(8 \cdot 0,5 / 3,14 \cdot 0,001)} = 0,187 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

3. Вычисляем допускаемый коэффициент фильтрации облицовки ($k_{\text{обл.доп}}$):

$$k_{\text{обл.доп}} = \frac{0,085 \cdot 25 \cdot 0,5}{(5 + 2 \cdot 3 \sqrt{1 + 2^2}) \cdot (3,0 + 0,5) \cdot 10000} = \frac{1,0625}{64,47 \cdot 10000} = 1,65 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

4. Проверяем условия выполнения эффективности облицовки:

$$k'_{\text{обл}} < k_{\text{обл.доп}} (0,187 \cdot 10^{-8} < 1,65 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}) - \text{условие выполняется.}$$

5. Определяем вероятность безотказной работы облицовки:

$$\text{- при } L_{\text{к}} = 10000 \text{ м, } n = 30, L_{\text{уч}} = \frac{L_{\text{к}}}{n} = \frac{10000}{30} = 333 \text{ м.}$$

Определяем число однородных элементов облицовки по длине канала:

$$N_0 = \frac{10000}{333} = 30 \text{ уч.}$$

Расчет производим при отказах: $n(t) = 1$ уч.; 2 уч.; 3 уч.; 0,5 уч.; 0,3 уч.

$$\text{При } n(t) = 1: P = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{30 - 1}{30} = 0,966.$$

$$\text{При } n(t) = 2: P = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{30 - 2}{30} = 0,933.$$

$$\text{При } n(t) = 3: P = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{30 - 3}{30} = 0,900.$$

$$\text{При } n(t) = 0,5: P = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{30 - 0,5}{30} = 0,983.$$

$$\text{При } n(t) = 0,3: P = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{30 - 0,3}{30} = 0,990.$$

При $n(t) = 0,3: N_0 = 30$ уч., $L_{\text{уч}} = 333$ м.

Определяем вероятность безотказной работы облицовки:

$$P = \frac{30 - 0,3}{30} = 0,990.$$

6. Расчет прогнозного срока службы покрытия с геомембраной.

Исходные данные: $\tau = 25$ лет; $P_{\text{гм}} = 0,99$; $\bar{v}_{\text{п}} = N_0 / \tau_0 = 0,1 / 25 = 0,004$;
 $K_{\varepsilon} = 550 / 600 = 0,916$; $\Pi_{\text{доп}} = 5,5 \cdot 10^{-10}$.

Прогнозный срок службы противofильтрационного покрытия с геомембраной и защитным слоем грунта определяется по формуле:

$$\tau_{\text{гп}} = \frac{(-\ln P_{\text{гм}})}{\bar{v}_{\text{п}}} \exp \left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau} / K_{\varepsilon})]^2}{2m_{\text{пг}}^2} \right],$$

$$\tau_{\text{гп}} = \frac{(-\ln P_{\text{гм}})}{\bar{v}_{\text{п}}} \exp \left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau} / K_{\varepsilon})]^2}{2m_{\text{пг}}^2} \right]$$

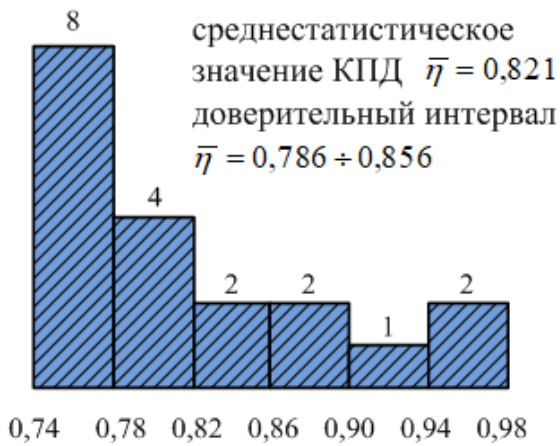
$$\tau_{\text{гп}} = \frac{-(-0,010)}{0,004} \exp \left[\frac{[5,0 \cdot 10^{-10} - (3,0 \cdot 10^{-10} / 0,916)]^2}{2 \cdot 0,10 \cdot (2,7 \cdot 10^{-10})^2} \right] = 2,5 \cdot 30,15 = 74,9 \text{ лет.}$$

Расчеты прогнозного срока службы противofильтрационных покрытий оросительных каналов с использованием геосинтетических бентонитовых материалов представлены в главе 4 настоящей диссертации.

