

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
И НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Новочеркасск
РосНИИПМ
2016

УДК 626/627
ББК 38.77
О 136

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А. В. Ищенко – доктор технических наук, профессор
В. Л. Бондаренко – доктор технических наук, профессор

О 136 Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений: монография. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 283 с.

ISBN 978-5-9907461-5-2

АВТОРЫ:

В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Баев, Е. Д. Михайлов

В монографии рассматриваются общие сведения о низконапорных гидротехнических сооружениях (ГТС) водохозяйственного комплекса, в том числе бесхозяйных ГТС, распределение их по типам и уровню безопасности. Предоставлена нормативно-правовая база обеспечения безопасности ГТС в Российской Федерации и за рубежом, анализируется современное состояние по обеспечению безопасности низконапорных ГТС. Приведены основные требования к обеспечению надежности и безопасности низконапорных ГТС, методы оценки их риска аварий, примеры применения метода Байеса для оценки надежности низконапорных ГТС по диагностическим показателям, разработанные конструкции резервных водосбросов и методы их расчета. Впервые рассматривается комплекс вопросов по оценке безопасности эксплуатации каналов, в том числе расчеты вероятности разрушения потенциально опасных участков в насыпи и на косогоре. Излагается методика оценки вариантов целесообразности дальнейшей эксплуатации, реконструкции или вывода из эксплуатации ГТС.

Предназначена для работников научных и производственных организаций водохозяйственного комплекса, а также может быть полезна студентам вузов и аспирантам.

ISBN 978-5-9907461-5-2

УДК 626/627
ББК 38.77
© ФГБНУ «РосНИИПМ», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ.....	9
1.1 Классы гидротехнических сооружений водохозяйственного комплекса	9
1.2 Сведения о численности гидротехнических сооружений, поднадзорных Ростехнадзору.....	10
1.3 Сведения о низконапорных гидротехнических сооружениях в Российской Федерации, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору.....	13
1.4 Сведения о численности низконапорных гидротехнических сооружений в Южном федеральном округе и Северо-Кавказском федеральном округе и их техническом состоянии	18
2 НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОТНОШЕНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	26
2.1 Нормативно-правовая база обеспечения безопасности гидротехнических сооружений в Российской Федерации	26
2.2 Нормативно-технические и нормативно-методические документы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений в Российской Федерации.....	34
2.3 Нормативно-правовая и нормативно-методическая база обеспечения безопасности гидротехнических сооружений за рубежом	40
2.4 Современное состояние по обеспечению безопасности низконапорных гидротехнических сооружений.....	49
2.5 Ориентировочная оценка риска аварий низконапорных гидротехнических сооружений	56
2.6 Анализ изменения численности и пути сокращения бесхозных гидротехнических сооружений в России.....	56
3 ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	60
3.1 Общие требования к обеспечению надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений	60
3.2 Обязательные требования к надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при проектировании	63
3.3 Обязательные требования к безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при эксплуатации	64
3.4 Обязательные требования к безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при принятии решения о дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводе их из эксплуатации	66
3.5 Анализ методик определения критериев безопасности и применяемых количественных и качественных показателей состояния гидротехнических сооружений	67
4 ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ ДЛЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	72
4.1 Методы оценки риска аварий гидротехнических сооружений	72
4.2 Применение методов экспертной оценки риска аварий для низконапорных гидротехнических сооружений.....	78

4.3 Наиболее вероятные сценарии возникновения аварий применительно к низконапорным гидротехническим сооружениям.....	81
4.3.1 Возможные сценарии аварий грунтовых плотин прудов и малых водохранилищ	81
4.3.2 Расчет риска перелива воды через гребень плотины от волновых и нагонных явлений и при недостаточном запасе гребня над НПУ или ФПУ	85
4.3.3 Расчет риска перелива воды через гребень плотины при пропуске максимального расхода паводка, превышающего расчетный.....	88
4.3.4 Расчет риска разрушения плотины вследствие фильтрационных процессов	90
5 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БАЙЕСА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ	94
5.1 Теорема полной вероятности случайного события, формула Байеса	94
5.2 Оценка надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища.....	94
5.3 Оценка надежности резервного водосброса с размываемой вставкой.....	99
5.4 Расчетная оценка надежности конструкций противофильтрационных экранов из геокомпозитов	103
5.5 Расчет надежности работы крупного канала	111
6 ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА	114
6.1 Современное состояние водосбросных сооружений на грунтовых плотинах ...	114
6.2 Классификация водосбросных сооружений.....	116
6.3 Конструкции резервных водосбросов	121
6.3.1 Быстровозводимый резервный водосброс.....	122
6.3.2 Резервный водосброс с легкоразрушаемыми блоками	123
6.3.3 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и водосливной стенкой зигзагообразной формы	124
6.3.4 Резервный водосброс с водовыпусками	125
6.3.5 Траншейный резервный водосброс	126
6.3.6 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и водосливной стенкой	127
6.3.7 Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса	128
6.3.8 Резервный водосброс с размываемой грунтовой пробкой.....	130
6.3.9 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и бетонной водосливной стенкой	130
6.3.10 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой на флютбете	131
6.3.11 Водосливная грунтовая плотина с плитами клиновидной формы на низовом откосе	132
6.3.12 Водосливная грунтовая плотина с надувными водонепроницаемыми оболочками на низовом откосе.....	133
6.4 Компоновка речных гидроузлов с резервными водосбросами	134
6.5 Применение резервных водосбросов в грунтовых плотинах для пропуска паводковых расходов.....	135
6.6 Методика гидравлических расчетов новых конструкций резервных водосбросов	140
6.6.1 Методика расчета резервного водосброса с размываемой вставкой	140
6.6.2 Методика расчета быстровозводимого резервного водосброса.....	144

7	СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАНАЛОВ.....	151
7.1	Понятия безопасности и риска аварии при эксплуатации каналов	151
7.2	Сценарии аварийных ситуаций и основные факторы, влияющие на возникновение отказов и аварий на крупных каналах	151
7.3	Опыт эксплуатации крупных каналов	153
7.4	Обзор существующих работ в области оценки безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений.....	158
8	РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ КРУПНЫХ КАНАЛОВ.....	165
8.1	Потенциально опасные участки крупных каналов.....	165
8.2	Допущения и предпосылки, принятые при расчетах риска аварий на каналах	170
8.3	Расчет риска аварий на потенциально опасных участках канала при переливе через гребень с образованием прорана в дамбе	170
8.4	Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи и оценка риска возникновения аварийной ситуации	176
8.5	Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи с горизонтальным трубчатым дренажем и оценка риска возникновения аварийной ситуации	181
8.6	Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи с облицовкой и оценка риска возникновения аварийной ситуации	183
8.7	Расчет фильтрации через дамбу канала на косогоре и оценка риска возникновения аварийной ситуации	184
8.8	Сопоставление результатов расчета для дамбы канала в насыпи с известными методами	187
8.8.1	Моделирование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи методом электро моделирования	187
8.8.2	Сопоставление результатов расчета для дамбы канала в насыпи с методом Е. А. Замарина.....	189
9	РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА КАНАЛЕ	192
9.1	Применением теории подобия и размерностей для решения фильтрационных задач	192
9.2	Постановка задачи	192
9.3	Описание модели аварийной ситуации на канале	193
9.4	Вывод расчетных зависимостей для определения фильтрационных характеристик земляных дамб каналов с использованием теории планирования эксперимента	194
10	НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ КАНАЛОВ ЮГА РОССИИ	200
10.1	Характеристика объектов исследований.....	200
10.2	Методика натурных исследований	205
10.3	Результаты натурных исследований.....	208
10.4	Оценка риска разрушения потенциально опасных участков Донского и Пролетарского магистральных каналов	215
10.4.1	Оценка риска разрушения участков в насыпи Донского магистрального канала	215
10.4.2	Оценка риска разрушения участков в насыпи Пролетарского магистрального канала	217

11 РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ КАНАЛОВ	220
11.1 Мероприятия по повышению надежности и безопасности потенциально опасных участков на каналах (по опыту эксплуатации каналов юга России).....	220
11.2 Противофильтрационная диафрагма дамб каналов	225
11.3 Способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала	229
12 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, РЕМОНТА, РЕКОНСТРУКЦИИ ИЛИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	231
12.1 Существующие подходы для проведения оценки целесообразности дальнейшей эксплуатации, ремонта, реконструкции или ликвидации низконапорных гидротехнических сооружений IV класса	231
12.2 Обоснование уровней безопасности для принятия решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу из эксплуатации низконапорных гидротехнических сооружений	233
12.3 Методика оценки вариантов для принятия решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу из эксплуатации низконапорных гидротехнических сооружений	234
12.4 Методика оценки целесообразности дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйных гидротехнических сооружений.....	238
12.5 Апробация методики оценки целесообразности дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйных гидротехнических сооружений	240
12.6 Алгоритмы расчета выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации низконапорного гидротехнического сооружения.....	245
12.7 Тестовые расчеты оптимальных вариантов дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйных гидротехнических сооружений на примере существующих сооружений	247
12.7.1 Пруд на балке Волчье Логово в селе Султан-Салы Ростовской области	247
12.7.2 Пруд на балке Калмыцкая в селе Крым Ростовской области	253
12.7.3 Результаты тестовых расчетов оптимальных вариантов дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйных гидротехнических сооружений.....	262
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	265
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	267

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при эксплуатации ГТС, в том числе низконапорных ГТС, является обеспечение надежности и безопасности их функционирования. При этом аварийность низконапорных ГТС выше, чем для высоконапорных и средненапорных, что объясняется неудовлетворительным уровнем их технического обслуживания, отсутствием или недостаточным штатом эксплуатационного персонала, не выделением необходимых средств для ремонтных работ, а в ряде случаев потерей собственника и эксплуатирующей организации.

С принятием Федерального закона от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [1] эта задача реализуется на государственном уровне Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) на всех стадиях жизненного цикла ГТС: от проектирования, строительства, эксплуатации до его вывода из эксплуатации.

По данным Ростехнадзора общее количество поднадзорных ему ГТС промышленности, энергетики и водохозяйственного комплекса на начало 2014 г. составляет более 30000. При этом большая часть (95 %) этих ГТС относится к водохозяйственному комплексу, а к низконапорным ГТС – 96,3 %; численность бесхозяйных ГТС – 19 % от общего количества.

Для крупных и наиболее ответственных ГТС I–III класса требования к обеспечению безопасности удовлетворяются в полной мере, а для наиболее многочисленных низконапорных сооружений IV класса и, особенно для бесхозяйных ГТС, они удовлетворяются не в полной мере и в ряде случаев практически игнорируются и не выполняются.

Под низконапорными ГТС, согласно СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [2], понимаются ГТС IV класса с напором до 15 м и объемом водохранилища до 50 млн м³.

Большинство низконапорных ГТС эксплуатируются более 50 лет, что неизбежно сказывается на ухудшении их технического состояния и соответственно надежности и безопасности.

Так, только за последние пять лет в России имели место более 300 аварий ГТС в основном на сооружениях IV класса.

Из-за отсутствия должного контроля к безопасности низконапорных ГТС IV класса и бесхозяйных ГТС, эффективность работы с этой категорией сооружений остается или недостаточной, или даже низкой.

К низконапорным ГТС, надзор за безопасностью которых также обеспечивает Ростехнадзор, относятся некоторые крупные магистральные каналы, представляющие определенную опасность для населенных пунктов, хозяйственных объектов и сельскохозяйственных полей, поскольку также как и грунтовые плотины создают напорный фронт на участках в полувыемке-полунасыпи или насыпи.

Наибольшее количество магистральных каналов расположены на юге страны, где необходимо рациональное использование водных ресурсов с целью улучшения водообеспечения населения, промышленности и сельского хозяйства. На территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов зарегистрировано более 60 крупных каналов общей протяженностью 23 тыс. км.

К крупным магистральным каналам оросительных систем на юге страны относятся: Большой Ставропольский канал, Донской магистральный канал (МК), Пролетарский МК, Нижне-Донской МК, Верхне-Сальский МК, Багаевский МК, Азовский МК, Право-Егорлыкский МК, Невинномысский МК, Терско-Кумский и другие. Многие из них используются комплексно для целей водоснабжения, орошения, обвод-

нения, энергетики, рыбного хозяйства, рекреации. В настоящее время их техническое состояние значительно ухудшилось, в связи с чем, потенциально опасными признаны 12 магистральных каналов с общей протяженностью 1400 км.

Так как некоторые участки каналов представляют собой потенциальную опасность и находятся в неудовлетворительном техническом состоянии, то важной проблемой является безопасная эксплуатация магистральных каналов и ГТС на них.

Следует отметить, что ранее приказом МПР РФ № 39 от 02.03.1999 «О реализации постановления Правительства Российской Федерации от 06.11.1998 № 1303» подлежали декларированию безопасности напорные ГТС IV класса при напоре на сооружении более 3 м и объеме водохранилища более 0,5 млн м³. С передачей надзора за безопасностью ГТС в 2008 г. Ростехнадзору расширился перечень объектов, подлежащих декларированию. В настоящее время он включает практически все гидротехнические объекты, в том числе низконапорные ГТС, представляющие опасность в случае их разрушения для населения и хозяйственных объектов. К ним относятся кроме низконапорных грунтовых и бетонных плотин: защитные дамбы, регулирующие гидроузлы, каналы, дюкеры, туннели, насосные станции.

Целью настоящей работы является рассмотрение актуальных вопросов и проблем, связанных с безопасностью низконапорных ГТС водохозяйственного назначения:

- нормативно-правовое регулирование отношений в области безопасности ГТС в России и за рубежом;
- современное состояние по обеспечению безопасности низконапорных ГТС;
- требования к обеспечению надежности и безопасности низконапорных ГТС;
- применение упрощенных экспертных методов оценки риска аварий для низконапорных ГТС;
- применение метода Байеса для оценки надежности низконапорных ГТС по диагностическим показателям;
- применение резервных водосбросов в грунтовых плотинах для пропуска паводковых расходов;
- современное состояние по оценке безопасности эксплуатации каналов;
- расчетное обоснование вероятности разрушения потенциально опасных участков крупных каналов (от перелива через гребень дамб и от фильтрационных деформаций);
- разработка регрессионной модели аварийной ситуации на канале;
- натурные обследования по оценке технического состояния крупных каналов юга России;
- рекомендуемые мероприятия по повышению надежности и безопасности потенциально опасных участков на каналах;
- разработка методики оценки вариантов целесообразности дальнейшей эксплуатации, реконструкции или вывода из эксплуатации ГТС.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

1.1 Классы гидротехнических сооружений водохозяйственного комплекса

В настоящее время классы ГТС, используемых для водохозяйственного комплекса (мелиорации, водного хозяйства и других отраслей), соответствуют классам основных ГТС согласно СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 33-01-2003) [2], которые приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Класс основных ГТС в зависимости от их высоты и типа грунтов основания

Сооружение	Тип грунтов основания	Высота сооружений, м, при их классе			
		I	II	III	IV
Плотины из грунтовых материалов	A	> 80	50–80	20–50	< 20
	B	> 65	35–65	15–35	< 15
	B	> 50	25–50	15–25	< 15
Плотины бетонные, железобетонные	A	> 100	60–100	25–60	< 25
	B	> 50	25–50	10–25	< 10
	B	> 25	20–25	10–20	< 10
Примечание: грунты: A – скальные; B – песчаные, крупнообломочные и глинистые; B – глинистые водонасыщенные.					

Таблица 1.2 – Класс основных ГТС в зависимости от их социально-экономической ответственности и условий эксплуатации

Объект гидротехнического строительства	Класс сооружения
1 Подпорные гидротехнические сооружения мелиоративных гидроузлов при объеме водохранилища, млн м ³ : > 1000 200–1000 50–200 50 и менее	I II III IV
2 Гидротехнические сооружения мелиоративных систем при площади орошения и осушения, обслуживаемой сооружениями, тыс. га: > 300 100–300 50–100 50 и менее	I II III IV
3 Каналы комплексного водохозяйственного назначения и сооружения на них при суммарном годовом объеме водоподачи, млн м ³ : > 200 100–200 20–100 < 20	I II III IV

В таблице 1.1 представлено распределение ГТС по классам для плотин из грунтовых материалов и бетонных, железобетонных плотин в зависимости от их высоты и типа грунтов основания, а в таблице 1.2 – распределение ГТС для сооружений, водо-

хозяйственного комплекса, предназначенных для целей мелиорации и водного хозяйства.

В соответствии с установленными классами основных ГТС к низконапорным ГТС следует относить грунтовые плотины IV класса высотой до 15 м, а также бетонные и железобетонные плотины высотой до 10 м. Кроме того, к низконапорным ГТС, используемым для водохозяйственного комплекса, относятся подпорные ГТС мелиоративных гидроузлов IV класса с объемом водохранилища до 50 млн м³, а также ГТС мелиоративных систем IV класса с площадью орошения и осушения до 50 тыс. га и каналы комплексного водохозяйственного назначения IV класса, в том числе сооружения на них, при годовом объеме водоподачи до 20 млн м³.

1.2 Сведения о численности гидротехнических сооружений, поднадзорных Ростехнадзору

Общее количество ГТС всех отраслей, поднадзорных Ростехнадзору, по данным за 2013 г. составило 30188, а за 2014 г. – 29964 (рисунок 1.1). При этом подавляющее их большинство относится к IV классу, т. е. к низконапорным ГТС и составляло в 2013 г. – 29071, в 2014 г. – 28847 с соответствующим процентом от общего количества – 96,30 % и 96,27 %.

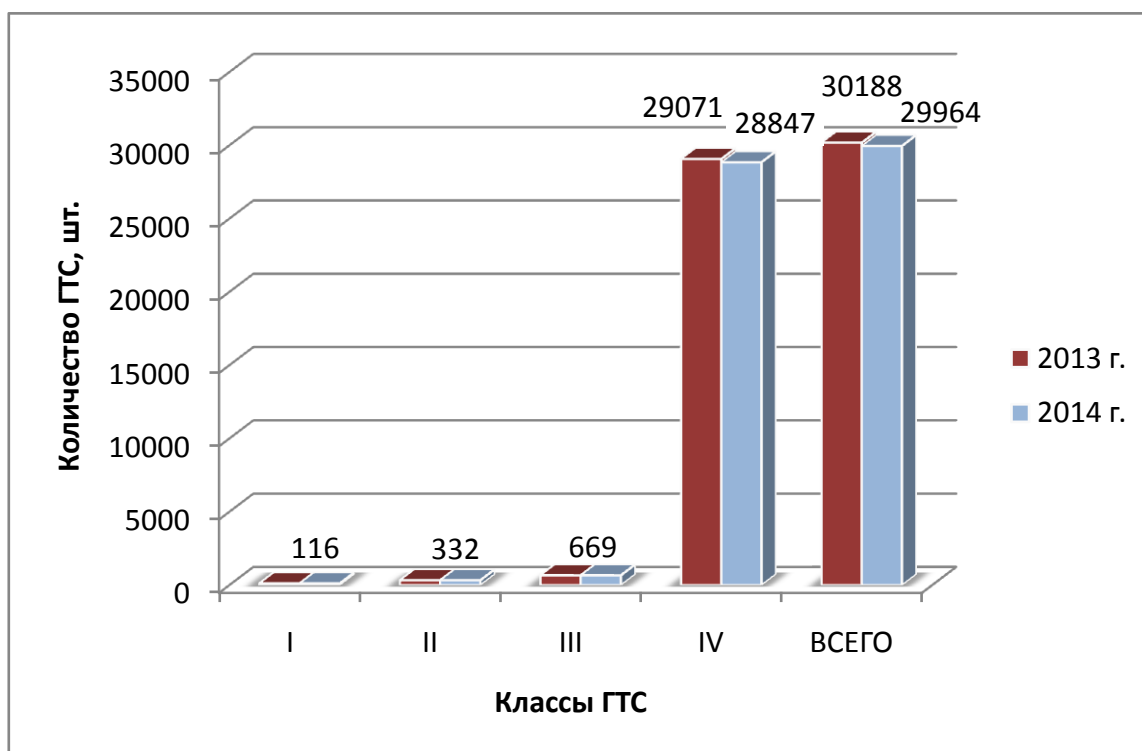


Рисунок 1.1 – Распределение гидротехнических сооружений, поднадзорных Ростехнадзору, по классам

Распределение ГТС водохозяйственного комплекса дано на рисунке 1.2. Общее количество ГТС водохозяйственного комплекса составило – 28776 ГТС в 2013 г. и 28552 ГТС в 2014 г. В ведении Минсельхоза России находится 1481 ГТС, в ведении Росводресурсов – 844 ГТС, число бесхозяйных ГТС в 2013 г. составляло 5772 сооружения, а в 2014 г. – 4477 ГТС, что свидетельствует о снижении их количества за один год на 1295 ГТС или на 22,4 %.

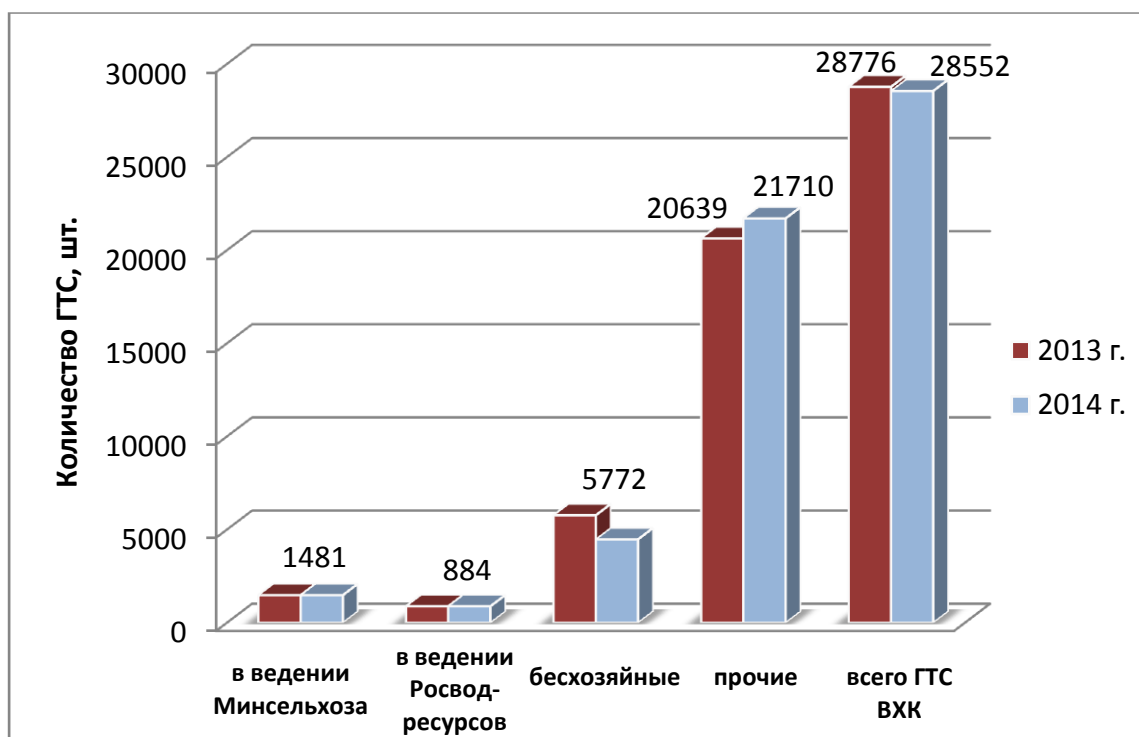


Рисунок 1.2 – Распределение гидротехнических сооружений водохозяйственного комплекса по типам

Распределение ГТС всех отраслей в зависимости от уровня безопасности по данным Российского регистра ГТС представлено на рисунке 1.3. Согласно этим данным ГТС с нормальным уровнем безопасности составляет 39,4 %, с пониженным уровнем безопасности – 43,4 %, с неудовлетворительным и опасным уровнем безопасности соответственно – 12,5 % и 4,7 %.

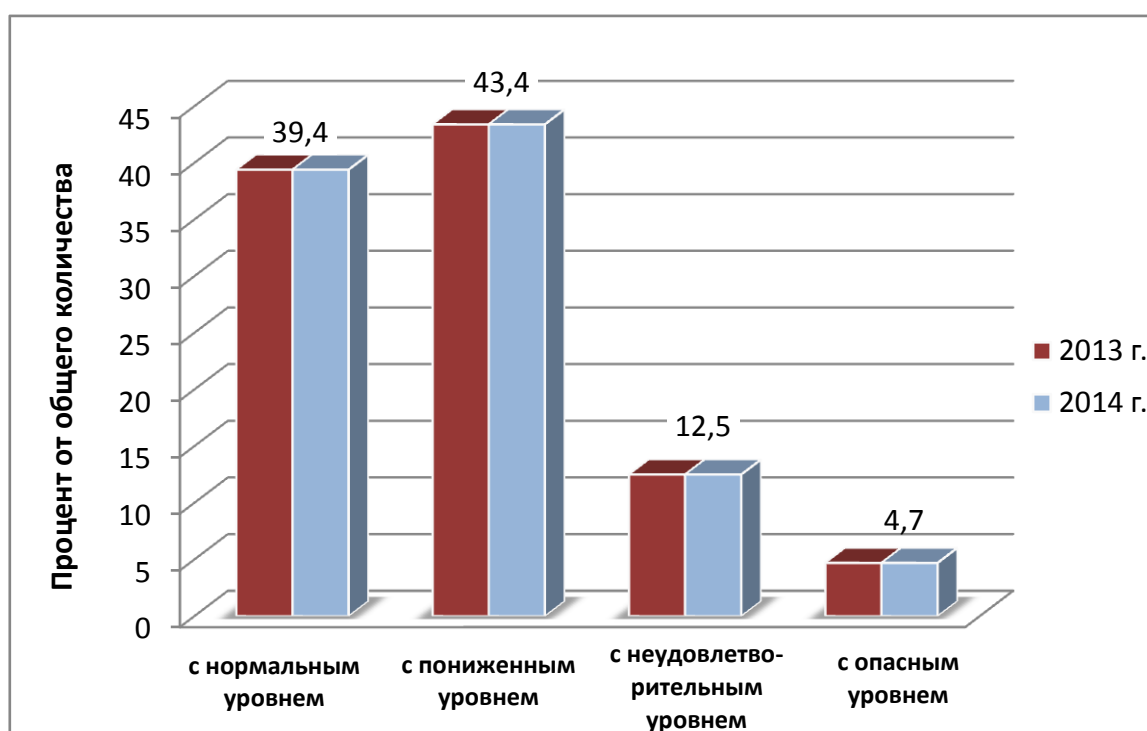


Рисунок 1.3 – Распределение гидротехнических сооружений в зависимости от уровня безопасности

Количество бесхозных ГТС по годам приведено на рисунке 1.4, а их распределение по уровню безопасности – на рисунке 1.5.

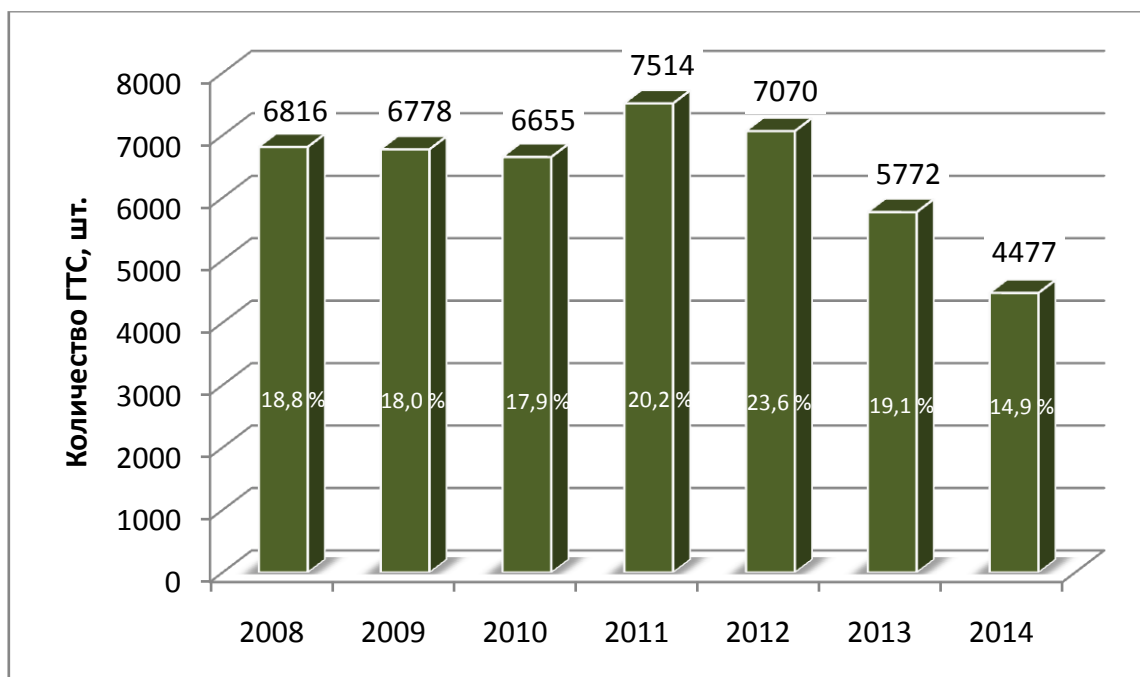


Рисунок 1.4 – Количество бесхозных гидротехнических сооружений по годам



Рисунок 1.5 – Распределение бесхозных гидротехнических сооружений по уровню безопасности

Анализ данных о численности бесхозных ГТС свидетельствует о максимальном их количестве, зарегистрированном в 2011 г., когда их количество составило 7514. С 2011 по 2014 г. наблюдается устойчивое снижение числа бесхозных, что составило за этот период 3037 бесхозных ГТС или 40,4 %. При этом значительно снизился процент бесхозных ГТС с 20,2 % до 14,9 %.

1.3 Сведения о низконапорных гидротехнических сооружениях в Российской Федерации, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

В Российской Федерации насчитывается очень большое количество ГТС мелиоративного назначения – более 1 млн 900 тыс. сооружений различных форм собственности: федеральной собственности субъектов, муниципальной и собственности юридических и физических лиц [3]. Из них в федеральной собственности находится 58250 тыс. ГТС.

На рисунке 1.6 приведено распределение низконапорных ГТС по типам, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору (по данным на 01.12.2009).



Рисунок 1.6 – Распределение низконапорных гидротехнических сооружений, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

Согласно этим данным наибольшее количество поднадзорных ГТС, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, составляют: водохранилища объемом до 50 млн м³ и более – 160 и пруды объемом до 1 млн м³ – 84. Таким образом, общая численность основных ГТС, поднадзорных Ростехнадзору, составляет – 244. К числу поднадзорных ГТС также относятся: защитные дамбы, регулирующие гидроузлы, магистральные каналы, дюкеры и тоннели.

В таблицах 1.3–1.6 представлен неполный перечень низконапорных ГТС – водохранилищ с плотинами, крупных магистральных каналов и сооружений на них, гидроузлов и защитных дамб.

Таблица 1.3 – Перечень некоторых низконапорных ГТС – водохранилищ и их плотин, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

Субъект, наименование водохранилища (пруда)	Год ввода в эксплуатацию	Высота плотины, м	Объем водохранилища при НПУ, млн м ³	Класс ГТС
1	2	3	4	5
<u>Воронежская область</u>				
Водохранилище на р. Красная	1987	12,0	2,12	IV
Пруд на б. Крутой Лог	1987	14,0	1,20	IV
Пруд на б. Кабань	1983	16,0	1,45	IV
Пруд на б. Потупкин Лог	1979	20,0	2,30	III
Пруд на б. Таловский Лог	1973	20,0	2,20	IV
Пруд на б. Васильевская	1987	19,0	3,67	IV
<u>Республика Адыгея</u>				
Октябрьское водохранилище	1964	7,1	20,0	IV
Шенджийское водохранилище	1967	7,5	29,6	IV
Шапсучское водохранилище	1952	13,2	140,0	IV
<u>Республика Дагестан</u>				
Водохранилище «Галернозенское»	1966	29,0	7,0	IV
Водохранилище «Башлыгевское»	1989	16,0	12,0	II
<u>Ростовская область</u>				
Водохранилище на б. Синяя	1986	21,0	29,3	III
Водохранилище на б. Камышеваха	1971	14,5	14,0	IV
Пролетарское водохранилище	1934	10,2	17,5	IV
<u>Карачаево-Черкесская Республика</u>				
Водохранилище Усть-Джегутинское	1962	34,0	36,4	II
<u>Ставропольский край</u>				
Дундинское водохранилище	1986	30,0	80,0	IV
Курское водохранилище	1939	10,0	11,4	IV
Ростовановское водохранилище	1927	12,0	23,0	IV
Курганенское водохранилище	1948	15,5	11,7	IV
Сенгилеевское водохранилище	1958	8,0	805,0	II
Новотроицкое водохранилище	1953	22,0	83,0	I
Ульяновское водохранилище	1973	18,0	13,5	IV
Отказненское водохранилище	1966	16,0	64,8	III
Чограйское водохранилище	1969	13,0	640,0	II
<u>Краснодарский край</u>				
Варнавинское водохранилище	1971	6,0	174,0	IV
Крюковское водохранилище	1972	6,2	203,0	IV
<u>Пензенская область</u>				
Вадинское водохранилище на р. Вад	1983	14,1	21,4	III

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5
<u>Саратовская область</u>				
Верхнеперекопновское водохранилище	1990	16,1	65,4	III
Сулакское водохранилище	1972	22,0	115,0	III
Варфоломеевское водохранилище	1951	12,5	26,5	IV
Мечеткинское водохранилище	1988	14,1	6,4	IV
Непокоевское водохранилище	1984	29,0	48,0	IV
Орлово-Гайское водохранилище	1981	5,7	5,4	IV
Полуденское водохранилище	2006	7,0	2,2	IV
Новоузенское водохранилище	2006	12,7	7,2	IV
Александр-Гайское водохранилище	2004	8,7	8,8	IV
Дегачевское водохранилище	2008	11,0	2,31	IV

Таблица 1.4 – Перечень некоторых низконапорных ГТС – крупных магистральных каналов и сооружений на них, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

Субъект, наименования канала	Год ввода в эксплуатацию	Протяженность, км	Расход канала, м ³ /с	Класс ГТС
1	2	3	4	5
<u>Ставропольский край</u>				
Невинномысский канал	1948	49,0	75	II
Головное сооружение Невинномысского канала	1948	–	75	II
Дюкер Невинномысского канала, 2 нитки	1948	0,077	75	II
Тоннель Невинномысского канала, 2 нитки	1948–1988	5,9	75	II
Большой Ставропольский канал, 2-я очередь (БСК-2)	1975	64,4	60	III
Тоннель – 1, 1 нитка	1975	1,92	60	III
Тоннель – 2, 1 нитка	1975	6,15	60	III
Тоннель – 3, 1 нитка	1975	0,9	60	III
Круглолесский дюкер, 2 нитки	1976	2,04	60	III
Большой Ставропольский канал 3-я очередь (БСК-3)	1979	42,5	55	III
Томузловский дюкер, 2 нитки	1979	1,36	55	III
Тоннель, 1 нитка	1979	0,96	55	III
Калиновский дюкер, 2 нитки	1979	2,06	55	III
Дюкер Голубева Пасека, 2 нитки	1980	1,39	27,5	III
Грушевский сброс	1982	3,5	55	III
Большой Ставропольский канал, 4-я очередь (БСК-4)	1989	58,0	53	III
Ореховский дюкер, 1 нитка	1989	2,44	26,5	III
Право-Егорлыкский канал	1956	123,0	45	II
Ташлинский дюкер	1956–1969	2,48	19,5	II

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Кугультинский дюкер, 2 нитки	1957	2,92	29	II
Левая ветвь Право-Егорлыкского канала	1954	227,4	29	III
<u>Республика Дагестан</u>				
Канал им. Октябрьской Революции (КОР)	1923	78,0	80	IV
Самур-Дербентский канал	1967	50,0	10,5	IV
Главное сооружение канала им. Дзержинского	1950	—	45	III

Таблица 1.5 – Перечень некоторых низконапорных ГТС – гидроузлов, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

Субъект, наименование гидроузла	Год ввода в эксплуатацию	Высота плотины, м	Расход гидроузла, м ³ /с	Класс ГТС
<u>Республика Дагестан</u>				
Копайский гидроузел	1958	9,0	2420	III
Каргалинский гидроузел	1956	10,0	2180	II
Водозаборный узел на р. Гюльгерычай	1975	4,0	10	IV
<u>Республика Ингушетия</u>				
Ассиновский гидроузел	1978	19,0	425	IV
<u>Республика Северная Осетия</u>				
Терско-Кумский гидроузел	1960	—	2000	II
<u>Краснодарский край</u>				
Федоровский гидроузел	1967	8,8	24	II
Тиховский гидроузел	2006	—	1400	III
<u>Республика Марий-Эл</u>				
Гидроузел «Созинский»	1993	8,3	5,83	IV
Гидроузел «Мушкинский»	1986	10,2	0,8	IV
Гидроузел «Чермышевский»	1984	14,0	2,2	IV
<u>Чувашская Республика</u>				
Гидроузел на р. Чесновка	1989	13,5	1,39	IV
Гидроузел на р. Усландырь	1988	15,3	2,66	IV
Гидроузел на р. Хома	1985	11,5	2,8	IV
Гидроузел на р. Малая Шатъма	1985	15,0	1,85	IV
Гидроузел на р. Учук	1983	8,3	1,1	IV
Гидроузел на р. Аниш	1982	18,5	2,95	IV
Гидроузел на р. Анишкасы	1984	15,5	1,05	IV
Гидроузел на р. Орбатко	1982	17,0	1,16	IV
Гидроузел на р. Коснарка	1979	13,5	1,12	IV
Гидроузел на р. Эскедень	1984	14,5	2,45	IV
Гидроузел на р. Цивиль	1982	15,0	2,85	IV

Таблица 1.6 – Перечень некоторых низконапорных ГТС – защитных дамб, находящихся в ведении Минсельхоза РФ, поднадзорных Ростехнадзору

Субъект, наименование защитных дамб	Год ввода в эксплуатацию	Высота дамбы, м	Протя- женность дамбы, км	Класс ГТС
<u>Калининградская область</u>				
Левобережная дамба на р. Неман	До 1945	1,5–6,0	35,5	III
Левобережная дамба канала им. Матросова	До 1945	1,5–5,5	41,0	II
Правобережная дамба канала им. Матросова	До 1945	1,5–5,5	36,5	II
Дамба Северная	До 1945	1,5–2,5	12,0	III
Дамба Западная	До 1945	1,5–2,5	19,4	III
Дамба Приморская	До 1945	1,5–4,0	23,5	III
<u>Республика Хакасия</u>				
Защитная дамба «Райковская» на р. Абакан	1971	3,0	4,2	IV
Защитная дамба «Восточная» на р. Абакан	1970	4,0	20,9	IV
<u>Еврейская автономная область</u>				
Дамба «Октябрьская»	1970	3,6	31,9	III
Дамба «Новинская»	1993	5,8	12,8	III
Дамба «Даниловская»	1977	7,7	10,5	III
<u>Краснодарский край</u>				
Противопаводковая система обва- лования р. Кубани и р. Протоки	1930–1935	2,0–4,0	650,0	IV
<u>Чеченская республика</u>				
Защитный вал на р. Асса	1969	2,5	4,4	IV
Защитный вал на р. Терек у с. Хангим-Юрт	1967	2,5	19,0	IV
Первая линия защитного вала на р. Терек	1966	2,5	85,0	IV
Вторая линия защитного вала на р. Терек	1966	2,5	20,0	IV
Берегоукрепление на р. Терек уст. Старощедринская	1972	2,5	0,6	IV
Берегоукрепление р. Терек, Гребенской участок	1977	2,5	0,78	IV
Берегоукрепление р. Терек, Нижний Парабачевский участок	1976	2,5	0,25	IV
Берегоукрепление р. Терек, Верхний Парабачевский участок	1973	2,5	0,60	IV
Берегоукрепление р. Терек, Парабачевский участок	1991	2,5	0,27	IV

Анализ данных таблицы 1.3 показывает, что в основном эти сооружения отно-
сятся к IV классу по высоте плотины до 15 м (см. таблицу 1.1) и по объему водохрани-

лища до 50 млн м³ (см. таблицу 1.2). Однако целый ряд низконапорных ГТС, таких как Аксайское, Чограйское, Вадинское водохранилище при высоте плотины менее 15,0 м отнесены к более высокому классу – III, а Башлычевское водохранилище – ко II, хотя высота плотины составляет 16 м, а объем водохранилища – всего 12,0 млн м³. По этим показателям водохранилище может быть отнесено к III, но не ко II классу.

Таким образом, для некоторых объектов выявляется несоответствие ранее установленного класса современным требованиям, вступившим в силу с 01.01.2013 [2].

Рассматривая данные по крупным магистральным каналам комплексного назначения (см. таблицу 1.4) и сравнивая их с градацией по объему водоподачи, также имеется несоответствие требованиям СП 58.13330.2012 [2].

Так, годовой объем водоподачи Невинномысского канала II класса составляет 1,9 км³, что должно соответствовать I классу; годовой объем водоподачи Большого Ставропольского канала, который отнесен к III классу, составляет 2,5 км³, т. е. тоже должен быть I класса.

Сведения о гидроузлах (см. таблицу 1.5) показывают, что гидроузлы, находящиеся на больших реках, такие как Каргалинский, Терско-Кумский, Копайский на р. Терек, а также Федоровский и Тиховский на р. Кубань отнесены ко II–III классам, а на малых реках в Республике Мари-Эл и в Чувашской Республике – к IV классу.

Защитные дамбы на р. Неман в Калининградской области (см. таблицу 1.6) имеют II, III классы, а защитные валы на р. Терек и р. Асса отнесены к IV классу.

1.4 Сведения о численности низконапорных гидротехнических сооружений в Южном федеральном округе и Северо-Кавказском федеральном округе и их техническом состоянии

Наибольшее количество низконапорных ГТС водохозяйственного комплекса находится на юге России (на Северном Кавказе) в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах. На рисунке 1.7 приведены данные о количестве основных ГТС в ЮФО и СКФО, находящихся в ведении Минсельхоза РФ.

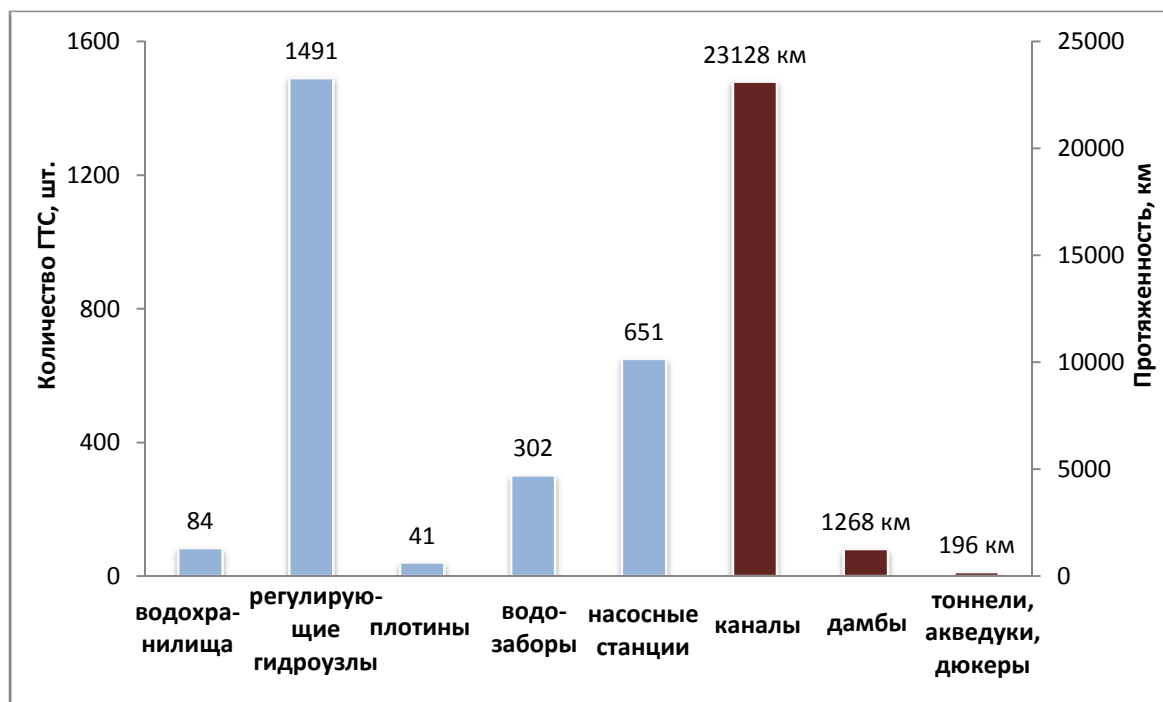


Рисунок 1.7 – Сведения о количестве основных гидротехнических сооружений в Южном и Северо-Кавказском Федеральных округах

Согласно этим данным в регионе находятся 84 водохранилища, 1491 регулирующих гидроузлов, 302 водозаборных сооружения, каналов общей протяженностью 23128 км, защитных дамб протяженностью 1268 км и других сооружений.

С точки зрения безопасности выделяются прежде всего потенциально опасные ГТС (рисунок 1.8), к которым отнесены водохранилища – 38, гидроузлы – 27, дамбы – 23, магистральные каналы – 12 и другие (в Южном и Северо-Кавказском Федеральных округах, находящиеся в ведении Министерства сельского хозяйства Российской Федерации).

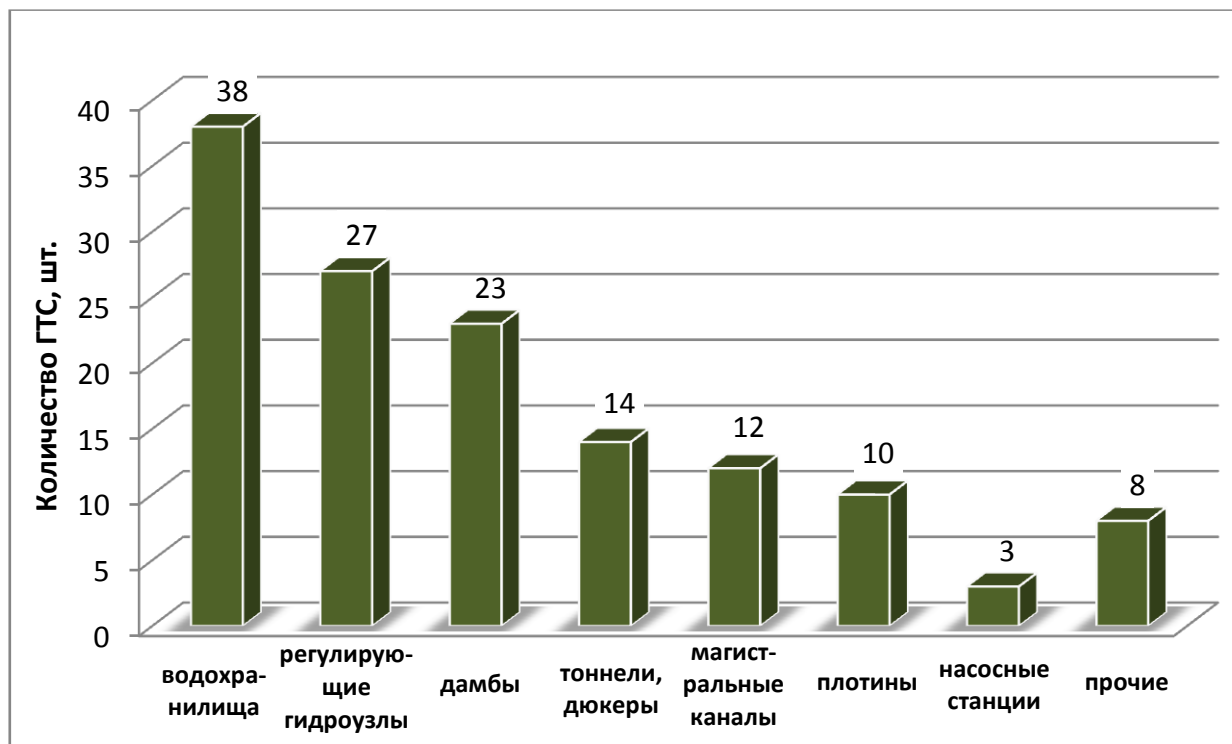


Рисунок 1.8 – Сведения о количестве потенциально опасных гидротехнических сооружений

В таблицах 1.7–1.11 приведены основные технические характеристики и состояние магистральных каналов и межхозяйственных распределений Ростовской области, Ставропольского и Краснодарского краев, Астраханской области, а также высоких насыпей на Большом Ставропольском и Право-Егорлыкском каналах.