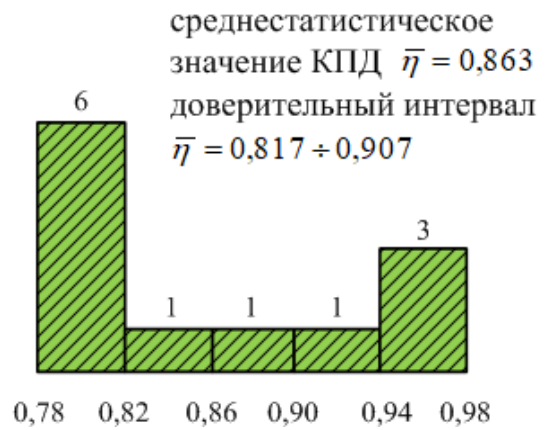
Приложение Д

Данные по среднестатистическим значениям КПД оросительных каналов
(по данным натурных обследований) и доверительный интервал

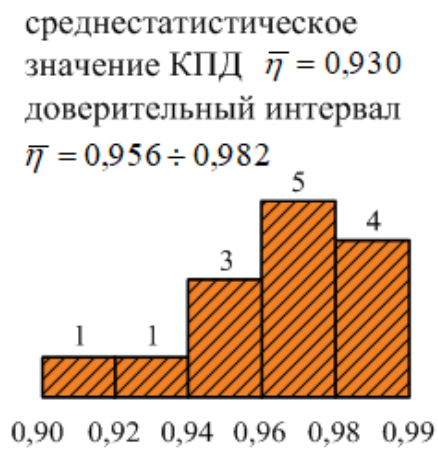
а – необлицованных



б – с бетонной облицовкой



в – с бетонопленочной облицовкой



Приложение Е

Алгоритмы разработанных программ для ЭВМ

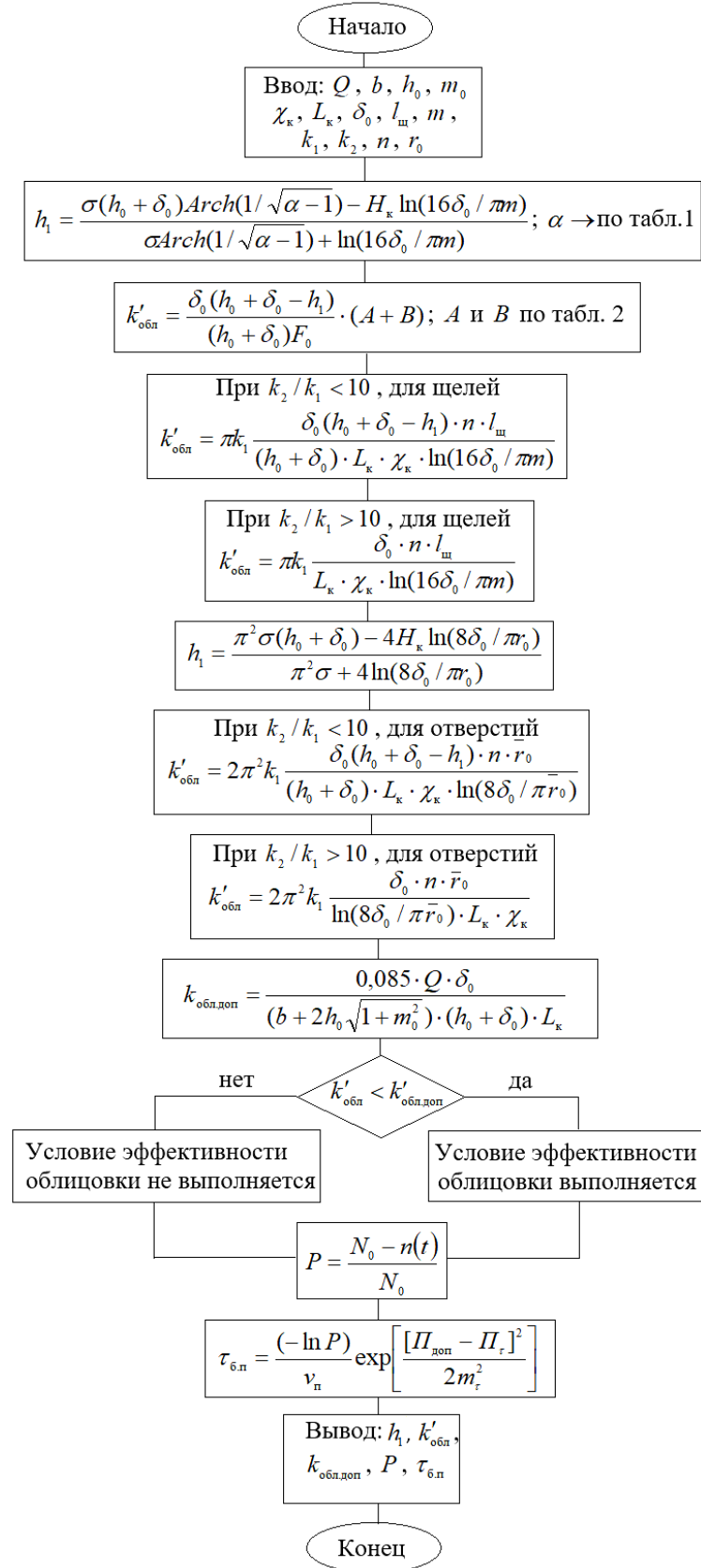


Рисунок Е.1 – Блок-схема расчета эффективности и надежности облицовки с геомембраной и защитным покрытием из бетона