Анализ данных фактических значений КПД каналов свидетельствует о том, что они существенно ниже проектных (для каналов Ростовской области, за исключением Донского МК): в земляном русле – на 3–9 %, в облицовке (сборные ж/б плиты по полиэтиленовой пленке) – на 7–10 %. В тоже время, сравнение фактических КПД каналов с требованиями СНиП 2.06.03-85, которые составляют для магистральных каналов и их ветвей не менее 0,90, а для распределителей различных порядков – не менее 0,93, показывает еще большее снижение значений КПД в земляном русле по сравнению с нормативными – до 16–19 %.

Представленные данные также свидетельствуют о неудовлетворительном техническом состоянии некоторых каналов Ростовской области (Азовский МК, Нижне-Донской МК, Большовский и Верхне-Сальский МК), а также каналов Краснодарского края (МК Петровско-Анастасиевской оросительной системы, Новокубанский, Лабинский МК и другие), Астраханской области (МК Ивановской оросительной системы), что подтверждается наиболее низкими значениями их КПД.

**Таблица 1.7 – Техническая характеристика магистральных каналов и межхозяйственных распределителей
Ростовской области**

[illegible]

Таблица 1.8 – Техническое состояние магистральных каналов Ставропольского края

Оросительная система	Площадь орошения, тыс. га	Год ввода	Наименование канала	Расход канала, м ³ /с	Протяженность, км	КПД канала	Техническое состояние*: надежное, удовлетворительное, неудовлетворительное
1	2	3	4	5	6	7	8
Большой Ставропольский канал (БСК)**	62,4	1969	Большой Ставропольский канал – 1, в том числе:	180,0	156,0		–
		1974	Магистральный БСК-2	60,0	64,4	0,8	удовлетворительное
		1981	Магистральный БСК-3	5,05	42,5	0,8	удовлетворительное
		1984	Магистральный БСК-4***	53,0	25,3	0,85	–
Право-Егорлыкская	89,1	1955	Магистральный Право-Егорлыкский канал (ПЕК)	45,0	127,0	0,75	удовлетворительное
		1957	Магистральный Левая ветвь ПЕК	23,0	230,0	0,75	удовлетворительное
Егорлыкская	13,4	1974	Магистральный Егорлыкский канал	13,0	77,3	0,75	удовлетворительное
Левое-Егорлыкская	11,5	1985	Магистральный канал ЛЕООС	31,0	10,0	0,85	удовлетворительное
		1986	Западная ветвь 1-я очередь	20,3	29,0	0,80	удовлетворительное
		1986	Западная ветвь 2-я очередь	12,0	13,6	0,80	удовлетворительное
Междуречье Кубань-Егорлыкская (МКЕ)	4,5	1975	Магистральный канал МКЕ	5,4	20,4	0,85	удовлетворительное
Невинномысская	3,1	1948	Невинномысский канал	75,0	49,2	0,75	удовлетворительное
Садово-Закумская	13,6	1974	Садовый канал	6,0	20,0	0,75	удовлетворительное
		1974	Закумский канал	3,6	8,5	0,75	удовлетворительное
Левуюкумская	14,9	1962	Левуюкумская ветвь Кумо-Манычского канала	22,0	55,2	0,75	удовлетворительное
Плаксейская	5,2	1939	Плаксейский канал	5,7	27,3	0,75	удовлетворительное
Кумская	7,2	1926	Кумский канал	2,0	22,0	0,75	удовлетворительное
Терско-Кумская	33,4	1929	Магистральный Левобережный	14,0	15,6	0,75	удовлетворительное

Продолжение таблицы 1.8

1	2	3	4	5	6	7	8
Архангельская	1,6	1976	Архангельский	1,5	6,8	0,75	удовлетворительное
Наурско-Шелковская	1,0	1960	Наурско-Шелковской канал	27,0	167,0	0,75	удовлетворительное
* Надежное – состояние, при котором сооружение можно эксплуатировать без разработки каких-либо мероприятий; удовлетворительное – состояние, при котором сооружение можно эксплуатировать при условии разработки необходимых мероприятий, повышающих безопасность его эксплуатации; неудовлетворительное (аварийное) – состояние, при котором сооружение нельзя эксплуатировать. ** На балансе Управления эксплуатации БСК. *** Строительство продолжается.							

Таблица 1.9 – Техническое состояние высоких насыпей на Большом Ставропольском и Право-Егорлыкском каналах Ставропольского края

Канал	Наименование ГТС	Характеристика ГТС			Техническое состояние
		Расход, м ³ /с	Напор на сооружении, м	Линейный размер, м	
Большой Ставропольский канал (БСК)	БСК-3 Высокая насыпь на 2 км	55,0	–	длина 1200	удовлетворительное
	БСК-2 Высокая насыпь на 25 км	60,0	–	длина 1600	удовлетворительное
Право-Егорлыкский канал	Право-Егорлыкский магистральный канал (ПЕК)	45,0	–	ширина по дну 8	удовлетворительное
	МК ПЕК Высокая насыпь «Терновочка»	37,0	–	высота 37	удовлетворительное
	МК ПЕК Высокая насыпь «Терновка»	37,0	–	высота 38	удовлетворительное

Таблица 1.10 – Техническое состояние магистральных каналов Краснодарского края

Наименование канала	Площадь орошения, тыс. га	Срок эксплуатации, лет	Расход канала, м³/с	Протяженность, км	КПД канала	Техническое состояние
1	2	3	4	5	6	7
Калининский филиал						
МК Понуро-Калинской ОС	17,360	28	96,0	42,4	0,80	удовлетворительное
Черноерковский филиал						
МК Черноерковской ОС	7,300	32	25,0	21,0	0,82	удовлетворительное
Краснодарский филиал						
МК Пригородной ОС	23,507	30	17,5	58,0	0,83	удовлетворительное
Петровско-Анастасиевский филиал						
МК Петровско-Анастасиевской ОС	35,668	45	80,0	18,96	–	неудовлетворительное
МК (хол. часть)	2,533	29	9,2	0,46	–	неудовлетворительное
МК (рабочая часть)	0,532	27	12,0	5,25	–	неудовлетворительное
Новокубанский филиал						
Новокубанский МК Верхне-Кубанской ОС	6,225	55	11,2	72	0,80	неудовлетворительное
Лабинский МК Лабинской ОС	6,630	57	5,0	2,8	0,80	неудовлетворительное
Константиновский	6,630	57	16,0	19,5	0,80	неудовлетворительное
Михайловский	6,630	57	3,0	4,8	0,80	неудовлетворительное
Родниковский	6,630	57	3,0	14	0,80	неудовлетворительное
Крымский филиал						
МК Варнавинской ОС	11,731	35	15,0	37,6	0,70	ПК0-ПК202 удовлетворительное; ПК202-ПК376 неудовлетворительное
Северский филиал						
МК-1 Крюковской ОС	0,997	33	22,0	1,67	0,82	надежное
МК-2 Крюковской ОС	0,997	33	5,6	3,94	0,82	удовлетворительное

Продолжение таблицы 1.10

1	2	3	4	5	6	7
Тихорецкий филиал						
Краснодарский МК Краснодарской ОС	20,606	23	30,0	65,1	–	удовлетворительное
Абинский филиал						
Фёдоровский МК Фёдоровской ОС	10,780	37	111,0	28,1	0,80	удовлетворительное
Красноармейский филиал						
МК Кубанской ОС	39,000	75	60,0	19,2	0,85	надежное
МК Марьяно-Чебургольской ОС	42,500	40	185,0	46,2	0,85	надежное
Понуро-Калининской ОС	2,600	28	70,0	25,4	0,80	надежное
Примечания 1 Магистральный канал Кубанской ОС построен в 1932 г. общей длиной 19,2 км с расходом в логове канала 60 м ³ /с. 2 При строительстве Марьяно-Чебургольской системы канал реконструирован на пропускную способность в голове канала 185 м ³ /с, его длина составила 46,2 км.						

Таблица 1.11 – Техническое состояние магистральных каналов Астраханской области

Оросительная система	Площадь орошения, тыс. га	Срок эксплуатации, лет	Тип канала	Расход канала, м³/с	Протяженность, км	КПД канала	Техническое состояние
Ахтубинский филиал							
Владимировская ОС	5,4	23	Магистральный канал	8	16,4	0,85	удовлетворительное
Бугровая ОС	2,6	20	Магистральный канал	7	3,9	0,85	удовлетворительное
Енотаевский филиал							
Ивановская ОС	0,6	35	Магистральный канал	1	17,6	0,6	неудовлетворительное
Никольская РОС	5,9	28	Магистральный канал	6,4	14,1	0,85	удовлетворительное
			Коллектор	0	11,9	0,7	неудовлетворительное
Камызякский филиал							
Камышовская ОС	2,2	39	Магистральный канал	0,5	13,2	0,5	удовлетворительное
Правобережный филиал							
Бешкульская ООС	2	44	Магистральный канал	30	204,6	0,6	удовлетворительное
Прикаспийская ООС	1,7	45	Магистральный канал	30	111,5	0,6	удовлетворительное
Харабалинский филиал							
Харабалинский водный тракт-1	2,4	28	Магистральный канал	12	36	0,77	удовлетворительное
Харабалинский водный тракт-2	3,3	31	Магистральный канал	7	19	0,77	удовлетворительное
Черноярский филиал							
КАРОС	8,7	29	Магистральный канал	10,8	7	0,75	удовлетворительное

2 НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОТНОШЕНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

2.1 Нормативно-правовая база обеспечения безопасности гидротехнических сооружений в Российской Федерации

Обеспечение безопасности ГТС в значительной степени зависит от законодательных нормативно-правовых и нормативных документов, регулирующих эти отношения.

В настоящее время обеспечение надежности и безопасности ГТС в Российской Федерации является серьезной проблемой, возникшей вследствие нерешенности комплекса правовых и нормативных вопросов. Около 5 % ГТС в стране находится в аварийном состоянии. По данным Росводресурсов за последние 5 лет имели место более 300 аварий ГТС, в основном это сооружения IV, частично III класса.

Накопленная информация об авариях ГТС в мире по данным Международной комиссии по большим плотинам до 1986 г. [4] свидетельствует о том, что среднегодовая частота разрушений в зависимости от типа плотин составила от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Сопоставляя эти данные с допускаемыми значениями риска аварий на напорных ГТС, принятых в СП 58.13330.2012 [2] для сооружений I и II класса, следует отметить, что они совпадают с российскими нормами. Значительное количество аварий плотин обусловило развитие в последнее время нормативно-правового регулирования безопасности ГТС во многих странах мира с развитой гидроэнергетикой и водным хозяйством [4].

Общая структурная схема законодательной и иной нормативно-технической и методической базы по обеспечению безопасности ГТС в Российской Федерации представлена на рисунке 2.1.

В Российской Федерации основным законодательным документом в области регулирования отношений по вопросам безопасности ГТС является Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [1].

В соответствии со статьями 4 и 5 Федерального закона № 117-ФЗ, ответственность за обеспечение безопасности ГТС (за исключением тех, которые находятся в муниципальной собственности) возлагается на федеральные органы исполнительной власти и на органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

Как указано в статье 7 Федерального закона № 117-ФЗ, ГТС вносятся в Российский реестр ГТС, который формируется и ведется в порядке, установленном Правительством Российской Федерации.

В статье 8 Федерального закона № 117-ФЗ сформированы общие требования к обеспечению безопасности таких объектов. К ним, в частности, относятся: установление допустимого уровня риска аварий ГТС; представление деклараций безопасности ГТС; осуществление федерального государственного надзора в области безопасности ГТС; непрерывность их эксплуатации; осуществление мер по обеспечению безопасности ГТС, в том числе установление критериев безопасности, оснащение техническими средствами в целях постоянного контроля за их состоянием; необходимость заблаговременного проведения комплекса мероприятий по максимальному уменьшению риска возникновения чрезвычайных ситуаций на ГТС.

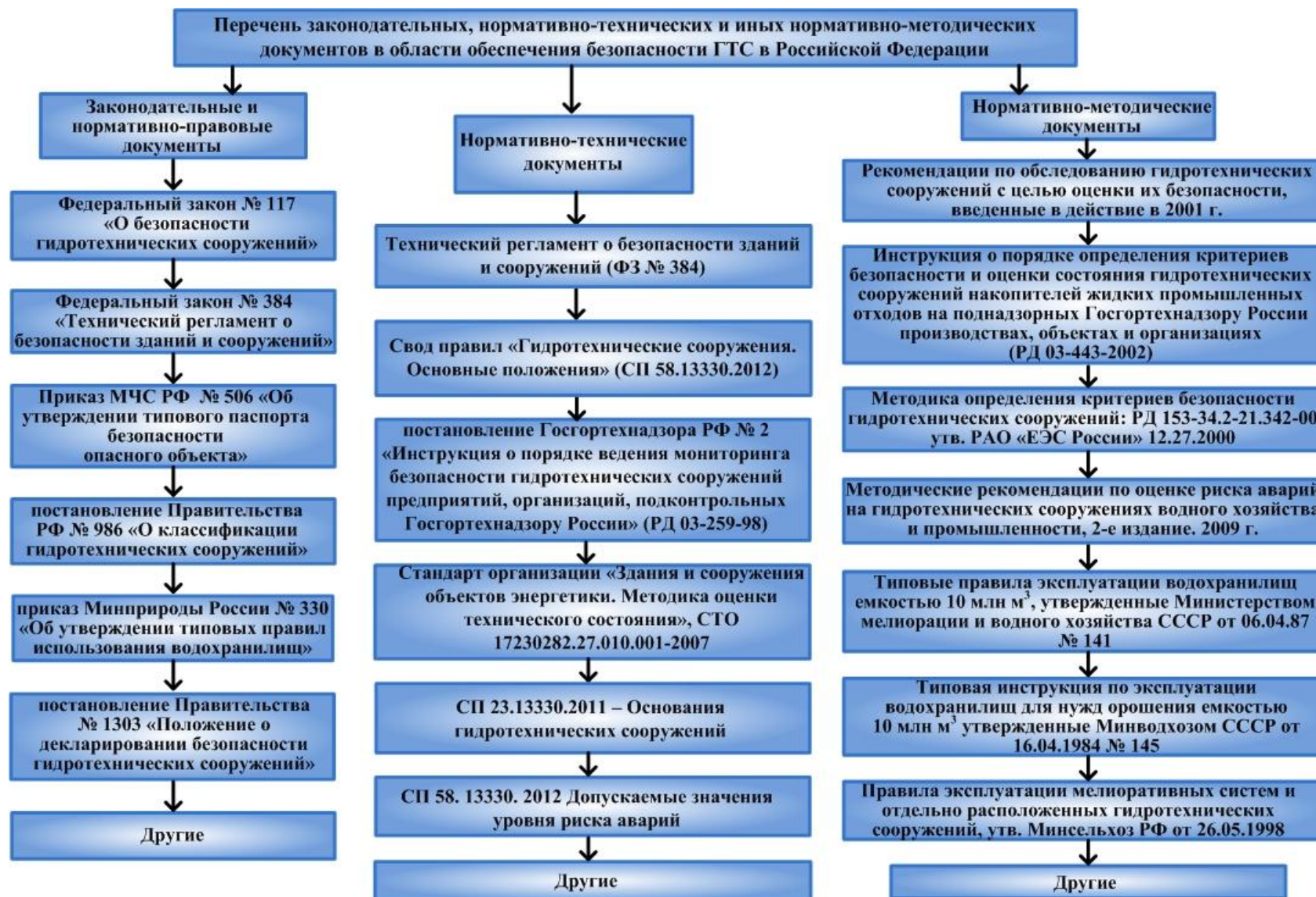


Рисунок 2.1 – Структурная схема законодательной и иной нормативно-технической и методической базы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений в Российской Федерации

Согласно статье 9 Федерального закона № 117-ФЗ, установлены обязанности собственника ГТС и (или) эксплуатирующей организаций. В данной статье собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организации обязаны: обеспечивать соблюдение обязательных требований при строительстве, капитальном ремонте, эксплуатации, реконструкции, консервации и ликвидации ГТС; обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности ГТС, а также правил его эксплуатации; проводить регулярные обследования ГТС; создавать финансовые и материальные резервы для ликвидации аварии сооружения.

В соответствии со статьей 10 Федерального закона № 117-ФЗ, собственник ГТС или эксплуатирующая организация составляют декларацию безопасности ГТС, которая является основным документом о соответствии ГТС критериям безопасности. Декларация о безопасности ГТС представляется в органы надзора за безопасностью таких сооружений, которая после экспертизы и утверждения является основанием для внесения в Регистр и получения разрешения на эксплуатацию ГТС.

В статьях 11–14 Федерального закона № 117-ФЗ рассматриваются экспертиза проектной документации ГТС, техническое расследование причин аварии, консервации и ликвидации ГТС, осуществление федерального надзора в области безопасности ГТС уполномоченными органами исполнительной власти в порядке, установленном Правительством Российской Федерации, а также осуществление проверок ГТС инспекционными комиссиями. При обнаружении ГТС, которое не имеет собственника, или собственник, который не известен, либо от права собственности на которое собственник отказался, проверка такого ГТС осуществляется органами государственного надзора.

В статьях 15–16 Федерального закона № 117-ФЗ устанавливается порядок обязательного страхования гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии ГТС, возмещение вреда жизни и здоровью граждан в результате аварии ГТС в виде компенсации, которую выплачивает эксплуатирующая организация или иной владелец сооружения. Как следует из статьи 18 Федерального закона, в случае, если затраты, необходимые для возмещения ущерба, причиненного в результате аварии ГТС, превышают размер финансового обеспечения, то порядок возмещения устанавливает Правительство Российской Федерации.

Однако в данном законе не рассматриваются особенности обеспечения надежности и безопасности отдельных категорий ГТС, в том числе сооружений IV класса. Вместе с тем, очевидно, что для ГТС IV класса, которые, как правило, являются низконапорными (с напором до 15 м), такие требования могут быть понижены.

К другим важным законодательным документам, касающимся безопасности ГТС, следует отнести Федеральные законы от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [5], от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [6], от 27.07.2010 № 225-ФЗ «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте» [7].

Так, в Федеральном законе № 384-ФЗ в статье 3 устанавливаются минимально необходимые требования к зданиям и сооружениям по механической безопасности, пожарной безопасности, безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиям и другие.

В статье 4 Федерального закона № 384-ФЗ к зданиям и сооружениям устанавливаются следующие уровни ответственности: повышенный, нормальный, пониженный.

Повышенный уровень ответственности относится к особо опасным, технически сложным или уникальным объектам; нормальный уровень ответственности – ко всем зданиям и сооружениям, за исключением повышенного и пониженного уровня ответ-

ственности; пониженный уровень ответственности – к зданиям и сооружениям временного (сезонного) назначения и вспомогательного использования.

В Федеральном законе № 68-ФЗ в статье 4 устанавливается единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, к основным задачам которой относится обеспечение защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, создание резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций, ликвидация чрезвычайных ситуаций и другие.

В статье 24 Федерального закона № 68-ФЗ устанавливается финансовое обеспечение предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: федерального и межрегионального характера, регионального и межмуниципального характера – как расходное обязательство Российской Федерации; муниципального характера – как расходное обязательство муниципального образования.

В Федеральном законе № 225-ФЗ в статье 3 отмечается, что объектом обязательного страхования являются имущественные интересы владельца опасного объекта, связанные с его обязанностью возместить вред, причиненный потерпевшим.

В соответствии со статьей 5 Федерального закона № 225-ФЗ к опасным объектам, владельцы которых обязаны осуществлять обязательное страхование, относятся расположенные на территории Российской Федерации: опасные производственные объекты, подлежащие регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов; гидротехнические сооружения, подлежащие внесению в Российский регистр гидротехнических сооружений и другие объекты.

На основании статьи 10 Федерального закона № 225-ФЗ договор обязательного страхования заключается в отношении каждого опасного объекта на срок не менее одного года. Документом, подтверждающим заключение договора обязательного страхования, является страховой полис.

Важным документом в области обеспечения надежности и безопасности ГТС мелиоративного назначения является постановление Правительства РФ от 12.10.2013 № 922 «О федеральной целевой программе «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» [8].

Федеральной целевой программой «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» предусматривается восстановление мелиоративного фонда страны. При этом ставится важная задача сокращения доли государственной собственности РФ в общем объеме мелиоративных систем и отдельно расположенных ГТС с 58,4 % до 40 %, а бесхозных объектов – с 34,7 % до 0 %. Проведение мероприятий по вовлечению в использование или ликвидации бесхозных мелиоративных объектов планируется за счет оформления права собственности на указанные объекты субъектами Российской Федерации, муниципальными образованиями и сельскохозяйственными товаропроизводителями.

В рамках проекта (составной части ФЦП) «Восстановление и повышение эффективности использования мелиоративных систем и отдельно расположенных ГТС государственной собственности Российской Федерации» предусматривается приведение в нормативное техническое состояние водохранилищ, плотин, водозаборов, каналов, водовыпусков, насосных станций, мостов, переездов, скважин, мелиоративных систем, обслуживающих одно-два хозяйства, находящихся в собственности Российской Федерации, но не имеющих федерального значения, с последующей передачей указанного имущества в собственность субъектам Российской Федерации, муниципальным образованиям или в аренду сельскохозяйственным производителям с правом последующего выкупа. Указанный комплексный проект направлен, в первую очередь, на повышение эксплуатационных качеств мелиоративных систем и отдельно расположенных ГТС государственной собственности и в большинстве своем имеющих двой-

ное назначение: обеспечение водными ресурсами земель сельскохозяйственного назначения и предотвращение чрезвычайных ситуаций на мелиоративных системах и отдельно расположенных ГТС.

В перечень объектов этого проекта включены, прежде всего, объекты, находящиеся в аварийном состоянии, и особо опасные объекты, а также объекты, реконструкция и техническое перевооружение на инновационной технологической основе которых обеспечит мелиорацию наибольшего количества гектаров существующих сельскохозяйственных угодий и вовлечет в оборот новые сельскохозяйственные угодья.

Второй комплексный проект ФЦП – «Развитие мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений собственности субъектов Российской Федерации, муниципальной собственности и собственности сельскохозяйственных товаропроизводителей» – направлен на приведение в нормативно-техническое состояние мелиоративных систем и отдельно расположенных ГТС для решения следующих задач:

- повышения водообеспеченности земель сельскохозяйственного назначения, предотвращения процессов подтопления, затопления и опустынивания территорий для гарантированного обеспечения продуктивности сельскохозяйственных угодий;
- достижения экономии водных ресурсов за счет повышения коэффициента полезного действия мелиоративных систем, внедрения микроорошения и водосберегающих аграрных технологий, использования на орошение животноводческих стоков и сточных вод с учетом их очистки и последующей утилизации отходов;
- сокращения доли государственной собственности Российской Федерации в общем объеме мелиоративных систем и отдельно расположенных ГТС.

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 05.05.2012 № 455 «О режиме постоянного государственного надзора на опасных производственных объектах и гидротехнических сооружениях» устанавливается постоянный государственный надзор на отдельных опасных производственных объектах и гидротехнических сооружениях [9].

Постоянный государственный надзор осуществляется Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору и ее территориальными органами. Режим постоянного государственного надзора предусматривает проведение уполномоченными должностными лицами органа надзора мероприятий по контролю за соблюдением юридическим лицом или индивидуальным предпринимателем, эксплуатирующим объект повышенной опасности, обязательных требований при эксплуатации объекта повышенной опасности, ведении технологических процессов и работ на данном объекте, в том числе при обслуживании, текущем ремонте, диагностике, испытаниях, освидетельствовании сооружений, технических устройств, средств и оборудования, применяемых на объекте повышенной опасности, осуществлении работ по капитальному ремонту, консервации и ликвидации объекта повышенной опасности, а также выполнение мероприятий по обеспечению промышленной безопасности, безопасности ГТС.

Помимо вышеуказанных законодательных документов по вопросам регулирования отношений в области обеспечения безопасности ГТС в Российской Федерации разработано большое количество нормативных правовых документов на уровне Правительства, Минэнерго, МЧС России, Ростехнадзора, Росприроднадзора, Минсельхоза России, Минприроды России и других ведомств, занимающихся эксплуатацией, контролем безопасности мелиоративных систем и ГТС, относящихся к государственной собственности РФ.

В ряде нормативных правовых документов [10–13] рассматриваются положения о федеральном надзоре в области безопасности ГТС, устанавливаются требования

к содержанию и форме декларации безопасности ГТС, категории сооружений, подлежащих декларированию, правила определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью и имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС; классификация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и классификация ГТС по степени опасности, вводится типовой паспорт безопасности опасного объекта, форма акта преддекларационного обследования ГТС; порядок формирования и регламент работы экспертных комиссий по проведению государственной экспертизе деклараций безопасности, порядок формирования и ведения Российского регистра ГТС, порядок разработки и требования к содержанию правил эксплуатации ГТС и др.

В приказе Ростехнадзора «Об утверждении формы декларации безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных гидротехнических сооружений)» [13], содержатся следующие разделы.

Первый раздел «Общая информация, включающая данные о ГТС и природных условиях района их расположения, меры по обеспечению безопасности, предусмотренные проектом, правилами эксплуатации ГТС и предписаниями федерального органа исполнительной власти, уполномоченного на осуществление федерального государственного надзора в области безопасности ГТС, сведения о финансовом обеспечении гражданской ответственности за вред, который может быть причинен в результате аварии ГТС, основные сведения о собственнике и эксплуатирующей организации» содержит основные сведения о собственнике и эксплуатирующей организации, данные о ГТС, природных условиях района их расположения, меры по обеспечению безопасности, предусмотренные правилами эксплуатации, проектом и предписаниями органа надзора.

Второй раздел «Анализ и оценка безопасности ГТС», включая определение возможных источников опасности, содержит: основные сведения, характеризующие безопасность ГТС, критерии безопасности, данные о соответствии ГТС водохранилища общим требованиям безопасности, условия возникновения аварий, дается оценка уровня безопасности (риск аварии).

Третий раздел «Сведения об обеспечении готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций» отображает готовность эксплуатирующего персонала к действиям в условиях возникновения возможных чрезвычайных ситуаций, наличие и состояние на объекте технических и иных средств для ликвидации возможных аварийных ситуаций, наличие на объекте в достаточном объеме необходимых резервов строительных материалов для оперативной локализации повреждений и аварийных ситуаций на ГТС.

В четвертом разделе «Порядок информирования населения, федерального органа исполнительной власти, уполномоченного на осуществление федерального государственного надзора в области безопасности ГТС, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и территориальных органов Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий о возможных и возникших на ГТС аварийных ситуациях» содержится порядок информирования населения, органов надзора и органов исполнительной власти, указано наличие и поддержание готовности локальной системы оповещения персонала ГТС и населения о возникновении чрезвычайной ситуации.

В пятом разделе «Заключение, включающее оценку уровня безопасности отдельных ГТС и комплекса ГТС объекта, а также перечень необходимых мероприятий по обеспечению безопасности» [13] представлена оценка уровня безопасности ГТС водохранилища (уровень определен, как нормальный) и перечень необходимых меро-

приятий по обеспечению безопасности ГТС в процессе эксплуатации.

В шестом разделе «Список источников информации» [13] приводится список источников, которые были использованы при составлении декларации безопасности ГТС.

Седьмой раздел включает приложения: обязательные документы, прилагаемые к декларации безопасности ГТС [13]:

- приложение 1 – Сведения о ГТС, необходимые для формирования и ведения Российского регистра ГТС, предусмотренные законодательством Российской Федерации о безопасности ГТС;

- приложение 2 – Акт преддекларационного обследования ГТС, составленный участниками обследования по форме, утвержденной Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации;

- приложение 3 – Расчет вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС водохранилища.

Документы, прилагаемые к декларации безопасности ГТС по усмотрению эксплуатирующей организации в целях обоснования безопасности ГТС:

- приложение 4 – Критерии безопасности гидротехнических сооружений;

- приложение 5 – Копия заключения Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий или его территориального органа о готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций и защите населения и территорий в случае аварии ГТС;

- приложение 6 – Ситуационный план с нанесенными границами территории ГТС, опасной и охранной зонами в масштабе и детализации, допустимый для открытого пользования и дающий представление о сооружениях;

- приложение 7 – Характерные продольные и поперечные разрезы ГТС и их оснований в масштабе и детализации, допустимые для открытого пользования и дающие представление о сооружениях;

- приложение 8 – План территории ГТС с прилегающими территориями, попадающими в зону затопления в случае прорыва напорного фронта, в масштабе и детализации, допустимый для открытого пользования;

- приложение 9 – Планы профессиональной и противоаварийной подготовки персонала, перечень необходимых мероприятий и требований по обеспечению безопасности ГТС;

- приложение 10 – Паспорт безопасности опасного объекта (ГТС);

- приложение 11 – Информационный лист, представляемый по запросам граждан и общественных организаций отдельно от декларации безопасности ГТС;

- приложение 12 – Проект мониторинга безопасности ГТС;

- приложение 13 – Инструкция по ведению мониторинга безопасности ГТС.

Кроме того, необходимо отметить немаловажный приказ Ростехнадзора от 21.03.2006 № 226 «Об усилении контроля за техническим состоянием гидротехнических сооружений поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору организаций» [14].

Согласно приказу от 27.09.2012 № 546 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору «Об утверждении рекомендаций к содержанию правил эксплуатации гидротехнических сооружений (за исключением судоводных гидротехнических сооружений)» [15], при составлении правил эксплуатации ГТС водохозяйственного комплекса необходимо придерживаться следующего содержания разделов:

- 1 Общие положения.
- 2 Документация, необходимая для нормальной эксплуатации (может содержать информацию о наличии).
- 3 Техническое обслуживание гидротехнических сооружений.
- 4 Основные правила технической эксплуатации гидротехнических сооружений.
- 5 Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений.

Наряду с этим в РФ приняты нормативные акты, регулирующие декларацию безопасности ГТС. Основным документ, который содержит сведения о соответствии сооружения критериям безопасности – Положение о декларировании безопасности гидротехнических сооружений» (постановление Правительства РФ от 06.11.1998 № 1303), с изменениями и дополнениями от 30.12.2008, 18.05.2012, 27.09.2012, 21.08.2014 [16].

Также необходимо отметить приказ Минсельхоза России от 22.10.2012 № 559 «Об утверждении Административного регламента Министерства сельского хозяйства Российской Федерации по предоставлению государственной услуги по паспортизации государственных мелиоративных систем и отнесенных к государственной собственности отдельно расположенных гидротехнических сооружений» [17].

Согласно данному приказу, административный регламент Министерства сельского хозяйства Российской Федерации по предоставлению государственной услуги по паспортизации государственных мелиоративных систем и отнесенных к государственной собственности отдельно расположенных ГТС устанавливает сроки и последовательность административных процедур (действий) по паспортизации мелиоративных систем и отнесенных к государственной собственности отдельно расположенных ГТС, а также порядок взаимодействия между структурными подразделениями министерства, его должностными лицами, взаимодействия министерства с заявителями, иными органами государственной власти и органами местного самоуправления, учреждениями и организациями при предоставлении государственной услуги.

В целях государственной регистрации и учета ГТС различного назначения, сбора, обработки, хранения, предоставления и распространения информации о количественных и качественных показателях состояния ГТС, условиях их эксплуатации, создания информационной основы для разработки и осуществления мероприятий по обеспечению безопасности ГТС и предупреждению чрезвычайных ситуаций, а также надзора в области безопасности ГТС в РФ ведется регистр ГТС, согласно приказа Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 января 2013 года № 34 «Об утверждении Инструкции о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений» [18].

В приведенной инструкции приводится состав и образцы форм представления сведений, вносимых в Российский регистр гидротехнических сооружений. Ведение Регистра осуществляет Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и Федеральная служба по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор) представляют в Росводресурсы материалы по поднадзорным объектам (информационные данные о поднадзорных ГТС).

В настоящее время правила эксплуатации водохранилищ регламентируются приказом Минприроды России от 24 августа 2010 г. № 330 «Об утверждении типовых правил использования водохранилищ» [19]. Данный документ, несомненно, требует актуализации и приведения в соответствии с законодательством РФ.

Приказ МЧС РФ от 4 ноября 2004 г. № 506 «Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта» [20] разрабатывается для решения следующих задач:

- определения показателей степени риска чрезвычайных ситуаций для персонала опасного объекта и проживающего вблизи населения;

- определения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций на опасном объекте;
- оценки возможных последствий чрезвычайных ситуаций на опасном объекте;
- оценки возможного воздействия чрезвычайных ситуаций, возникших на соседних опасных объектах;
- оценки состояния работ по предупреждению чрезвычайных ситуаций и готовности к ликвидации чрезвычайных ситуаций на опасном объекте;
- разработки мероприятий по снижению риска и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций на опасном объекте.

Паспорт безопасности опасного объекта [20] включает в себя следующие разделы:

- общая характеристика опасного объекта;
- показатели степени риска чрезвычайных ситуаций;
- характеристика аварийности и травматизма;
- характеристика организационно-технических мероприятий, обеспечивающих безопасность объекта и готовность к ликвидации чрезвычайных ситуаций.

К паспорту безопасности опасного объекта прилагаются ситуационный план с нанесенными на него зонами последствий от возможных чрезвычайных ситуаций на объекте, диаграммы социального риска (F/N-диаграмма и F/G-диаграмма), расчетно-пояснительная записка.

На ситуационный план объекта с прилегающей территорией наносятся зоны последствий от возможных чрезвычайных ситуаций и индивидуального (потенциально-го) риска. Построение изолиний риска осуществляется от максимально возможных значений до $10 \times 10^{(-7)} \text{ год}^{(-1)}$.

Кроме того, к паспорту прилагается расчетно-пояснительная записка, в которую включаются материалы, обосновывающие и подтверждающие показатели степени риска чрезвычайных ситуаций для персонала и проживающего вблизи населения, представленные в паспорте безопасности опасного объекта.

Одним из принципиальных вопросов является государственное регулирование отношений в области обеспечения безопасности ГТС и мелиоративных систем. При авариях, чреватых крупномасштабными социально-экономическими последствиями, неизбежно возникают правовые конфликты, устранение которых в силу значительных размеров ущерба, вызванных аварией, можно лишь на основе законов и предусмотренных ими нормативно-правовых актов.

Очень важным становится вопрос обеспечения безопасности при смене собственника ГТС. Перечисленные обстоятельства обуславливают необходимость разработки предложений по совершенствованию системы безопасности и эффективности функционирования ГТС мелиоративных систем.

Результатом этого станет повышение уровня безопасности для отдельных лиц, населения и окружающей среды при эксплуатации мелиоративных систем и ГТС, усиление готовности к предотвращению и ликвидации аварий.

2.2 Нормативно-технические и нормативно-методические документы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений в Российской Федерации

К основным нормативно-техническим документам в области безопасности ГТС относятся: Технический регламент о безопасности зданий и сооружений [5] и Свод правил «Гидротехнические сооружения. Основные положения» (СП 58.13330.2012) [2].

В Техническом регламенте устанавливаются минимально необходимые требования к зданиям и сооружениям по механической безопасности, пожарной безопасно-

сти, безопасности при опасных природных процессах, явлениях и техногенных воздействиях, безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях и сооружениях, безопасности для пользователей зданиями и сооружениями, доступности зданий и сооружений для инвалидов и других групп населения с ограниченными возможностями передвижения, энергетической эффективности зданий и сооружений, безопасного уровня воздействий зданий и сооружений на окружающую среду. Безопасность зданий и сооружений обеспечивается посредством установления соответствующих требованиям безопасности проектных значений параметров зданий и сооружений и качественных их характеристик в течение всего жизненного цикла в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта и поддержания состояния таких параметров и характеристик на требуемом уровне в процессе эксплуатации.

В Своде правил (СП 58.13330.2012) предусматривается, что при проектировании ГТС обеспечивается безопасность и надежность их на всех стадиях строительства и эксплуатации. При этом в проектной документации ГТС должны быть определены критерии безопасности и их количественные показатели, которые пересматриваются не реже одного раза в 5 лет.

В СП 58.13330.2012 также устанавливаются общие требования к безопасности ГТС на стадии строительства, в частности при пропуске строительных расходов воды и льда, при ведении строительных работ в зимний период. При эксплуатации ГТС для обеспечения их безопасности должен быть организован постоянный и периодический контроль (осмотры, технические освидетельствования, обследования) технического состояния сооружения, определены критерии безопасности и их количественные показатели с периодичностью не реже одного раза в 5 лет. Для речных ГТС безопасность обеспечивается при пропуске максимальных расходов через водосбросные сооружения в соответствии с проектной документацией, который не должен приводить к повреждению сооружения, а также к размыву дна и мог бы повлиять на устойчивость сооружений. Режим сработки водохранилища перед половодьем должен обеспечивать наполнение водохранилища в период половодья и паводка до нормального подпорного уровня.

Реконструкция постоянных ГТС производится для усиления основных сооружений и их оснований при превышении риска аварии из-за старения сооружения или увеличения внешних воздействий. Реконструкция ГТС должна производиться также при изменении нормативных требований в случае изменения условий эксплуатации (повышения сейсмичности района, изменения расчетного сбросного расхода и др.).

Обеспечение надежности системы «сооружение – основание» должно обосновываться результатами расчетов по методу предельных состояний их прочности, устойчивости. Для ГТС установлены допускаемые значения уровня риска аварий не более чем $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ 1/год в зависимости от класса сооружения.

Одним из наиболее важных нормативно-технических документов в области обеспечения безопасности ГТС в Российской Федерации является постановление Госгортехнадзора РФ «Об утверждении Методических рекомендаций по составлению проекта мониторинга безопасности гидротехнических сооружений на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях» [21], которые предусматривают рекомендуемый порядок разработки, утверждения и состав проектной документации по мониторингу безопасности ГТС. Документ не содержит сведений об организации мониторинга на ГТС мелиоративного назначения и полностью ориентирован на объекты промышленности. На большинстве сооружений IV класса отсутствует контрольно-измерительная аппаратура, наблюдения ведутся визуально. В этом случае собственник ГТС руководствуется СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов». Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84 [22].

Кроме того, необходимо отметить следующий немаловажный документ – Стандарт организации (СТО 17230282.27.010.001-2007) «Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния» [23], в котором приводятся термины и определения, сформулированные с учетом специфики эксплуатации зданий и сооружений. Необходимо выделить следующие термины: нормативный уровень технического состояния, исправное состояние, работоспособное состояние, ограниченно работоспособное состояние, неработоспособное (предельное, аварийное) состояние, а также – безопасность ГТС, декларация безопасности ГТС, оценка безопасности ГТС, авария ГТС, риск аварии ГТС, допускаемый уровень риска аварии ГТС, анализ риска аварии ГТС, оценка риска аварии и обеспечение безопасности ГТС.

Кроме этого, в целях обеспечения работоспособного и безопасного состояния ГТС в СТО 17230282.27.010.001-2007 представлены общие требования к выполнению контрольных наблюдений и обследований ГТС, включающие визуальные и инструментальные наблюдения за состоянием ГТС, а также методику по определению критериев безопасности ГТС (критериальных значений K_1 и K_2 показателей состояния ГТС).

Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений [24] содержат основные положения по эксплуатации оросительных систем, головных водозаборов. Документ активно используется Ростехнадзором при проведении плановых проверок ГТС мелиоративного назначения, однако содержит ряд избыточных требований. Так, например, в п. 5.2.3 сказано, что на головном водозаборном гидроузле должен быть следующий комплект документации:

- комплекты технического (технорабочего) проекта, рабочих и исполнительных чертежей;
- акты пусковых испытаний сооружений и оборудования, акты на скрытые работы;
- инструкция по технической эксплуатации гидроузла, разработанная проектной организацией;
- должностные инструкции эксплуатационного персонала, утвержденные руководством службы;
- генплан гидроузла с показанием всех сооружений, контрольных створов, геодезических знаков, измерительных устройств и др.;
- графики пропускной способности водопропускных отверстий гидроузла, графики связи расходов водного объекта с уровнями воды в нижнем бьефе узла;
- схема маневрирования затворами водопропускных отверстий гидроузла в связи с величинами расходов воды в водном источнике и водоподачи в канал;
- технические паспорта сооружений, входящих в состав гидроузла;
- график подачи воды в систему;
- оперативные журналы приемки и сдачи дежурств, регистрации наблюдений за уровнями и расходами воды, отказов и дефектов в работе узла, результатов осмотров, наблюдений, ревизий и др.

Типовая инструкция по эксплуатации водохранилищ для нужд орошения емкостью 10 млн м³ [25] в части эксплуатации отдельно расположенных ГТС практически повторяет Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений. Однако в п. 1.1 указано, что инструкция распространяется и на проектирование, а это не соответствует действующим на сегодняшний день нормам. Преимуществом данного документа является детальная проработка вопросов эксплуатации в зимнее время и при пропуске паводков.

Типовые правила эксплуатации водохранилищ емкостью до 10 млн м³ и более [26] содержат правила эксплуатации водохранилищ, правила эксплуатации ГТС. Особо внимание более половины документа посвящено проведению визуальных и ин-

струментальных наблюдений на ГТС. В документе сказано, что он также распространяется на пруды-накопители сточных вод, однако такие сооружения в большинстве своем относятся к объектам промышленности, и в настоящее время при их эксплуатации необходимо руководствоваться Правилами безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02).

Типовая инструкция по технической эксплуатации речных плотинных водозаборов оросительных систем [27] – наиболее важный документ, требующий актуализации. Документ содержит правила эксплуатации, организацию службы эксплуатации. На сегодняшний день отсутствуют какие-либо правила, регламентирующие работу подобных сооружений.

Инструкция о порядке ведения мониторинга безопасности ГТС предприятий, организаций, подконтрольных органам Госгортехнадзора России [28], определяет цели, задачи, функции и структуру мониторинга безопасности ГТС промышленных предприятий, организаций, а также устанавливает порядок его осуществления при их эксплуатации. Мониторинг осуществляется с целью обеспечения постоянного контроля за состоянием безопасности ГТС и их воздействием на окружающую среду, предотвращения возникновения аварийных ситуаций и создания условий для безопасной эксплуатации. Инструкция требует актуализации и приведения в соответствие с ГОСТ Р 22.1.11-2002 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования».

Следует отметить, что в межгосударственном нормативном документе более высокого уровня ГОСТ 31937-2011 [29] установлены следующие категории технического состояния зданий и сооружений: нормативное, работоспособное, ограниченно-работоспособное и аварийное.

Здесь вместо трех эксплуатационных состояний (по РД 03-443-02 [30]) введено уже четыре категории. По существу, три категории состояния по ГОСТ Р 31937-2011 и РД 03-443-02 близки между собой: работоспособное-надежное (работоспособное); ограниченно-работоспособное – удовлетворительное (частично неработоспособное); аварийное-предаварийное (предельное). В основном отличие ГОСТ 31937-2011 заключается во введении четвертой категории с нормативным техническим состоянием, при котором количественные и качественные значения параметров всех критериев оценки технического состояния соответствуют установленным в проектной документации значениям.

Таким образом, проведенный в данном пункте анализ действующих методик определения критериев безопасности ГТС позволяет делать вывод о необходимости их совершенствования и переработки применительно к ГТС IV класса водохозяйственного комплекса. Существующие документы в этой области предназначены для других отраслей и не учитывают особенности эксплуатации низконапорных ГТС водохозяйственного назначения. Вместе с тем имеются расхождения в основных нормативных документах по безопасности в РД 03-443-02 [30] и РД 153-34.2-21.342-00 [31] по наименованию категорий эксплуатационного состояния ГТС, что объясняется их ведомственным назначением, а также при сравнении их с ГОСТ 31937-2011. По-видимому, указанные расхождения в наименовании и трактовке эксплуатационного состояния ГТС могут быть устранены путем разработки единого нормативного документа федерального значения.

Основные материалы, отражающие современное состояние ГТС мелиоративных систем, и предложения по повышению их надежности и экологической безопасности изложены в информационном сборнике «Современное состояние и пути повышения надежности и экологической безопасности эксплуатации мелиоративных систем» [32].

В данном сборнике приводятся также основные положения правил эксплуатации отдельно расположенных ГТС, количественные и качественные показатели надежности и безопасности гидромелиоративных систем, пути повышения надежности и экологической безопасности функционирования гидромелиоративных систем, включающие перспективы развития мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России на 2014–2020 годы.

Для оценки безопасности эксплуатируемых, строящихся ГТС всех классов и видов (бетонных, железобетонных, грунтовых) могут быть использованы Рекомендации по обследованию гидротехнических сооружений с целью оценки их безопасности [33]. Данные рекомендации могут быть учтены при обследовании ГТС перед составлением деклараций безопасности, а также при проведении эксплуатационного контроля за состоянием ГТС.

Одним из используемых методов оценки риска аварий ГТС IV класса является метод ФГУП ВНИИ ВОДГЕО [34], который апробирован и уже применяется более 15 лет для объектов водного хозяйства. Ввиду его относительной простоты, поскольку он базируется на экспертных оценках, этот метод нашел применение на ГТС IV класса.

Этот метод предназначен для экспертной оценки риска аварий ГТС при декларировании их безопасности, экспертизе декларации безопасности, страховании рисков аварий и формировании Российского регистра ГТС.

В основу метода положен принцип сопоставления всей совокупности факторов, влияющих на надежность и безопасность ГТС, включая возможный ущерб при аварии.

Оценка риска аварий ГТС осуществляется по результатам рассмотрения большого объема материалов, включая:

- данные инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрологических, топографических и природно-климатических изысканий;
- рабочий проект со всеми внесенными в него изменениями;
- исполнительную документацию, включая акты на скрытые работы;
- правила использования водных ресурсов водохранилищ;
- инструкцию по эксплуатации с регламентацией должностных обязанностей обслуживающего персонала, технологической схемы работы сооружений;
- инструкцию по проведению натурных наблюдений, данные о составе и состоянии контрольно-измерительной аппаратуры и ее соответствии проекту, материалы наблюдений за состоянием ГТС;
- данные геотехнического контроля, осуществляемого в процессе строительства и в период эксплуатации, о фактических на момент оценки риска аварии ГТС физико-механических и фильтрационных характеристиках материалов сооружения и основания;
- акты инспекторских проверок и комиссионных обследований состояния ГТС, расследований, имевших место повреждений и аварий;
- результаты поверочных расчетов пропуска паводков и, при необходимости, устойчивости откосов, фильтрационных, волновых и др. расчетов;
- результаты расчетов волны прорыва и оценки возможного ущерба;
- данные о службе и уровне эксплуатации ГТС (укомплектованность и квалификация штатов, наличие необходимых методических материалов, регулярность обследований состояния ГТС и проведения текущих ремонтов, привлечение к наблюдениям специализированных организаций и пр.);
- данные о готовности объекта к локализации и ликвидации аварийных ситуаций (наличие плана ликвидации аварий по возможным сценариям, укомплектованность и оснащенность аварийных бригад и привлекаемых в случае необходимости формирований государственной обороны инструментами и техникой, наличие и дос-

таточность противоаварийного запаса материалов, регулярности противоаварийных тренировок, наличие и состояние средств связи и системы оповещения и т. п.).