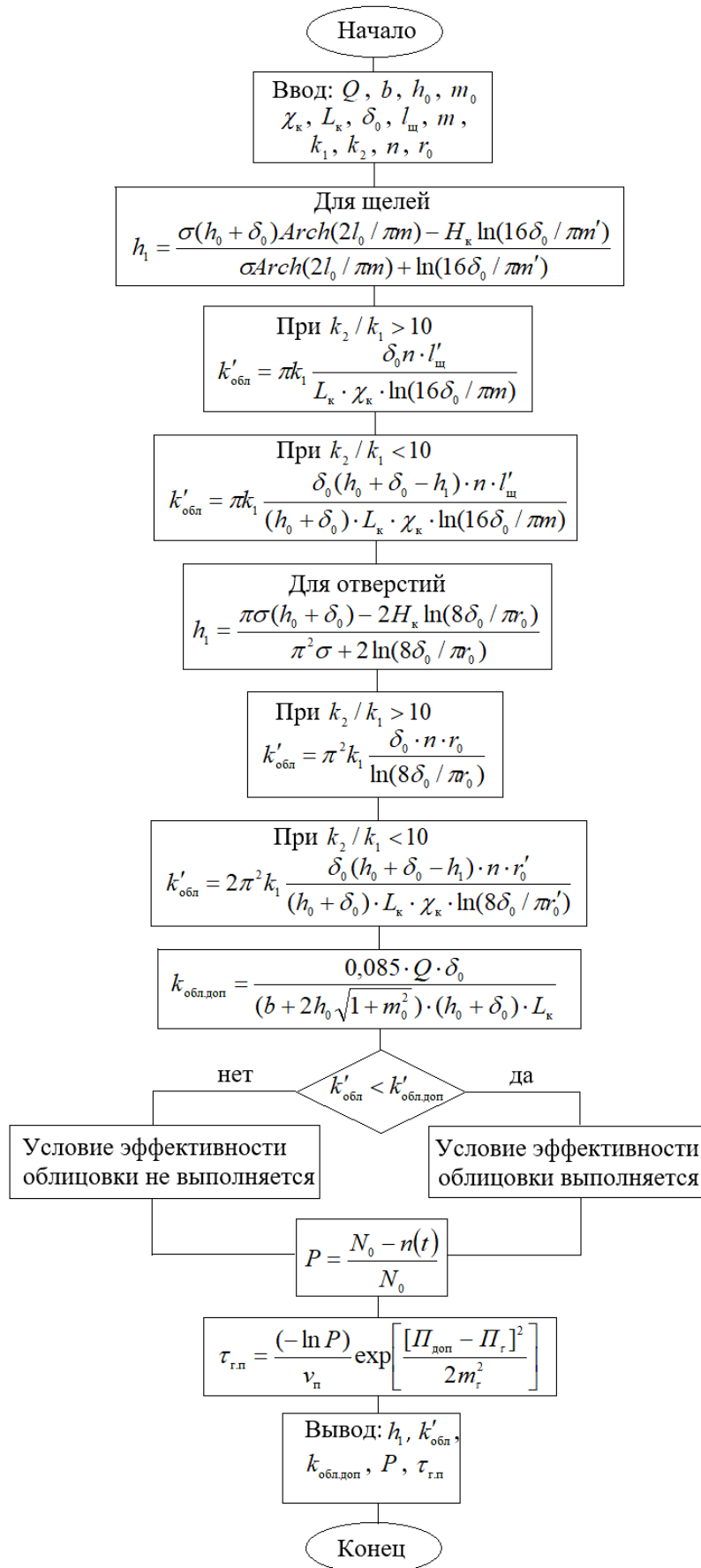


Рисунок Е.2 – Блок-схема расчета эффективности и надежности облицовки с геомембраной и защитным покрытием из грунта