Метод предполагает интегральную оценку состояния ГТС по трем степеням: опасности, уязвимости и риска аварии, каждое из которых является достаточно сложной функцией многих факторов [35].

К основным методикам определения критериев безопасности ГТС, которые имеют статус нормативных документов и используются при разработке деклараций безопасности относятся: Инструкция о порядке определения критериев безопасности и оценки состояния гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и организациях [30] (далее – Инструкция) и Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений [31] (далее – Методика).

В Инструкции введены новые на тот период понятия, непосредственно характеризующие безопасность ГТС, а именно: контролируемые показатели, критерии безопасности 1-го и 2-го уровней, а также категории эксплуатационного состояния ГТС.

Данная Инструкция применяется при проектировании, строительстве, вводе с эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации ГТС организациями, осуществляющими разработку, утверждение и применение критериев безопасности ГТС I–IV класса, а также при оперативном контроле за состоянием строящихся и эксплуатируемых ГТС, при обработке и анализе натурных наблюдений, при разработке проектной документации мониторинга безопасности ГТС, при составлении декларации безопасности ГТС, при комплексной оценке состояния безопасности накопителей промышленных отходов и стоков.

Инструкция определяет основные понятия, регламентирует последовательность действий при выборе контролируемых показателей эксплуатационного состояния ГТС, закладываемых в проект, на стадии эксплуатации (вводе и выводе из эксплуатации), при определении критериев безопасности ГТС, определяет порядок разработки и утверждения критериев безопасности ГТС накопителей жидких промышленных отходов.

Для ГТС устанавливается два уровня безопасности в виде количественных и качественных показателей состояния и условий эксплуатации.

При специальном обосновании допускается устанавливать один уровень критериев безопасности, определяемых по количественным показателям безопасность при основном сочетании нагрузок.

Недостатками представленных контролируемых количественных и качественных показателей следует считать отсутствие их систематизации по группам и по отдельным элементам сооружения, а также полное несоответствие количественных и качественных показателей между собой (применительно к отдельным элементам ГТС), что затрудняет их использование при оценке по критериям безопасности 1-го и 2-го уровней.

Другой документ (Методика РД 153-34.2-21.342-00) [31] по определению критериев безопасности ГТС рекомендуется к обязательному применению на объектах энергетического комплекса при разработке, утверждении и применении критериев безопасности ГТС всех классов.

В Методике вводится два уровня критериальных значений диагностических показателей состояния сооружений K_1 и K_2 :

- K_1 – первый (предупреждающий) уровень значений диагностических показателей, при достижении которого устойчивость, механическая и фильтрационная прочность ГТС, его основания, а также пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений еще соответствует условиям нормальной эксплуатации;

- K_2 – второй (предельный) уровень значений диагностических показателей, при

превышении которых эксплуатация ГТС в проектных режимах недопустима.

Анализ Методики показывает, что он рекомендуется к обязательному применению только для ГТС энергетики, т. е. в область применения не входят ГТС водохозяйственного комплекса.

Два уровня критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС практически совпадают с Инструкцией РД 03-443-02, где установлены критерии безопасности 1-го и 2-го уровня. Так же как и в РД 03-443-02, в Методике [31] установлены три эксплуатационных состояния ГТС, но наименование их отличается: вместо надежного (работоспособного) состояния – нормальное, вместо удовлетворительного (частично работоспособного) – потенциально опасное, вместо предаварийного (предельного) состояния – предаварийное. По-существу, эти наименования являются близкими, поэтому они не меняют сути указанных трех эксплуатационных состояний ГТС.

В отношении возможности применения для сооружений IV класса по Методике только одного уровня критериальных значений K_2 отметим следующее. Поскольку при сравнении контролируемых диагностических показателей с предельными значениями для установления трех эксплуатационных состояний необходимо определять как количественные, так и качественные показатели именно для двух критериев K_1 и K_2 . Определение значения только для критерия K_2 позволяет установить только предаварийное эксплуатационное состояние, а другие два состояния – нормальное и потенциально опасное – возможно лишь установить по критерию K_1 .

Проведенный обзор отечественных законодательных и иных нормативно-правовых документов в области обеспечения безопасности ГТС свидетельствует о том, что в нашей стране уделяется большое внимание вопросам обеспечения безопасности ГТС и вопросам регулирования отношений в этой области.

Большинство законодательных и нормативно-методических документов касаются ГТС всех отраслей, в том числе водохозяйственного комплекса. Однако нормативно-методических документов в области обеспечения безопасности ГТС незначительное количество, они приняты более 15–30 лет назад и в настоящее время устарели и, следовательно, ряд из них нуждается в актуализации.

В связи с тем, что нормативно-правовых документов по вопросам обеспечения безопасности ГТС мелиоративного назначения недостаточно, необходима переработка существующих документов и разработка новых.

2.3 Нормативно-правовая и нормативно-методическая база обеспечения безопасности гидротехнических сооружений за рубежом

Вопросы обеспечения безопасности ГТС регулируются различными правовыми и нормативными документами не только в Российской Федерации, но и во многих странах мира.

Так, Всемирным банком выполнен сравнительный аналитический обзор нормативно-правовой базы обеспечения безопасности плотин в 22 странах мира, который опубликован известными специалистами в этой области: профессором Дэниэл Брэдлоу, ведущим специалистом по плотинам Александро Пальмиери и ведущим советником по юридическим вопросам М. А. Салман [4].

Анализ нормативно-правовой базы обеспечения безопасности плотин представлен по четырем категориям: правовая и организационная форма регулирования отношений в законодательной сфере, полномочия регламентирующего органа, содержание нормативно-правовых актов, обеспечивающих безопасность плотин.

Общая структурная схема законодательной и иной нормативно-методической базы по обеспечению безопасности ГТС за рубежом представлена на рисунке 2.2.

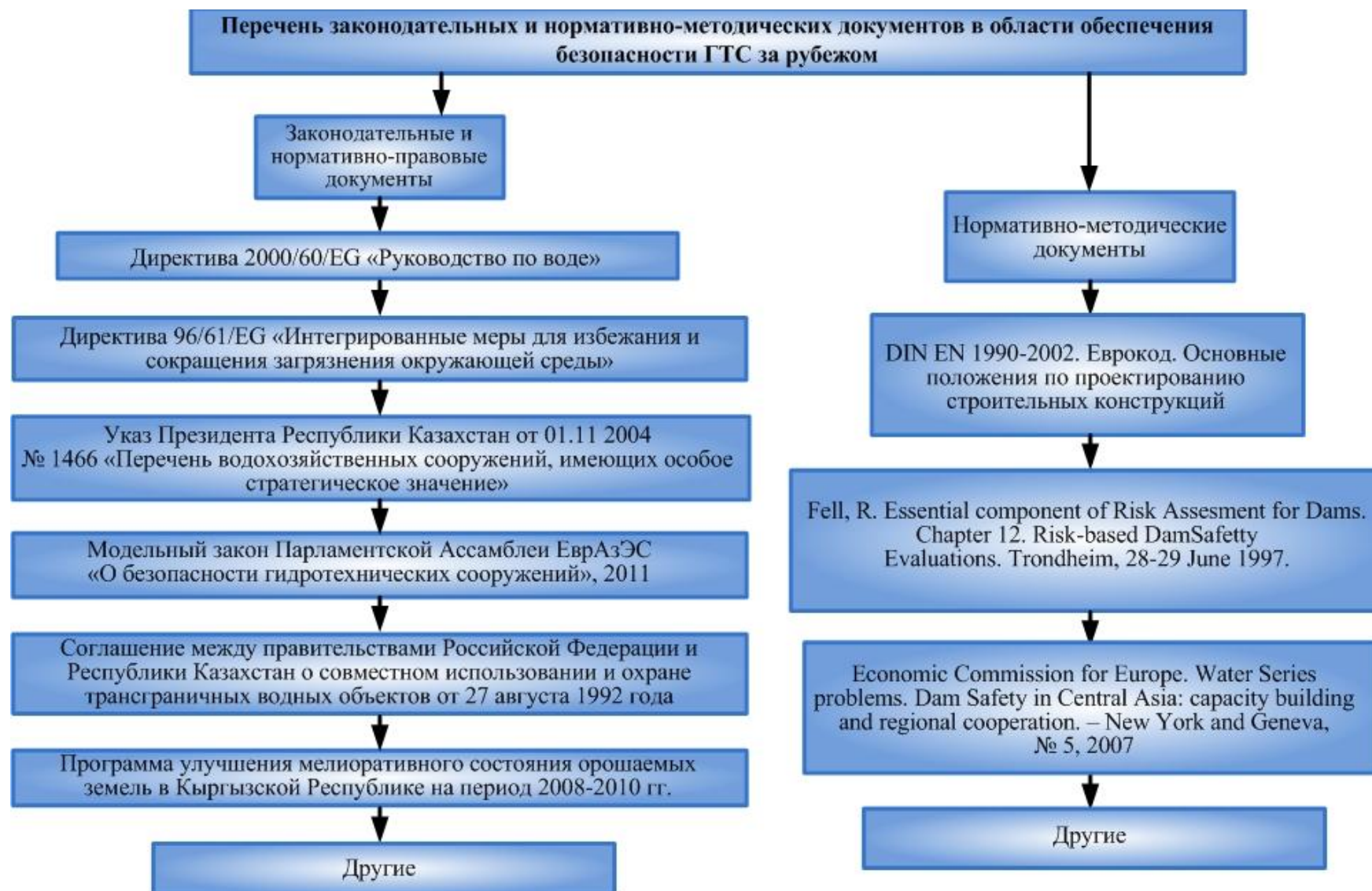


Рисунок 2.2 – Общая структурная схема законодательной и иной нормативно-методической базы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений за рубежом

Вопросы безопасности плотин в двадцати странах (Австралия, Канада, Финляндия, Франция, Латвия, Мексика, Новая Зеландия, Норвегия, ЮАР, Швейцария, США) представлены в общем законодательстве по водному хозяйству, плотинам, энергетике или природным ресурсам. В некоторых странах (Аргентина, Канада, Китай, Финляндия, Франция, Индия, Мексика, Португалия, ЮАР, Испания, Швейцария, США) помимо основного законодательного документа обеспечение вопросов безопасности осуществляется на основе специального законодательства.

В десяти странах созданы органы, которые самостоятельно занимаются исключительно вопросами безопасности плотин (Аргентина, Австрия, Австралия, Канада, Китай, Франция, Индия, Португалия, Румыния, США). В частности в Китае – Министерство водных ресурсов, Государственная энергетическая корпорация, Центр надзора за безопасностью больших плотин (ЦНББП); в Финляндии – Региональные природоохранные центры под руководством Министерства сельского и лесного хозяйства; во Франции – Главная служба контроля; в США – Межведомственный Комитет по Безопасности плотин, основной задачей которого является оказание помощи в разработке и осуществлении эффективных программ, комплексов мероприятий и рекомендаций на уровне федерального центра и штатов, а также между федеральными ведомствами.

В России контроль и надзор за соблюдением безопасности ГТС осуществляют: Ростехнадзор – в отношении гидротехнических сооружений, за исключением судоходных и портовых сооружений; Ространснадзор – в отношении судоходных и портовых сооружений [13].

В полномочия регламентирующих органов Российской Федерации входит [36]:

1 Право на разработку стандартов и норм. Такими же полномочиями наделены регламентирующие органы Аргентины, Австралии, Австрии, Канады, Китая, Финляндии, Франции, Латвии, Мексики, Новой Зеландии, Португалии, Румынии, Испании и США.

2 Ведение регистров плотин. Такими же полномочиями наделены регламентирующие органы Великобритании, Франции, ЮАР, Испании и США.

В ряде зарубежных стран регламентирующие органы наделены дополнительными правами: выдача лицензий или разрешений на осуществление деятельности, связанной со строительством и эксплуатацией плотин; осуществление мониторинга и инспекций, проводимых собственниками плотин.

Практически во всех рассматриваемых странах, в том числе и в России, нормативно-правовые акты регулируют вопросы строительства, эксплуатации, обслуживания объектов и надзора за их состоянием, обеспечения надежности и безопасности ГТС.

В тринадцати странах (Канада, Китай, Финляндия, Франция, Индия, Ирландия, Мексика, Норвегия, ЮАР, Испания, Швейцария, Великобритания, США), как и в Российской Федерации, основные обязанности в области безопасности плотин и проведение инспекций возлагаются на собственников плотин. В семи странах (Австрия, Канада, Финляндия, Латвия, Норвегия, Румыния, США) в обязанностях собственников плотин четко прописано, что именно они несут основную ответственность за безопасность объектов.

Законодательство пятнадцати стран (Австрия, Австралия, Великобритания, Канада, Финляндия, Франция, Индия, Ирландия, Норвегия, Португалия, Румыния, ЮАР, Испания, Швейцария и США) предусматривает проведение регулярных инспекций.

В соответствии с законодательством семнадцати стран (Аргентина, Австралия, Австрия, Великобритания, Канада, Финляндия, Франция, Индия, Ирландия, Латвия, Мексика, Норвегия, Румыния, ЮАР, Испания, Швейцария, США) собственники либо

операторы плотин, а также лица, которым поручено провести инспекцию безопасности таких объектов, обязаны представить отчет о проверке в орган государственного регулирования [37].

В шести странах (Австралия, Канада, Новая Зеландия, Норвегия, ЮАР и США) органу государственного надзора разрешено налагать штрафы на собственников плотин, не выполняющих обязанности, установленные нормативными актами. Размеры указанных штрафов могут колебаться от нескольких сот до нескольких тысяч долларов США.

В Германии Федеральное правительство отвечает за основное законодательство и национальные задачи в области водного хозяйства. На отраслевое министерство, Федеральное министерство окружающей среды, охраны природы и безопасности реакторов, возложена охрана водоемов, на Федеральное министерство экономики – водоснабжение и промышленное обеспечение водного хозяйства [38].

Министерства располагают специальными службами, например, Федеральной службой окружающей среды, Федеральной службой водной среды, и подрядчиками, как Координаторами проектов по водным технологиям [39].

Определение стандартов при эксплуатации ГТС в Германии структурировано на федеральном уровне. Вышестоящими являются требования европейских правовых актов, это особенно: Директива 2000/60/EG «Руководство по воде», Директива 96/61/EG «Интегрированные меры для избежания и сокращения загрязнения окружающей среды» [39].

Формы осуществления государственного надзора в странах Центральной Азии (Казахстан, Узбекистан, Таджикистан, Кыргызстан, Туркменистан) весьма разнообразны и отражают особенности гражданского законодательства, административного деления и структуры органов исполнительной власти [40].

В регионе находятся ряд крупных гидроузлов и ирригационных каналов: Каракуский, Большой Андижанский, Большой Ферганский и другие, а также современные оросительные системы с машинным водоподъемом. Крупные ГЭС с водохранилищами: Нурекская на р. Вахш в Таджикистане, Токтогульская на р. Нарын в Кыргызстане, Чарвакская на р. Чирчик.

В ряде стран Центральной Азии – Казахстане, Узбекистане, Таджикистане, Киргизстане и Туркменистане – создана двухуровневая структура органов надзора, состоящая из центральных и территориальных учреждений, образуемых в территориально-административных единицах. Полномочия этих органов определены законодательством в зависимости от категории (класса) опасности ГТС. Критерии отнесения ГТС к категориям опасности являются признаками идентификации ГТС [40].

Сфера действия законодательства по безопасности водохозяйственных систем обычно распространяется на все этапы их жизненного цикла. Законодательство государств региона о безопасности ГТС состоит из государственных законодательных актов, подзаконных правовых актов или нормативных актов административных образований.

Большинство ГТС имеет значительный срок эксплуатации, что обуславливает определенные риски их безопасности и необходимость осуществления системного мониторинга за состоянием сооружений, проведения своевременных превентивных мероприятий.

Так, в Казахстане отсутствует специальное законодательство по обеспечению безопасности ГТС. Основной правовой базой в этой области является Водный кодекс. Кроме того, отдельные положения, относящиеся к обеспечению безопасности плотин, включены в общее законодательство по чрезвычайным ситуациям (ЧС) природного и

техногенного характера, гражданской обороне (ГО), промышленной безопасности на опасных производственных объектах [41].

Комитетом по водным ресурсам в 2008 году был подготовлен проект закона «О безопасности гидротехнических сооружений». Правительство с учетом рекомендаций межведомственной комиссии по законопроектной работе приняло решение о нецелесообразности принятия отдельного закона, и положения законопроекта были внесены в виде поправок в Водный кодекс, принятый в начале 2009 года.

Практика применения положений Водного кодекса по вопросам обеспечения безопасности ГТС в течение почти двух лет показала, что необходимо вернуться к рассмотрению возможности принятия отдельного закона по обеспечению безопасности ГТС.

В Республике Казахстан ГТС являются наиболее распространенными типами сооружений с весьма важными функциями, оказывающими большое влияние на экономику, экологическую и социальную сферу. Поэтому вопрос безопасной и надежной эксплуатации этих сооружений приобретает особую актуальность, от надежности этих сооружений во многом зависит программа экономического развития страны [41].

Необходимость нормативно-правового регулирования вопросов безопасности ГТС определяется крупномасштабными социально-экономическими последствиями от возможных их аварий и разрушений. Гидротехнические сооружения в основном размещены в экономически развитых и густонаселенных регионах, определяют их инфраструктуру. Поэтому социальные последствия и материальный ущерб от их повреждений или разрушений, главным образом за счет воздействия волны прорыва катастрофичны, чем при авариях других инженерных сооружений. Человеческие жертвы и материальный ущерб при авариях современных ГТС сопоставимы с последствиями природных катаклизмов.

В соответствии с Водным кодексом Республики Казахстан, Указом Президента Республики Казахстан от 01.11.2004 № 1466 определен перечень водохозяйственных сооружений, имеющих особое стратегическое значение [41]. В перечень включены 57 водохранилищ и 29 водоподпорных ГТС. В соответствии со статьей 25 Кодекса данные объекты не могут быть переданы в аренду, доверительное управление и не подлежат приватизации.

Строительство и возведение многих ГТС пришлось на 60–80-е годы прошлого столетия. Длительный срок эксплуатации, а также снижение в последние 20 лет объемов финансирования на эксплуатационные расходы, проведение текущих и капитальных ремонтов, влияние климатических и сейсмических воздействий в местах расположения постепенно приводят к моральному и физическому износу всего комплекса ГТС. Есть среди них и объекты, расположенные неподалеку от вредных производств.

Трагические события весной 2009 года в Алматинской области с человеческими жертвами и разрушениями, а также наводнения в других регионах Казахстана послужили серьезным уроком по недопущению подобных ситуаций в дальнейшем. После этого стала очевидной необходимость проведения полного комплексного обследования всех объектов водного хозяйства республики и ведение постоянного мониторинга за техническим состоянием ГТС.

Основным законом в области обеспечения безопасности плотин в Кыргызстане является Водный кодекс, принятый в 2005 году [42]. Водный кодекс, впервые в законодательной практике Кыргызстана, включает положения о чрезвычайных ситуациях и безопасности плотин.

Вопросы, относящиеся к безопасности плотин, собраны в главе 12 Водного кодекса. Статья 75 возлагает ответственность за безопасность плотин, их безопасную

эксплуатацию и техническое обслуживание, а также за причиненный ущерб в результате ненадлежащей эксплуатации плотин на владельцев и пользователей плотин.

Статья 76 предусматривает классификацию всех плотин, включая плотины гидроэнергетического назначения, по трем категориям: плотины республиканского значения, плотины бассейнового значения и плотины районного значения. Подготовлены предложения по классификации плотин по таким критериям, как высота плотины, объем водохранилища, риск для населения и имущества, а также размер возможного ущерба и возможного изменения качества воды в случае разрушения плотины.

Учитывается и межгосударственное значение плотины, т. е. ее влияние на режим речного стока для нижележащих по течению реки стран, если плотина находится на трансграничном водотоке. Все плотины межгосударственного значения относятся к высшей категории значимости – плотинам республиканского значения.

В Кыргызстане собственником плотин гидроэнергетического назначения и ГЭС является Государственный комитет имущества, как основной держатель акций объектов энергетики, переданных в управление ОАО «Электрические станции».

Плотины ирригационного назначения являются также государственной собственностью и переданы в управление Департамента водного хозяйства Министерства сельского, водного хозяйства и перерабатывающей промышленности (Депводхоз МСВХПП) [42].

С принятием Водного кодекса повысилась ответственность владельцев плотин за их техническое состояние и надлежащий уровень эксплуатации.

В Таджикистане в конце 2010 года был принят закон о безопасности плотин и других ГТС, в его основе лежит модельный закон о безопасности ГТС [4]. Кроме того, положения, касающиеся этой сферы, отражены в различных нормативно-правовых актах.

Наиболее важным из них является Водный кодекс, принятый в 2000 году. Этот документ регулирует условия размещения, проектирования, строительства и ввода ГТС в эксплуатацию (статьи 14, 17, 18). Стимулом для обеспечения безопасности плотин и других ГТС является выдача разрешений на специальное водопользование (статьи 32, 39, 44).

Статьями 45 и 129 установлены обязанности по исправному содержанию сооружений и не нанесению ущерба, предупреждению и ликвидации последствий аварий и стихийных бедствий. Статьей 84 регламентированы права и обязанности предприятий гидроэнергетики по обеспечению устойчивости сооружений, их безаварийной технической эксплуатации. Порядок эксплуатации водохранилищ определяется правилами, утверждаемыми для каждого водохранилища, каскада или системы водохранилищ (статья 105) [4].

Организация и координация мероприятий, обеспечивающих надлежащее техническое состояние и благоустройство водохранилищ, а также контроль за соблюдением правил их эксплуатации, осуществляется в порядке, установленном Правительством Республики Таджикистан (статья 106). В данное время эти функции возложены на Министерство мелиорации и водных ресурсов (Минводхоз), Министерство энергетики и промышленности, энергокомпанию «Барки Точик», областные и территориальные управления водного хозяйства по принадлежности плотин, а также Управление государственного надзора за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Правительстве Республики Таджикистан (Госгортехнадзор).

Мероприятия по предупреждению и ликвидации последствий аварий и

стихийных бедствий предусматриваются в государственных прогнозах развития экономики страны (статья 131). С целью обеспечения безопасности региона, предотвращения диверсионных и разрушительных действий, крупные водохозяйственные сооружения Республики Таджикистан стратегического назначения охраняются государством (статья 132). Статьями 142 и 144 предусмотрена ответственность за нарушения, а также возложены обязанности на юридические и физические лица по возмещению причиняемых убытков.

Статьей 136 Водного Кодекса предусматривается ведение Государственного реестра водохозяйственных сооружений. В Государственном реестре будет отражаться информация о хозяйственно-целевом назначении и правовом положении объекта, физико-географических, технических параметрах, характеризующих безопасность его эксплуатации, экономических и иных показателей. Запись в Государственном реестре осуществляется одновременно с выдачей лицензии на специальное водопользование. В данное время лицензии на водопользование выдают Минводхоз (на орошение), Министерство сельского хозяйства и охраны окружающей среды (другие виды водопользования).

В соответствии со статьями 6 и 13 Водного Кодекса, статьей 11 закона «Об энергетике» плотины и другие ГТС могут быть государственной, частной, акционерной, смешанной или совместной собственностью.

В соответствии со статьей 10 Водного Кодекса Правительство, на тендерной основе с сохранением целевой функции, может предоставлять право управления водохозяйственными объектами государственной собственности в пределах ограниченной территории специализированным местным и иностранным юридическим лицам на договорной основе.

Безопасность ГТС в Туркменистане регламентируется технической нормативной документацией, которая была принята в СССР. Новые правила эксплуатации и обеспечения безопасности плотин и сооружений разработаны и утверждены только для Копетдагского и Хаузаханского гидроузлов.