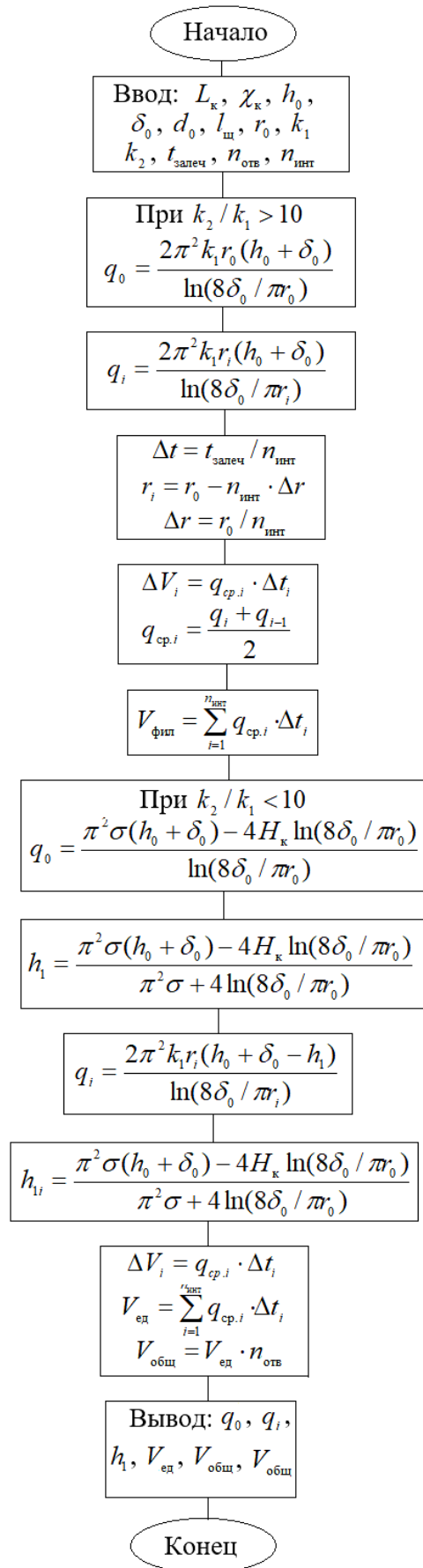


Рисунок Е.3 – Блок-схема расчета эффективности облицовки из геосинтетических бентонитовых материалов