В настоящее время Туркменистане подготовлен проект закона о безопасности ГТС, который согласован в системе Министерства водного хозяйства (Минводхоз) и находится на согласовании с другими министерствами и ведомствами [40].

В Узбекистане вопросы безопасности ГТС регулируются специальным законом «О безопасности гидротехнических сооружений», принятым в 1999 году. Действие закона распространяется на все крупные плотины и другие ГТС, находящиеся в государственной собственности, независимо от принадлежности к ведомству, которому эти сооружения переданы в эксплуатацию [40].

Система обеспечения безопасности ГТС в Республике Узбекистан включает:

- разграничение функций Правительства, органов исполнительной власти, органов государственной власти на местах и эксплуатирующих организации по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС;
- установление основных обязанностей эксплуатирующих организаций;
- осуществление государственного надзора за безопасностью ГТС при их проектировании, строительстве и эксплуатации;
- декларирование безопасности ГТС, ведение кадастра ГТС;
- установление ответственности за нарушение законодательства о безопасности ГТС.

Главной целью государственного регулирования обеспечения безопасности ГТС является предупреждение аварий путем:

- совершенствования правил и норм проектирования, строительства и

безопасной эксплуатации ГТС;

- осуществления государственного надзора за выполнением правил и норм эксплуатации ГТС эксплуатирующими организациями, а также надзора за деятельностью иных лиц, которая может привести к снижению уровня безопасности ГТС;

- наблюдения и анализа состояния сооружений и оснований, своевременного обнаружения и устранения тех их дефектов, которые при дальнейшем развитии могут привести к полной или частичной потере работоспособности объекта и возникновению чрезвычайной ситуации;

- подготовки персонала к выполнению противоаварийных мероприятий и действиям в условиях локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также создания необходимых для этого материальных и финансовых резервов.

В Центральной Азии не создана региональная организационная платформа для сотрудничества на устойчивой правовой основе, которая предоставила бы странам возможность определять направления и предпринимать совместные меры по улучшению технического состояния, по повышению безопасности ГТС межгосударственного значения [43].

В этой связи для стран Центральной Азии актуальна унификация нормативно-правовой базы безопасности водохозяйственных систем [44], укрепление и расширение межгосударственного сотрудничества в этой области, а также гармонизация законодательства и технических нормативов.

В настоящее время специализированная правовая база в области обеспечения безопасности ГТС существует не во всех странах региона. В некоторых республиках положения и функции, касающиеся этой сферы, все еще рассредоточены в различных нормативно-правовых актах и среди нескольких ведомств и организаций, хотя определенная консолидация национальных законодательств и организационных структур в этой области была достигнута. В регионе в целом недостаточно проработаны правовые вопросы взаимодействия, которые способствовали бы сотрудничеству по вопросам безопасности ГТС на межгосударственном уровне.

Поддержку странам Центральной Азии в решении этих проблем оказывает Всемирный банк, специальная программа ООН для экономик Центральной Азии (СПЕКА) и другие международные организации. В рамках Евразийского экономического сообщества принят проект модельного национального закона о безопасности ГТС, подготовлен проект регионального соглашения по сотрудничеству в этой области [4].

Сотрудничество по обеспечению безопасности ГТС в странах Центральной Азии [36, 45] ведется, в основном, по двум направлениям:

- улучшение технического состояния сооружений и оповещение об аварийных ситуациях;

- сближение национальных законодательств.

Как уже упоминалось выше, в странах Центральной Азии, за исключением Узбекистана, нет специального законодательства и единых государственных органов надзора за безопасностью ГТС, что естественно затрудняет сотрудничество в этой области.

Итогом выполнения сотрудничества в области обеспечения безопасности ГТС стал модельный национальный закон «О безопасности гидротехнических сооружений», разработанный на основе аналогичного закона Российской Федерации, принятого в 1997 году.

Модельный закон Парламентской Ассамблеи ЕврАзЭС «О безопасности гидротехнических сооружений» рекомендован как возможная основа для совершенствования

ния национального законодательства в заинтересованных странах. Данный закон регулирует отношения, возникающие при осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации ГТС [4].

Обзор соответствующего законодательства различных стран позволил выделить общие вопросы обеспечения безопасности и эффективности функционирования мелиоративных систем и ГТС. К ним относятся правовая и организационная формы регулирования сферы безопасности, полномочия и права регламентирующего органа, содержание режима регулирования.

В европейских странах (системе Еврокодов) основополагающим документом являются нормы EN 1990 «Основы проектирования» – это основные нормы, устанавливающие принципы и требования к безопасности, эксплуатационным качествам и долговечности сооружений [46–48].

Нормы EN 1990 определяют концепцию проектирования на основе частных коэффициентов надежности, дают рекомендуемые значения частных коэффициентов и устанавливают основные положения по управлению надежностью в строительстве на национальном уровне. В значениях частных коэффициентов надежности заложены «допустимые» уровни риска. Эти уровни или предельные состояния не должны быть достигнуты в течение 50 лет эксплуатации сооружения.

Термин «риск» в Еврокодах не определен, потому что он связан со многими факторами, например, с последствиями угроз для сооружения и его функциональным использованием. По мнению разработчиков, риск R может быть выражен следующим образом:

$$R = P_{rob}(F) \cdot C, \quad (2.1)$$

где $P_{rob}(F)$ – вероятность возникающей угрозы;

C – количественные последствия, выраженные, например, в количестве смертей, вызванных аварией, ущербов в денежных единицах и др.

В частности установлено, что вероятность разрушения должна быть меньше величины допустимого индивидуального риска людей в течение года, умноженной на срок службы сооружения и деленной на среднее количество подвергаемых угрозе людей.

Величина допустимого индивидуального риска, принятая в качестве точки отсчета, составила 10^{-5} 1/год. Концепция «допустимой» смертности, вызванной авариями конструкций, поднимает очень важные и социально значимые вопросы, связанные с реакцией общественного мнения на аварии и катастрофы. В западных странах определен денежный эквивалент превышения порога риска, приводящего к смертельному исходу. Так, во Франции он составляет 600 тыс. евро. Нормированные пороги вероятности аварии являются только математическими инструментами, они вовсе не означают, что некоторый процент трагедий является допустимым.

При определении нагрузок на сооружение и свойств грунтов, а также выборе метода расчета Еврокоды обеспечивают проектировщику определенную степень гибкости. Поэтому в практике проектирования конструкций инженерное суждение играет значительную роль. Но в то же время Еврокоды существенно ограничивают риск ошибочных суждений.

2.4 Современное состояние по обеспечению безопасности низконапорных гидротехнических сооружений

По данным Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ), в настоящее время во всем мире насчитывается более 800 тыс. плотин различных типов, из которых около 50 тыс. имеют высоту более 15 м [4]. Мировая база данных по авариям ГТС собрана только по большим плотинам с высотой $H > 15$ м и объемом водохранилищ $W > 1$ млн м³ [49]. Таким образом, в мире более 750 тыс. плотин или 94 % от всех плотин могут быть отнесены к низконапорным с $H < 15$ м, из которых низконапорных грунтовых плотин будет не менее 70 % или более 525 тыс. ГТС.

Количество аварий грунтовых плотин в мире на 1984 г. [50] составило 322, распределение которых по высоте представлено на рисунке 2.3, а количество аварий грунтовых плотин в мире в зависимости от емкости водохранилища – на рисунке 2.4 [51].

Как свидетельствуют эти данные, наибольшее количество аварий было зарегистрировано для плотин высотой 15–30 м и составило 168 или 52 % от общего числа аварий, затем для плотин высотой 30–50 м с количеством аварий – 73 (22,6 %), далее для плотин высотой 5–15 м – 59 (18,3 %); для плотин высотой 50–100 м – 17 (5,3 %). Очевидно, что представленные данные об авариях плотин до 1984 г. являются не полными, поскольку Технический комитет СИГБ под руководством проф. М. Роша [51] в докладе приводит сведения об авариях до 1984 г. в количестве 1105 для плотин всех типов, хотя согласно иным источникам [50], на этот период было зарегистрировано всего 466 аварий всех типов плотин. Кроме того, данные об авариях грунтовых плотин $H < 15$ явно сильно занижены и, по-видимому, будут гораздо больше, чем для плотин высотой 15–30 м.

Такое положение объясняется тем, что сведения об авариях в основном учитывались только для зарегистрированных больших плотин с $H > 15$ м, а в некоторых странах, например в США, регистрируются плотины только высотой $H > 30$ [51].

Последние наиболее полные данные об авариях всех типов плотин приводятся Д. В. Стефанишиным [52, 53]. Согласно проведенному им анализу статистических данных всех случаев зарегистрированных нарушений на всех типах плотин, к которым были отнесены повреждения и разрушения, рассматривалась выборка из 17100 плотин за период 150 лет. При формировании статистической выборки использовались данные об авариях в бюллетенях № 99 и № 119 Международной комиссии по большим плотинам (The International Commission on Large Dams – ICOLD) [54, 55].

Для анализа использовалась классификация аварий плотин по последствиям, принятая ICOLD [55]:

- Р–1 – разрушение плотины катастрофического характера с прорывом напорного фронта, в результате чего пришлось отказаться от восстановления ГТС (учтено 84 случая таких аварий);

- Р–2 – разрушение катастрофического характера, после чего плотина восстанавливалась (118 случаев, из которых 24 аварии с прорывом напорного фронта);

- П–1 – повреждение плотины, которая находилась в эксплуатации и не разрушалась благодаря опорожнению водохранилища (154 случая);

- П–2 – повреждение плотины при введении в эксплуатацию, которое не привело к ее разрушению благодаря своевременному опорожнению водохранилища (70 случаев);

- П–3 – повреждение плотины при строительстве, которое не помешало восстановить ГТС и заполнить водохранилище после ремонта (40 случаев).

Общие статистические данные всех зарегистрированных нарушений на плотинах и различных аварий для статической выборки в 17100 плотинах, а также статистические оценки вероятностей нарушений и аварий, полученные на интервале 150 лет, приводятся в таблице 2.1, а статистические данные аварий на плотинах в соответствии с классификацией ICOLD – в таблице 2.2.

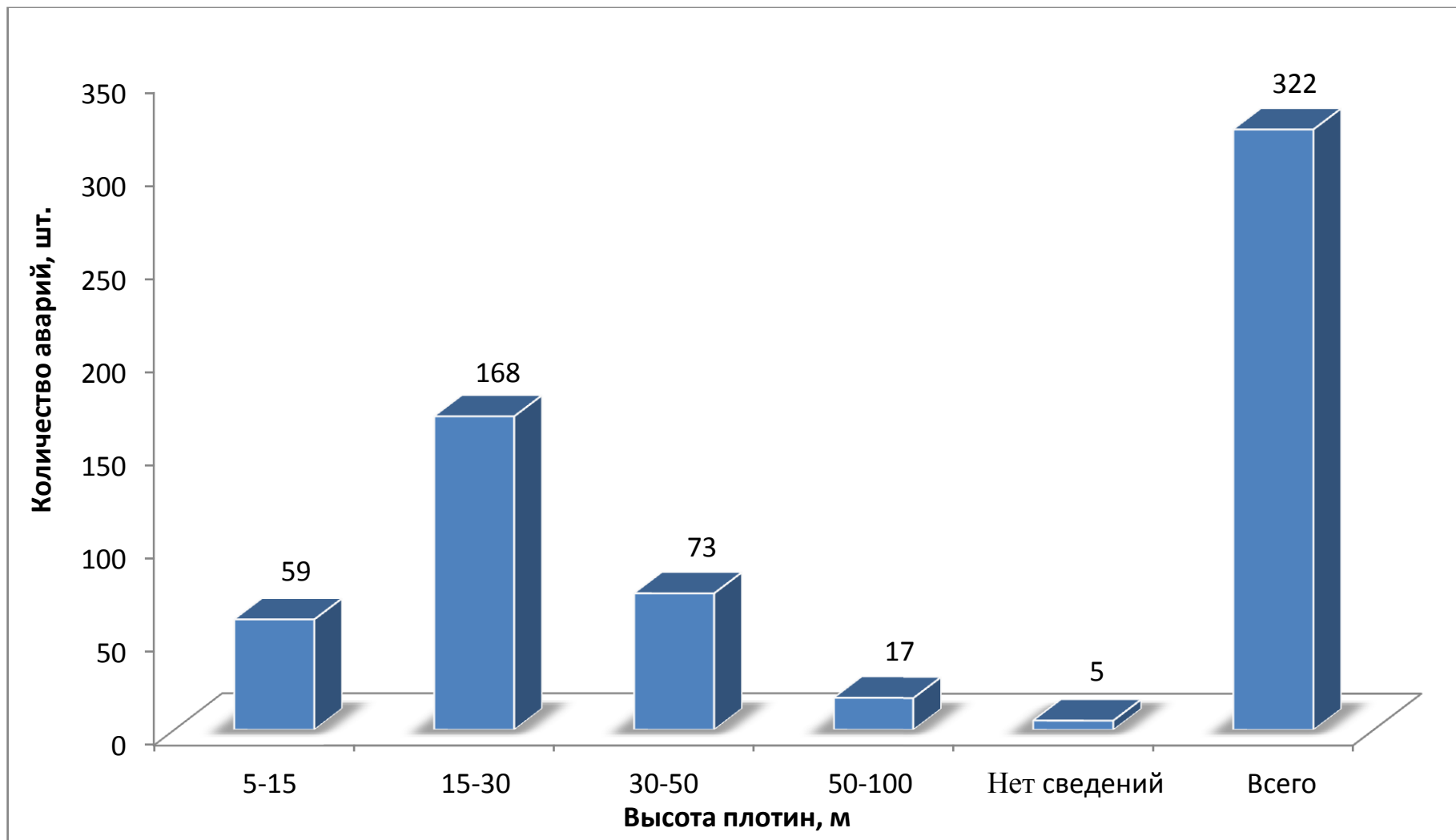


Рисунок 2.3 – Количество зарегистрированных аварий грунтовых плотин в мире по данным ICOLD [55]

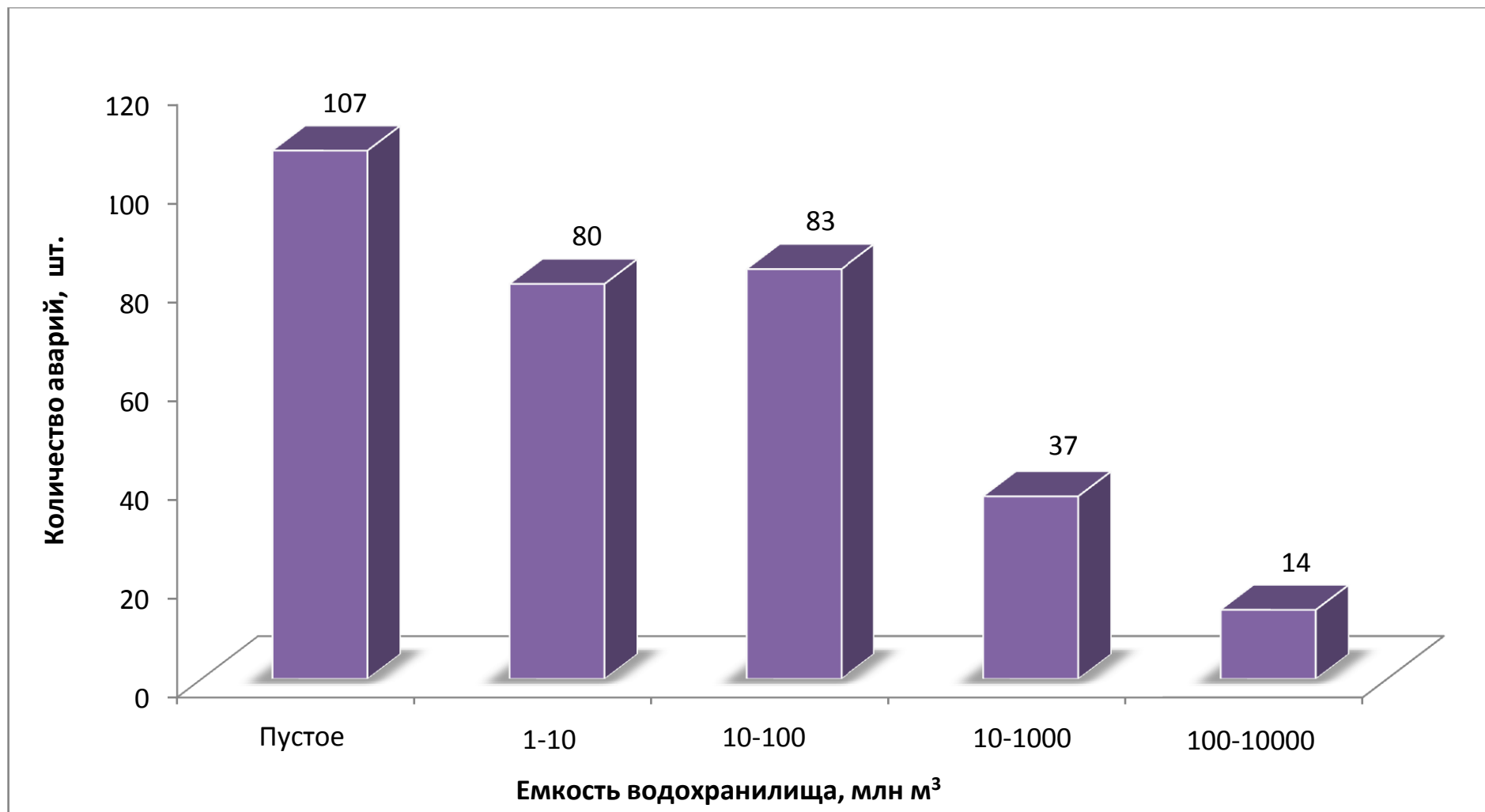


Рисунок 2.4 – Количество зарегистрированных аварий грунтовых плотин в мире в зависимости от емкости водохранилища

Таблица 2.1 – Статистические вероятности возникновения нарушений (инцидентов) и аварий на плотинах в интервале 150 лет (по данным Д. В. Стефанишина)

Вид инцидента (аварии)	Количество	Полная вероятность	Ежегодная вероятность, 1/год
Нарушения	1623	0,0930	$6,51 \cdot 10^{-4}$
Серьезные нарушения	1369	0,0785	$5,45 \cdot 10^{-4}$
Все аварии	466	0,0273	$1,84 \cdot 10^{-4}$
Повреждения	264	0,0154	$1,04 \cdot 10^{-4}$
Разрушения	202	0,0118	$7,92 \cdot 10^{-4}$
Разрушения с прорывом напорного фронта	108	0,0063	$4,22 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.2 – Статистические данные вероятности возникновения аварий на плотинах в соответствии с классификацией ICOLD в интервале 150 лет (по данным Д. В. Стефанишина)

Вид аварии	Количество	Полная вероятность	Ежегодная вероятность, 1/год
P–1	84	0,0049	$3,28 \cdot 10^{-5}$
P–2	118	0,0069	$4,62 \cdot 10^{-5}$
П–1	154	0,0090	$6,03 \cdot 10^{-5}$
П–2	70	0,0041	$2,74 \cdot 10^{-5}$
П–3	40	0,0023	$1,56 \cdot 10^{-5}$
Все аварии	466	0,0273	$1,84 \cdot 10^{-5}$

Анализ статистических вероятностей показывает, что ежегодные вероятности всех аварий различных типов плотин для выборки в 150 лет составляют $1,84 \cdot 10^{-4}$ 1/год, что совпадает с ранее установленными значениями риска аварии СИГБ для бетонных и грунтовых плотин, составляющими $(0,5-5,0) \cdot 10^{-4}$ 1/год [56].

Вместе с тем, ежегодные вероятности нарушений составляют $6,51 \cdot 10^{-4}$ 1/год, а среди всех аварий наибольшие вероятности получены для P–1 – $4,62 \cdot 10^{-4}$ 1/год и П–1 – $6,03 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Статистика аварий показывает, что в процентном отношении меньше всего инцидентов фиксировалось на бетонных плотинах гравитационного типа – 3,1 % от общего количества ГТС этого типа. Далее идут арочные (4,4 %) и контрфорсные плотины (5,1 %). Среди плотин из грунтовых материалов меньше всего различного рода нарушений фиксировалось на земляных плотинах (6,7 %), затем следуют каменно-набросные (10,9 %) и каменно-земляные плотины – до 17 % от общего количества плотин этого типа.

Наиболее надежными по статистике следует признать арочные плотины (1,5 % аварий от общего их количества), далее идут гравитационные плотины (1,9 %) и контрфорсные (2,2 %). Наиболее предрасположенными к авариям по статистике являются каменно-набросные (около 5,0 % аварий от общего количества плотин). Меньше всего аварий среди плотин из грунтовых материалов – на земляных плотинах (2,5 %).

В таблицах 2.3 и 2.4 приводятся статистические вероятности инцидентов и аварий на плотинах различного типа за 150 лет.

Таблица 2.3 – Статистические данные вероятности инцидентов (нарушений и аварий) на плотинах за 150 лет (по данным Д. В. Стефанишина)

Плотина	Количество инцидентов %	Вероятность инцидентов	
		полная	ежегодная, 1/год
Гравитационные	3,1	0,031	$2,10 \cdot 10^{-4}$
Арочные	4,4	0,044	$3,00 \cdot 10^{-4}$
Контрфорсные	5,1	0,051	$3,49 \cdot 10^{-4}$
Земляные	6,7	0,067	$4,62 \cdot 10^{-4}$
Каменно-земляные	17,0	0,170	$1,24 \cdot 10^{-3}$
Каменно-набросные	10,9	0,109	$7,69 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.4 – Статистические вероятности аварий на плотинах разных типов за 150 лет (по данным Д. В. Стефанишина)

Плотина	Количество аварий, %	Вероятность аварий	
		полная	ежегодная, 1/год
Гравитационные	1,9	0,019	$1,28 \cdot 10^{-4}$
Арочные	1,5	0,015	$1,01 \cdot 10^{-4}$
Контрфорсные	2,2	0,022	$1,48 \cdot 10^{-4}$
Земляные	2,5	0,025	$1,69 \cdot 10^{-4}$
Каменно-земляные	4,0	0,140	$2,72 \cdot 10^{-4}$
Каменно-набросные	5,0	0,050	$3,42 \cdot 10^{-4}$

Согласно этим данным наибольшие ежегодные вероятности инцидентов и аварий получены для каменно-земляных, каменно-набросных и земляных плотин, которые составляют для инцидентов от $4,62 \cdot 10^{-4}$ до $1,24 \cdot 10^{-3}$ 1/год, а для аварий – от $1,69 \cdot 10^{-4}$ до $3,42 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Последние данные вероятностей аварий на грунтовых плотинах практически полностью совпадают с ранее полученными значениями риска аварий для аналогичного типа плотин по данным СИГБ [56], составляющими $(2,25-5,0) \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Для оценки безопасности ГТС более достоверной характеристикой является вероятность возникновения аварий на плотинах или среднегодовая частота разрушений. Определенная по данным об авариях плотин вероятность их появления по данным СИГБ [4] составила для бетонных плотин $(0,5-2) \cdot 10^{-4}$ 1/год и $(2,5-5) \cdot 10^{-4}$ 1/год для грунтовых плотин, а современные плотины, построенные в 70-е годы, имеют среднюю вероятность разрушения порядка $1 \cdot 10^{-5}$ 1/год.

Сравнивая эти значения вероятностей с допускаемыми значениями в основном российском нормативном документе СП 58.13330.2012 [2], убеждаемся в их совпадении. Так, допускаемая вероятность аварий по СП для ГТС I, II классов составляет $5 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ 1/год, что идентично по данным СИГБ для бетонных грунтовых плотин.

Отмеченное позволяет считать, что обеспечение безопасности зарубежных плотин (бетонных и грунтовых) практически полностью соответствует нормам России.

Согласно этим данным при эксплуатации водохранилищ емкостью от 1 до 100 млн м³ наблюдается наибольшее количество аварий. Отсюда можно заключить, что при малой емкости водохранилищ от 1 до 10 млн м³ в основном используются низконапорные грунтовые плотины высотой $H < 15$ м, для которых и будут наблюдаться наиболее частые аварии.

В Российской Федерации согласно СП 58.13330.2012 [2] к низконапорным ГТС

IV класса относят грунтовые плотины при $H < 15$ м с песчаными, крупнообломочными и глинистыми грунтами основания и бетонные и железобетонные плотины при $H < 10$ м на аналогичных основаниях.

По данным Ростехнадзора на 01.01.2014 таких низконапорных ГТС IV класса насчитывается 29071. Они в основном относятся к водохозяйственному комплексу и среди них 5772 бесхозных. Общее количество ГТС всех классов, поднадзорных промышленности, энергетике и водохозяйственному комплексу, составляет 30188, из них к I классу относится 0,4 % всех сооружений, II классу – 1,1 %, III классу – 2,2 %, IV – 96,3 %.

Одной из важных характеристик является уровень безопасности ГТС, который в соответствии с Российским регистром ГТС оценивается по четырем категориям: нормальный, пониженный, неудовлетворительный и опасный.

Нормальный уровень безопасности характеризуется отсутствием дефектов и повреждений, дальнейшее развитие которых может привести к аварии, а эксплуатация ГТС осуществляется с выполнением норм и правил безопасности.

Пониженный уровень характеризуется нормальным техническим состоянием сооружений, но наблюдается нарушение правил эксплуатации.

Неудовлетворительный уровень безопасности характеризуется превышением первого (предупреждающего) уровня значений критериев безопасности и ограниченной работоспособностью сооружения.

Опасный уровень безопасности характеризуется превышением второго (предельного) уровня допустимых критериев безопасности и потерей работоспособности.

В таблице 2.5 представлены сведения об уровне безопасности ГТС, включенных в Российский регистр ГТС по данным 2013 г. [57].

Таблица 2.5 – Сведения об уровне безопасности поднадзорных Ростехнадзору ГТС, включенных в Российский регистр ГТС

Наименование показателя	Уровень безопасности ГТС			
	нормальный	пониженный	неудовлетворительный	опасный
Процент ГТС	39,4	43,4	12,5	4,7

По последним данным количество ГТС с опасным уровнем безопасности, которые не подлежат дальнейшей эксплуатации, достаточно высоко – 4,7 %, также как ГТС с неудовлетворительным уровнем безопасности, характеризующимся ограниченной работоспособностью – 12,5 %. Вместе с тем, нормальный уровень безопасности имеет относительно невысокий процент от общего количества ГТС – 39,4 %.

Исходя из приведенных данных можно отметить, что в Российской Федерации еще имеется значительное количество ГТС с неудовлетворительным и опасным уровнем безопасности – более 17 % всех сооружений.

На рисунке 2.5 приведены некоторые сводные данные по авариям грунтовых плотин IV класса на малых водохранилищах и прудах в РФ и СССР (данные из опубликованных источников [56–60], Росводресурсов и Ростехнадзора).

Представленные данные охватывают период с 1951 по 2013 г., а также территории Центрально-Черноземных областей (ЦЧО), Северного Кавказа, бассейна р. Дон, Ростовской области и др.

Наблюдаемое значительное количество аварий в отдельные периоды 1951–1952 гг., 1994 г., 2001–2006 гг. обусловлено сильными весенними паводками, когда происходило переполнение водохранилищ и прудов с переливом и образованием прорана.

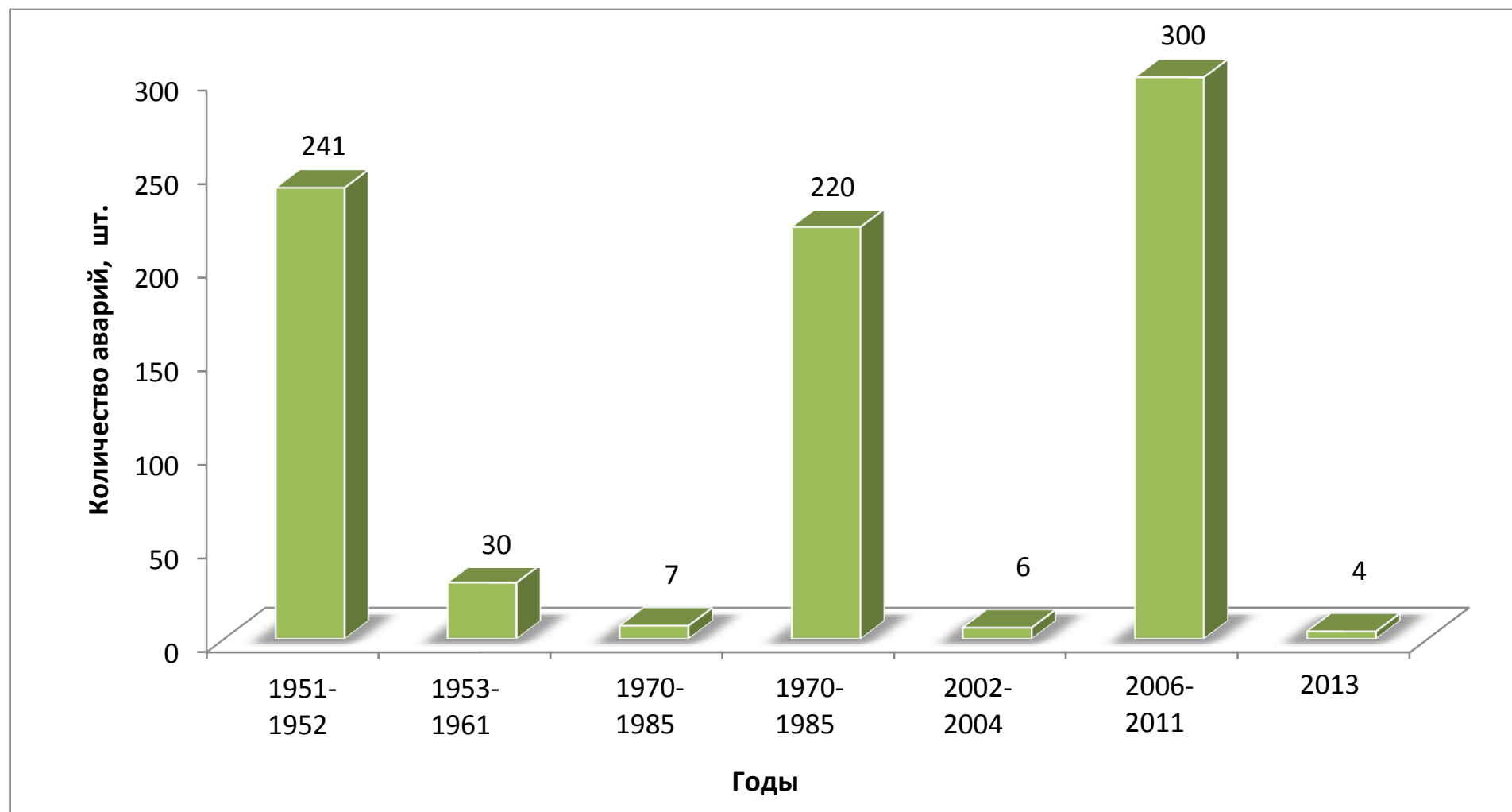


Рисунок 2.5 – Количество аварий грунтовых плотин IV класса ($H < 15$ м) малых водохранилищ и прудов в России и СССР

2.5 Ориентировочная оценка риска аварий низконапорных гидротехнических сооружений

В соответствии с данными рисунка 2.5 об аварийных низконапорных ГТС в мире до 1984 г. с объемом водохранилища до 10 млн м³ количество аварий грунтовых плотин составило 80 случаев. Однако согласно принятой классификации в СП 58.13330.2012 [2] к низконапорным ГТС IV класса относятся подпорные сооружения мелиоративных гидротехнических сооружений при объеме водохранилища до 50 млн м³. Тогда, учитывая половину аварий грунтовых плотин в мире на 1984 г. объемом от 10 до 100 млн м³, составляющие 83 случая, а также 75 % аварий для пустых водохранилищ – 107 случаев, получим ориентировочное количество аварий для низконапорных ГТС – $N_{ABH>15м} = 80 + 83/2 + 2/3 \cdot 107 = 193$ случая, а для остальных ГТС с высотой плотины $H < 15$ м – $N_{ABH<15м} = 82/2 + 1/3 \cdot 107 + 37 + 14 = 91$ случай.

Тогда количество аварий низконапорных грунтовых плотин в мире с $H < 15$ м будет ориентировочно превышать аварии плотин по имеющимся неполным данным в 193/91 = 2,12 раза.

Риск аварий низконапорных грунтовых плотин в мире с $H < 15$ м по неполным данным при общем количестве зарегистрированных ГТС до 1984 г. [51] – $N_{ГТС} = 14700$ и периоде с 1930 по 1984 г. – $T = 54$ года определим по следующей зависимости:

$$\lambda_{H<15м} = \frac{N_{ABH>15м}}{N_{ГТС} \cdot T} = \frac{193}{14700 \cdot 54} = 0,000243 = 2,43 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\text{год}. \quad (2.2)$$

Полученное значение риска аварий низконапорных плотин в мире близко совпадает с данными СИГБ, приведенными в п. 2.3.

Риск аварий низконапорных грунтовых плотин в России можно также ориентировочно определить по неполным данным (см. рисунок 2.5). В соответствии с этими данными общее количество аварий низконапорных грунтовых плотин IV класса составляет $N_{ABH<15м} = 802$ случая, период учета аварий – $T = 62$ года (с 1951 по 2013 г.). Общее количество низконапорных ГТС IV класса по данным Ростехнадзора на 2013 г. составляет $N_{ГТСH<15м} = 29071$.

Выполняя расчет риска аварий грунтовых плотин в России аналогично предыдущему, получим:

$$\lambda_{H<15м} = \frac{N_{ABH<15м}}{N_{ГТСH<15м} \cdot T} = \frac{802}{29071 \cdot 62} = 0,000445 = 4,45 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\text{год}. \quad (2.3)$$

Найденное значение риска аварии низконапорных грунтовых плотин, равное $4,45 \cdot 10^{-4}$ 1/год, превышает ранее полученное значение для грунтовых плотин в мире и $2,43 \cdot 10^{-4}$ 1/год в 1,8 раз и находится в пределах риска аварий грунтовых плотин в мире по данным СИГБ $(2,5-5) \cdot 10^{-4}$ 1/год. Однако необходимо иметь в виду, что в случае учета более полных сведений об авариях грунтовых плотин в России значение риска аварии увеличится в большую сторону, но по всей видимости не превысит допустимого значения для ГТС IV класса согласно СНиП 3.07.03-85 [61], составляющего $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

2.6 Анализ изменения численности и пути сокращения бесхозных гидротехнических сооружений в России

Важной проблемой обеспечения безопасности ГТС является выявление и сокращение тех, которые не имеют собственника или собственник которых неизвестен, либо от права собственности на которые собственник отказался (далее бесхозные ГТС), которые ранее использовались для орошения, сельхозводоснабжения и водоснабжения населения, а также для рыборазведения и пожаротушения.

Бесхозяйные ГТС представляют собой низконапорные плотины высотой до 10 м и незначительной длины до 200–400 м.

Так как грунтовые плотины бесхозяйных ГТС имеют небольшую высоту, а объем воды в малом водохранилище или пруду не превышает 1–3 млн м³, то они относятся к низконапорным сооружениям IV класса.

Часто бесхозяйные ГТС возводились хозяйственным способом, без составления проектно-сметной документации и без постановки на учет как недвижимое имущество в территориальных органах Федеральной регистрационной службы.

Значительная часть сооружений принадлежала ликвидированным в настоящее время сельскохозяйственным организациям [62].

В таблице 2.6 приведены сведения о количестве бесхозяйных ГТС в России по данным Ростехнадзора, а в таблице 2.7 – их распределение по уровню безопасности на 2013–2014 гг.

Таблица 2.6 – Сведения о количестве бесхозяйных ГТС в Российской Федерации (по данным Ростехнадзора)

Год	Всего бесхозяйных ГТС	В том числе		
		ликвидировано	оформлены права собственности	поставлено на учет в органах госрегистрации
2008	6816	–	–	–
2009	6778	–	–	–
2010	6654	945	202	–
2011	7514	564	401	1338
2012	7070	408	374	671
2013	5772	894	372	874
2014	4428	319	1127	560

Таблица 2.7 – Распределение бесхозяйных ГТС по уровню безопасности

Данные Ростехнадзора	Всего бесхозяйных ГТС, шт.	В т. ч. по уровню безопасности			
		нормальный	пониженный	неудовлетворительный	опасный
2013 г.	5772	994	3730	844	204
2014 г.	4428	586	3073	594	175
Ликвидировано в 2014 г.	319	64	225	27	3

Согласно этим данным, с 2008 по 2013 г. количество бесхозяйных ГТС уменьшилось с 6816 до 4428, что составляет 2388 ГТС или 35 %. При этом за последние четыре года (с 2011 по 2014 г.) их численность значительно уменьшилось на 3086 ГТС или на 41 % от общей численности.

Наибольшее количество бесхозяйных ГТС (945) ликвидировано в 2010 г. По данным за 2013 г. было ликвидировано 894 бесхозяйных ГТС, оформлены права собственности на 372 сооружения и поставлено на учет в органах госрегистрации 874 сооружения. Согласно этим данным за три последних года с 2012 по 2014 г. наибольшее снижение численности бесхозяйных ГТС наблюдалось в Верхне-Донском управлении с 1445 до 1020 ГТС и Приокском управлении с 806 до 263 ГТС.

В таблице 2.8 приведены сведения о количестве бесхозных ГТС по территориальным управлениям Ростехнадзора и их распределение по уровню безопасности.

Во исполнение поручения Президента Российской Федерации и Правительства Российской Федерации от 14.09.2004 № Пр-1534 в части осуществления мер, направленных на обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности бесхозных ГТС, Ростехнадзором проводится работа по выявлению и сокращению их количества [50]. Тем не менее, в отдельных регионах по данным территориальных управлений Ростехнадзора еще имеется значительное количество бесхозных ГТС.

С целью обеспечения безопасности бесхозных ГТС до их оформления в собственность муниципальных образований был принят Федеральный закон от 28.12.2013 № 445-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам обеспечения безопасности бесхозных гидротехнических сооружений».

Принятым законом для обеспечения безопасности бесхозных ГТС и сокращения их количества предусматривается [57]:

- усиление требований к обеспечению безопасности ГТС;
- наделение органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации полномочиями по проведению капитального ремонта, консервации или ликвидации (сноса) бесхозных ГТС в целях обеспечения их безопасности;
- наделение Правительства Российской Федерации полномочием определять порядок консервации или ликвидации (сноса) ГТС;
- наделение федеральных органов исполнительной власти, уполномоченных на осуществление федерального государственного надзора в области безопасности ГТС, полномочиями устанавливать требования к содержанию правил эксплуатации ГТС.

На основании обобщения ранее проведенных научно-исследовательских работ ФГБНУ «РосНИИПМ» и последних публикаций [2, 58, 59, 62–64] по проблемам безопасности бесхозных ГТС могут быть сформулированы следующие пути их сокращения:

- составить перечень бесхозных ГТС, которые в настоящее время не используются и представляют собой потенциальную опасность для населения, хозяйственных объектов и прилегающих территорий;
- разработать программу ликвидации (сноса) бесхозных ГТС с учетом решения социальных и экологических вопросов на муниципальном уровне и обеспечения необходимого ее финансирования для выполнения проектов и непосредственного осуществления работ по их сносу и рекультивации территории;
- разработать программу подготовки специалистов, эксплуатирующие низконапорные ГТС IV класса водохозяйственного комплекса, а также представителей муниципальных образований, принявших в собственность бесхозные ГТС;
- возложить надзор за надлежащей эксплуатацией опасных ГТС на органы местного самоуправления.

Следует отметить, что при ликвидации бесхозных ГТС необходимо учитывать неблагоприятные последствия, такие как [62]:

- социальную напряженность, связанную с тем, что местные жители используют водоемы для хозяйственных нужд, в рекреационных целях;
- наличие на дне водоемов значительного количества накоплений наносов, которые могут содержать элементы, представляющие опасность для окружающей среды и населения при спуске воды;
- возникновение угрозы заболачивания ложа водоема;
- снижение уровня грунтовых вод, сложившегося в течение многих лет, и, как следствие, уменьшение водообеспеченность водоносных горизонтов.

Таблица 2.8 – Сведения о количестве бесхозных ГТС по территориальным управлениям Ростехнадзора

Территориальное управление Ростехнадзора	Количество бесхозных ГТС за 2012 год, шт.					Количество бесхозных ГТС за 2013 год, шт.					Количество бесхозных ГТС за 2014 год, шт.				
	всего	в том числе с уровнем безопасности				всего	в том числе с уровнем безопасности				всего	в том числе с уровнем безопасности			
		нор- маль- ный	пони- жен- ный	не- удов- летво- рит.	опас- ный		нор- маль- ный	пони- жен- ный	не- удов- летво- рит.	опас- ный		нор- маль- ный	пони- жен- ный	не- удов- летво- рит.	опас- ный
МТУ	522	339	149	30	4	130	0	113	3	14	0	0	0	0	0
Центральное	793	3	543	169	78	778	9	536	170	63	778	9	536	170	63
Верхне-Донское	1445	353	1014	77	0	1403	368	960	75	0	1020	109	839	72	0
Приокское	806	53	602	151	0	492	53	288	151	0	263	45	209	8	0
Северо-Западное	67	0	63	4	0	76	0	65	9	2	72	0	61	9	2
Печорское	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Западно-Уральское	117	79	32	6	0	501	79	344	78	0	385	60	274	51	0
Приволжское	16	0	15	1	0	6	0	6	0	0	3	0	3	0	0
Средне-Поволжское	288	13	260	7	8	58	4	47	7	0	43	3	38	2	0
Волжско-Окское	762	7	689	54	12	695	5	627	53	10	678	8	620	41	9
Нижне-Волжское	311	132	76	25	78	487	132	247	24	84	424	132	187	23	82
Северо-Кавказское	132	44	59	29	0	282	8	111	143	20	183	3	76	98	10
Северо-Уральское	5	3	2	0	0	5	3	2	0	0	4	2	2	0	0
Уральское	69	3	35	29	2	44	0	26	16	2	47	0	21	24	2
Забайкальское	30	11	11	8	0	29	11	11	7	0	22	9	7	6	0
Енисейское	94	7	21	59	7	117	4	40	67	6	78	0	12	62	4
Дальневосточное	109	0	93	16	0	91	0	76	15	0	35	0	32	3	0
Сахалинское	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
Камчатское	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Северо-Восточное	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0
Ленское	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3 ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

3.1 Общие требования к обеспечению надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений

Требования к обеспечению надежности и безопасности низконапорных ГТС должны включать как обязательные общие требования, так и обязательные специальные требования к указанной категории ГТС при проектировании, эксплуатации, а также при принятии решения о дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу из эксплуатации.

Общие требования к обеспечению безопасности ГТС IV класса основываются на статьях 8 и 9 Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» и включают следующее:

- обеспечение допустимого уровня риска аварий, который для сооружений для IV класса согласно СП 58.13330.2012 составляет $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год;
- представление деклараций безопасности ГТС IV класса в территориальные органы Ростехнадзора;
- осуществление федерального государственного надзора в области безопасности ГТС;
- осуществление непрерывности эксплуатации ГТС;
- установление критериев безопасности ГТС, которые для низконапорных ГТС IV класса приведены ниже в таблице 3.1;
- проведение комплекса мероприятий по максимальному уменьшению риска возникновения чрезвычайных ситуаций на ГТС.

Таблица 3.1 – Критерии безопасности низконапорных гидротехнических сооружений IV класса

Перечень критериальных показателей	Критерии безопасности второго уровня K_2
1	2
1 Прочность и устойчивость ГТС	
1.1 Критерии прочности и устойчивости	$\gamma_{fc} F_{II} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R_{II}$
1.2 Коэффициент устойчивости откосов грунтовых плотин (дамб)	$k_{sII} \geq \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c}$
2 Фильтрационная прочность и устойчивость грунта тела и основания ГТС	
2.1 Фильтрационная прочность грунтов тела плотины	$J_{est,mII} \leq \frac{J_{cr,m}}{\gamma_n}$
2.2 Фильтрационная прочность грунтов основания плотины	$J_{est,oII} \leq \frac{J_{cr,o}}{\gamma_n}$
2.3 Осадка основания	$S_{II} \leq S_u$
3 Пропускная способность водосбросного сооружения	
Расчетный расход через водосбросное сооружение	$Q_{всI} \leq Q_{p\% = 1\%}$

Продолжение таблицы 3.1

1	2
4 Параметры гребня грунтовой плотины	
4.1 Отметка гребня плотины	$\nabla Gp_{II} \geq \nabla Gp_H$
4.2 Ширина гребня	$b_{II} \geq b_H$
4.3 Превышение гребня при НПУ при ФПУ	$d_{1I} \geq d_{1H}$ $d_{2II} \geq d_{2H}$
Примечание – F , R – расчетные значения обобщенного силового воздействия и несущей способности при особом сочетании нагрузок (ФПУ); γ_{fc} , γ_n , γ_c – коэффициенты сочетания нагрузок, надежности, условий работы; $J_{est,m}$, $J_{cr,m}$ – градиенты напора действующий и критический; Q_{ec} , $Q_{p\%}$ – расчетные расходы водосбросного сооружения фактический и заданной обеспеченности; ∇Gp , ∇Gp_H – отметки гребня плотины фактическая и нормативная (или по проекту); d , d_H – превышение гребня плотины над уровнем воды фактическое и нормативное (по проекту).	

Общие требования к обеспечению безопасности ГТС его собственником включают следующее:

- обеспечивать контроль (мониторинг) за показателями состояния ГТС;
- обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности;
- обеспечивать проведение регулярных обследований ГТС;
- организовывать эксплуатацию ГТС в соответствии с разработанными правилами эксплуатации ГТС;
- создавать финансовые и материальные резервы для ликвидации ГТС;
- финансировать мероприятия по эксплуатации ГТС, обеспечению его безопасности, а также работы по предотвращению и ликвидации аварий ГТС;
- заключать договор обязательного страхования гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии ГТС.

Требования к обеспечению безопасности бесхозных ГТС:

- выявление бесхозных ГТС и решение вопросов оформления их в собственность, в том числе в собственность муниципальных образований;
- разработка проектной документации на капитальный ремонт или реконструкцию ГТС;
- осуществление консервации ГТС в случае необходимости;
- проведение ликвидации бесхозного ГТС в случае, когда оно находится в аварийном состоянии и отсутствует потребность его использования.

Однако в данном законе не рассматриваются особенности обеспечения надежности и безопасности отдельных категорий ГТС, в том числе ГТС IV класса. Вместе с тем очевидно, что для ГТС IV класса, которые, как правило, являются низконапорными с напором $H < 15$ м, такие требования могут быть понижены.

Понижение требований к обеспечению безопасности низконапорных ГТС IV класса по отношению к высоконапорным и средненапорным ГТС I–III классов обуславливается тем, что более высокие требования к их безопасности будут связаны с дополнительными затратами на проведение инженерно-технических и организационных мероприятий, которые для этих сооружений могут быть чрезмерно излишними, а, следовательно, неоправданными с экономической точки зрения. Поэтому для низконапорных ГТС IV класса целесообразно выставлять такие требования, которые были

бы приемлемы с точки зрения уровня безопасности и финансовых затрат на его достижение. Тем более, что вопрос установления таких требований к безопасности данной категории ГТС представляется актуальным, поскольку их численность во много раз превышает ГТС I–III классов. Как свидетельствуют данные, представленные ранее на рисунке 1.1, количество поднадзорных Ростехнадзору ГТС IV класса, относящихся, в основном к водохозяйственному комплексу, составляет 29071 сооружений, а количество ГТС I–III классов – 1117 сооружений. Таким образом, количество ГТС IV класса превышает численность сооружений I–III классов в 26 раз.

По существу, такой подход к назначению требований по безопасности подпорных ГТС уже 30 лет используется в нормах проектирования (СНиП). Так, при расчетах ГТС по методу предельных состояний их прочности и устойчивости [2] учитывается коэффициент надежности по ответственности сооружения γ_n , принимаемый в зависимости от класса ГТС:

- I класс – 1,25;
- II класс – 1,20;
- III класс – 1,15;
- IV класс – 1,10.

Наряду с этим, в СП 58.13330.2012 [2] введены допускаемые значения уровня риска аварий на напорных ГТС, которые также установлены в зависимости от класса:

- I класс – $5 \cdot 10^{-5}$ 1/год;
- II класс – $5 \cdot 10^{-4}$ 1/год;
- III класс – $2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/год;
- IV класс – $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Отсюда можно заключить, что при расчетах ГТС на прочность и устойчивость коэффициент надежности для ГТС IV класса снижается по отношению к ГТС других классов: для ГТС I класса – на 13,6 %, II класса – на 9,1 %, III класса – на 4,5 %, а допускаемые значения риска аварии: для ГТС I класса – в 100 раз, II класса – в 10 раз, III класса – в 2,0 раза.

Таким образом, коэффициент надежности по ответственности сооружения, который учитывает надежность его работы, снижается для ГТС IV класса по отношению к I и III классу соответственно от 13,6 % до 4,5 %, а допускаемая вероятность аварий, которая непосредственно характеризует безопасность сооружения, снижается – в 100 или 2,0 раза.

В монографии Ц. Е. Мирцхулавы [65] предлагается устанавливать оптимальный уровень надежности, исходя из соображений минимизации суммарных капитальных затрат, что также подтверждает нашу точку зрения. Аналогичный подход предлагается также в работе Д. В. Стефанишина [66], который основывается на принципе разумно достижимых низких уровней риска (ALARP). Согласно этому принципу экономически эффективным вариантом повышения безопасности ГТС можно считать такой, при котором дополнительные затраты на эти мероприятия компенсируются снижением вероятных потерь от аварии на сооружении.

Как было указано выше, для обеспечения безопасности ГТС необходимо установление критериев безопасности.

Критерии безопасности применительно к низконапорным ГТС IV класса (см. таблицу 3.1) включают критерии для оценки прочности и устойчивости, фильтрационной прочности грунта тела и основания ГТС, пропускной способности водосбросного сооружения, а также параметры гребня грунтовой плотины.

3.2. Обязательные требования к надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при проектировании

Обязательные требования к надежности и безопасности ГТС при проектировании всех классов изложены в СП 58.13330.2012 [2].

Ниже рассмотрим обязательные требования по надежности и безопасности применительно к низконапорным ГТС IV класса.

Обеспечение надежности системы «низконапорное сооружение – основание» должно основываться на результатах расчетов по методу предельных состояний согласно СП 58.13330.2012.

Расчеты низконапорных ГТС по методу предельных состояний необходимо производить при проектировании по двум группам предельных состояний на основное и особое сочетание нагрузок (для основного и поверочного расчетных случаев по максимальным расходам воды).

Нагрузки, соответствующие пропуску максимального расхода воды основного расчетного случая, определяют при нормальном подпорном уровне (НПУ) воды в верхнем бьефе пруда или водохранилища, при максимальных расходах воды 5 % обеспеченности.

Для прудов и водохранилищ пропуск расхода воды через которые осуществляется при уровнях верхнего бьефа, превышающих НПУ, но не достигающих ФПУ, следует учитывать как для основного сочетания нагрузок.

Нагрузки, соответствующие пропуску максимального расхода воды поверочного расчетного случая, определяют при форсированном подпорном уровне (ФПУ) воды в верхнем бьефе пруда или водохранилища при максимальных расходах воды 1 % обеспеченности.

Для обоснования надежности и безопасности низконапорных ГТС выполняются расчеты гидравлического и фильтрационного режима состояния системы «низконапорного сооружения – основание» на основе применения современных методов.

При расчетах низконапорных ГТС, их конструкций и оснований необходимо соблюдать условия недопущения наступления предельных состояний (согласно СП 58.13330.2012):

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{R}{\gamma_n}, \quad (3.1)$$

где γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый:

- при расчетах по первой группе предельных состояний:

1) для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации при НПУ – 1,0 м;

2) то же, для периода строительства и ремонта – 0,95 м;

- для особого сочетания нагрузок и воздействий:

1) при особой нагрузке при ФПУ – 0,95;

2) при расчетах по второй группе предельных состояний – 1,0;

F – расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или другого параметра, по которому производится оценка предельного состояния, определенного с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f , принимаемого в соответствии с приложением Д по СП 58.13330.2012;

R – расчетное значение обобщенной несущей способности, деформации или другого параметра (при расчетах по первой группе предельных состояний – расчетное значение), устанавливаемое нормами проектирования отдельных видов ГТС, определенное с учетом коэффициентов надежности по материалу γ_m или грунту γ_g и усло-

вий работы γ_c (п. 2.4, 2.5);

γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый:

- при расчетах по предельным состояниям первой группы для IV класса сооружений – 1,10;

- при расчетах по предельным состояниям второй группы – 1,0.

Значения коэффициентов надежности по материалу γ_m и грунту γ_g , применяемых для определения расчетных сопротивлений материалов и характеристик грунтов, устанавливаются нормами на проектирование отдельных видов ГТС, их конструкций и оснований.

Значения коэффициента условий работы γ_c , учитывающего тип сооружения, конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем, вид предельного состояния и другие факторы, устанавливаются нормативными документами на проектирование отдельных видов ГТС, их конструкций и оснований.

Расчетное значение нагрузки определяют умножением нормативного значения нагрузки F на соответствующий коэффициент надежности по нагрузке γ_f .

Коэффициенты γ_m , γ_g , γ_c применяются в качестве сомножителя в расчетном значении обобщенной несущей способности R в числителе формулы (3.1).

Расчеты низконапорных ГТС, их конструкций и оснований по предельным состояниям второй группы выполняют с использованием коэффициентов надежности по материалу γ_m и грунту γ_g равными 1,0.

Низконапорные ГТС, их конструкции и основания должны быть запроектированы так, чтобы условие (3.1) недопущения наступления предельных состояний соблюдалось на всех этапах строительства и эксплуатации, в том числе и в конце расчетного срока их службы.

Расчетный срок службы низконапорных ГТС, относящихся к IV классу ответственности, должен приниматься равным 50 лет.

При соответствующем технико-экономическом обосновании срок службы отдельных конструкций и элементов сооружения, не влияющих на сохранность основных сооружений, допускается уменьшать.

Не менее чем за 2 года до истечения расчетного срока службы сооружения собственник (или эксплуатирующая организация) должны провести всестороннее обследование его состояния и, при необходимости, решить вопрос по разработке проектной документации на капитальный ремонт или его реконструкцию, консервацию или ликвидацию.

При расчетах риска аварий низконапорного ГТС на стадиях проектирования и эксплуатации следует руководствоваться допускаемым значением уровня риска аварии для сооружения IV класса, который согласно СП 58.13330.2012 не должен превышать $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

3.3 Обязательные требования к безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при эксплуатации

Для обеспечения безопасности низконапорных ГТС собственник (или эксплуатирующая организация) проводит их эксплуатацию в соответствии с разработанными и согласованными с Ростехнадзором правилами эксплуатации. Собственник (или эксплуатирующая организация) осуществляет разработку критериев безопасности низконапорного ГТС IV класса не реже 1 раза в 5 лет.

С целью обеспечения безопасности низконапорных ГТС собственник (или эксплуатирующая организация) не реже 1 раза в 5 лет разрабатывает декларацию безо-

пасности, которая для сооружений IV класса может отличаться меньшей детальностью проработки отдельных вопросов (данные по инженерно-геологическим и климатическим условиям; гидрологические характеристики водотока могут определяться приближенными способами с использованием гидрологических ежегодников и аналогов; сценарии развития аварии могут быть упрощены; контроль за сочетанием сооружения и в основном проводится на основании визуальных обследований, при необходимости используются инструментальные методы).

В процессе эксплуатации низконапорных ГТС должны осуществляться меры по обеспечению их безопасности, дается оценка уровня риска аварии сооружения, определяются контролируемые диагностические показатели, устанавливаются эксплуатационное состояние и уровень безопасности применительно к ГТС IV класса.

Для оценки безопасности низконапорных ГТС устанавливаются критерии безопасности 1-го уровня K_1 и 2-го уровня K_2 . Критерии безопасности 1-го уровня K_1 определяются при основном сочетании нагрузок, при достижении которых устойчивость, механическая и фильтрационная прочность ГТС и его основания, а также пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений соответствует условиям их нормальной эксплуатации.

Критерии безопасности 2-го уровня K_2 определяются при особом сочетании нагрузок, при превышении (уменьшении) которых эксплуатация ГТС в проектном режиме недопустима, а состояние сооружения может перейти в предаварийное. Критерии безопасности 2-го уровня K_2 для низконапорных ГТС IV класса включают критерии прочности и устойчивости, фильтрационной прочности грунта тела и основания, пропускной способности водосбросного и водопропускного сооружения и критерии параметров гребня грунтовой плотины (отметка гребня, ширина гребня, превышение гребня при ФПУ), которые следует принимать в соответствии с таблицей 3.1.

Оценка уровня риска аварий низконапорных ГТС производится на основании сопоставления фактического (прогнозного) значения с допускаемым значением.

При оценке фактического (прогнозного) значения уровня риска аварии для низконапорных ГТС рекомендуется использовать упрощенные методы расчета, основанные на экспертных оценках.

Наиболее характерные сценарии аварий грунтовых плотин и водосбросных сооружений низконапорных ГТС IV класса с вероятным разрушением плотины включают перелив воды через гребень, сосредоточенную фильтрацию через тело и основание и локальное разрушение грунтовой плотины при потере статической устойчивости откосов.

Контролируемые диагностические показатели различают на количественные, измеренные с помощью технических средств или вычисленные на основании измерений, и качественные показатели, определенные на основании визуального осмотра.

Количественные и качественные диагностические показатели состояния ГТС сопоставляются с предельными их значениями, соответствующими критериям безопасности 2-го уровня K_2 , с целью установления их эксплуатационного состояния.

В соответствии с полученными количественными и качественными диагностическими или комплексными показателями нормативными документами (РД 03-443-02) установлены следующие эксплуатационные состояния ГТС: надежное (работоспособное), удовлетворительное (частично работоспособное), предаварийное (предельное).

В соответствии в Российском регистре гидротехнических сооружений, уровень безопасности ГТС оценивается четырьмя категориями: нормальный, пониженный, неудовлетворительный и опасный.

Рекомендуемые значения риска аварии низконапорных ГТС IV класса для вышеуказанных уровней безопасности приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Рекомендуемые значения риска аварии низконапорных гидротехнических сооружений IV класса в зависимости от уровня безопасности

Уровень безопасности	Нормальный	Пониженный	Неудовлетворительный	Опасный
Риск аварии для ГТС IV класса, 1/год	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} - 1,8 \cdot 10^{-1}$	$> 1,8 \cdot 10^{-1}$

3.4 Обязательные требования к безопасности низконапорных гидротехнических сооружений при принятии решения о дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводе их из эксплуатации

Решение о дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводе из эксплуатации низконапорного ГТС принимается на основе изучения комплекса факторов: результатов комплексного обследования ГТС; оценки эксплуатационного уровня сооружения; оценки вероятности аварии и ущербов от затопления территории; достижения сооружения своего нормативного срока службы; оценки уровня безопасности ГТС; востребованности и необходимости ГТС в последующей хозяйственной деятельности.

Дальнейшая эксплуатация низконапорного ГТС принимается при следующих условиях:

- эксплуатационное состояние ГТС должно соответствовать надежному (работоспособному) состоянию или при соответствующем обосновании – удовлетворительному (частично неработоспособному) состоянию;
- прогнозный уровень риска аварии сооружения не должен превышать допустимое значение для сооружения IV класса;
- уровень безопасности ГТС должен соответствовать нормальному уровню безопасности и при соответствующем обосновании – пониженному уровню безопасности;
- востребованности и необходимости ГТС в последующей хозяйственной деятельности и для удовлетворения потребностей населения близлежащих населенных пунктов в водоснабжении, орошении и рекреации.

Для принятия решения о дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводе из эксплуатации низконапорных ГТС IV класса, в том числе бесхозяйных ГТС, целесообразно использовать методику выбора оптимального варианта ГТС на основе вероятностно-экономического анализа.

Решение о реконструкции низконапорного ГТС принимается на основании технико-экономических расчетов для всех видов эксплуатационного состояния и уровней безопасности ГТС с учетом востребованности и необходимости ГТС.

Решение о выводе из эксплуатации ГТС с целью его консервации или ликвидации принимается при условии отсутствия их востребованности и необходимости в последующей хозяйственной деятельности. Решение о консервации сооружения, которое не имеет собственника (бесхозяйное ГТС) или собственник которого не известен, либо от права собственности на которое собственник отказался, принимается уполномоченным органом исполнительной власти субъектов Российской Федерации, на территории которого находится это ГТС, с учетом предложений органов государственной власти, органов местного самоуправления.

Обеспечение надежности и безопасности низконапорных ГТС в случае их даль-

нейшей эксплуатации, реконструкции или вывода их из эксплуатации проводится аналогично требованиям, изложенным в п. 3.2, 3.3.

3.5 Анализ методик определения критериев безопасности и применяемых количественных и качественных показателей состояния гидротехнических сооружений

Рассмотрим введенные в Инструкции [30] новые на тот период понятия, непосредственно характеризующие безопасность ГТС.

Контролируемые показатели состояния ГТС – показатели, измеренные на данном сооружении с помощью технических средств или вычисленные на основании измерений количественные показатели, а также качественные показатели эксплуатационного состояния ГТС, определенные на основании визуального осмотра [30].

Критерии безопасности 1-го уровня – значения контролируемых показателей состояния ГТС, определяемые при основном сочетании нагрузок, при достижении которых устойчивость, механическая и фильтрационная прочность ГТС и его основания, а также пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений соответствуют условиям их нормальной эксплуатации [30].

Критерии безопасности 2-го уровня – значения контролируемых показателей состояния ГТС, устанавливаемые при особом сочетании нагрузок, при превышении (уменьшении) которых эксплуатация ГТС в проектом режиме недопустима, состояние сооружения может перейти в предаварийное [30].

Надежное (работоспособное) эксплуатационное состояние ГТС – состояние, при котором сооружение соответствует всем требованиям нормативных документов и проекта при действии нагрузок основного сочетания, значения контролируемых показателей состояния сооружений не превышают (не менее) соответствующих критериев безопасности 1-го уровня сооружения, можно эксплуатировать без разработки каких-либо мероприятий, повышающих безопасность его эксплуатации [30].

Удовлетворительное (частично неработоспособное) эксплуатационное состояние ГТС – состояние, при котором значение хотя бы одного контролируемого показателя стало больше (меньше) соответствующих критериев безопасности 1-го уровня, но значения контролируемых показателей сооружения не превышают (не менее) соответствующих критериев безопасности 2-го уровня, и сооружение находится под действием нагрузок и воздействий, не превышающих предусмотренные проектом значения нагрузок особого сочетания [30].

При этом ГТС можно эксплуатировать при условии разработки и выполнения на определенные сроки необходимых мероприятий. Эти мероприятия разрабатываются на основе анализа конкретных показателей по факторам, которые могут создать аварийную ситуацию, и содержат необходимые меры по нейтрализации действия таких факторов.

Предаварийное (предельное) эксплуатационное состояние ГТС – состояние, при котором сооружение имеет повреждения или дефекты, при которых оно не может эксплуатироваться при воздействии основного сочетания нагрузок в виду угрозы аварии и (или) находится под воздействием особого сочетания нагрузок, превышающих допускаемые проектом значения с угрозой аварии, и (или) появляются признаки прогрессирующего развития деструктивных процессов, необратимо ведущих к аварии [30].

При таком состоянии ГТС его нельзя эксплуатировать в проектом режиме.

При специальном обосновании допускается устанавливать один уровень критериев безопасности, определяемых по количественным показателям безопасности при основном сочетании нагрузок.

Приведенное, по-видимому, целесообразно использовать для ГТС III и IV класса. В то же время, вызывает вопросы почему предлагается учитывать только количественные показатели критериев безопасного 1-го уровня? Ведь для этих сооружений важное значение имеют и качественные показатели, которые часто дают более наглядное представление о состоянии ГТС и которые устанавливаются легко и просто по результатам визуальных наблюдений. Другим вопросом, возникающим при рассмотрении данного указания Инструкции, является то, что в инструкции не учитывают количественные показатели критериев безопасного 2-го уровня при особом сочетании нагрузок, которые представляются не менее важными для оценки безопасности, чем количественные показатели 1-го уровня. Именно количественные показатели 2-го уровня являются определяющими при оценке безопасности ГТС, поскольку от них, в первую очередь, зависит вероятность возникновения аварии на ГТС.

Увеличение (уменьшение) фактического значения одного или нескольких контролируемых показателей по отношению к соответствующим критериям безопасности 1-го уровня будет указывать на то, что состояние ГТС не отвечает требованиям действующих строительных норм и правил (теперь сводов правил), правилам безопасной эксплуатации ГТС по условиям нормальной эксплуатации в проектом режиме.

Увеличение (уменьшение) фактического (измеренного на сооружении) значения одного или нескольких показателей по отношению к соответствующим критериям безопасности 2-го уровня говорит о наступлении состояния, при котором дальнейшая эксплуатация ГТС в проектом режиме является нарушением Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений».

Комплексная оценка безопасности ГТС, наряду с оценкой эксплуатационного состояния на основе сравнения фактических значений контролируемых показателей состояния ГТС с соответствующими критериями безопасности, включает оценку уровня риска аварии, которая, как правило, дается в декларации безопасности ГТС.

Безопасность ГТС считается полностью обеспеченной, если эксплуатационное состояние ГТС оценивается как надежное (работоспособное) [30], значения контролируемых показателей не превышают (не менее) соответствующих критериев безопасности 1-го уровня.

В случае наступления эксплуатационного состояния ГТС, которое оценивается как удовлетворительное (частично неработоспособное), при превышении (уменьшении) значений одного или нескольких показателей критериев безопасности 1-го уровня следует проверить достоверность результатов измерений и вычислений, а также обоснованность принятых критериев безопасности.

Превышение одного или нескольких значений контролируемых показателей соответствующих критериев безопасности 2-го уровня следует считать признаком перехода сооружения в предаварийное (предельное) состояние [31], при котором дальнейшая эксплуатация ГТС в проектом режиме запрещается.

В приложении к Инструкции приведен рекомендуемый перечень для выбора контролируемых количественных и качественных показателей состояния ГТС.

Анализ данной Инструкции показывает, что она рекомендуется для всех классов ГТС (I–IV классов), а в п. 3.2 указывается о применении при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации ГТС при комплексной оценке состояния безопасности накопителей жидких промышленных отходов. Поэтому настоящий документ имеет ограниченную область применения только для накопителей промышленных ГТС, а, следовательно, не может применяться для сооружений других отраслей, в частности, для ГТС водохозяйственного комплекса.

Недостатками представленных количественных и качественных показателей

следует считать отсутствие их систематизации по группам и по отдельным элементам сооружения, а также полное несоответствие количественных и качественных показателей между собой (применительно к отдельным элементам ГТС), что затрудняет их использование при оценке по критериям безопасности 1-го и 2-го уровней.

Другой документ по определению критериев безопасности (Методика [31]) рекомендуется к обязательному применению на объектах энергетического комплекса при разработке, утверждении и применении критериев безопасности ГТС всех классов. В таблице 3.3 представлены количественные и качественные показатели состояния ГТС.

Таблица 3.3 – Количественные и качественные показатели состояния гидротехнических сооружений (по РД 03-443-02)

Контролируемый показатель	
количественный	качественный
1	2
1.1 Геометрический контур дамбы (плотины) и ее конструктивных элементов	1.1 Наличие и развитие просадок или пучения грунта на гребне, бермах или откосах
1.2 Разница в отметках гребня дамбы (плотины) и уровня воды в прудке	1.2 Наличие сосредоточенных ходов фильтрации (грифоны в нижнем бьефе и на низовом откосе)
1.3 Характеристики материала тела дамбы (плотины), и их конструктивных элементов (дренажей, упорной призмы, противофильтрационных, переходных и защитных слоев и др.)	1.3 Локальные оползни (обрушения) откосов
1.4 Отметки уровня воды в верхнем и нижнем бьефах	1.4 Повреждения волнозащитных креплений откосов дамб
1.5 Вертикальные и горизонтальные перемещения и деформации сооружений, х оснований (в пределах активной и приконтактной зон)	1.5 Наличие полостей и каверн в основании и теле сооружений
1.6 Напряжения в сооружениях и их основаниях	1.6 Наличие и развитие трещин в зонах сопряжения элементов сооружений и оснований с различными механическими и фильтрационными свойствами
1.7 Параметры сейсмических колебаний оснований и динамической реакции сооружений	1.7 Засорение, зарастание, промерзание дренажных устройств
1.8 Пьезометрические напоры и их градиенты в теле сооружения, основании	1.8 Наледи на выходах профильтровавшейся воды
1.9 Физико-химические свойства и химический состав фильтрующейся воды, подземных вод, а также загрязняющих грунты основания компонентов	1.9 Высачивание воды и намокание откосов
1.10 Поровое давление и интенсивность его рассеивания в водоупорных элементах грунтовых плотин (дамб) и оснований	1.10 Наличие мутности профильтровавшейся воды

Продолжение таблицы 3.3

1	2
1.11 Фильтрационные деформации грунтовых плотин (дамб) и их оснований	1.11 Ориентировочные объемы и уровень наносов в верхнем бьефе
1.12 Незатухающий характер деформаций (по графикам)	1.12 Появление выноса грунта из тела сооружения, образование обширных ходов фильтрации
1.13 Характерное для оползня направление векторов деформаций (формирование поверхности обрушения)	1.13 Состояние защитных покрытий
1.14 Отметки депрессионной поверхности фильтрационного потока в теле грунтовых сооружений	1.14 Характер поверхности: ровный, волнистый, с локальным повышением (пучением) или понижением, с равномерным или неровным травяным покровом, с признаками выветривания; с зоной влаголюбивой растительности
1.15 Быстрый подъем уровня воды выше НПУ (ФПУ)	1.15 Ходы животных-землероев; наличие водомоин, промоин, оврагов; намыв грунта в виде гряд и валов
1.16 Длина намывного пляжа	1.16 Трещины: стабилизировавшиеся или нет; продольные или поперечные; поверхностные, глубинные или сквозные; формирующие тело обрушения или нет
1.17 Фильтрационный расход воды (суммарный и по отдельным участкам сооружений и их оснований), поступающий в дренажные устройства и подземные выработки или выходящий на дневную поверхность	1.17 Проявление процесса фильтрации воды в виде зон, влаголюбивой растительности, мокрых пятен, наледи зимой, луж, болот, высачивания воды, ключей, грифонов, ручьев
1.18 Динамика увеличения фильтрационных расходов	1.18 Изменение линейности кюветов, берм, лотков и др.
1.19 Температура сооружений и их оснований в приконтактной зоне (для плотин мерзлого типа)	1.19 Образование промоин в намытом грунте или застойных зон, где возможно отложение мелких фракций
1.20 Параметры технологии намыва (в соответствии с проектом): гран состав хвостов, плотность, влажность, расход поступающей пульпы, температура и др. в пределах упорной призмы	1.20 Выпор грунта на откосе или у подошвы дамбы (плотины)
1.21 Интенсивность намыва, толщина намываемых слоев и время отдыха пляжа	1.21 Наличие морозобойных трещин, гидролакколитов
1.22 Весовая консистенция пульпы	1.22 Следы выщелачивания грунтов основания
1.23 Диаметр, длина и расстояние между пульповыпусками	
1.24 Высота конуса намыва (при намыве под лед)	

Эксплуатационное состояние сооружений в Методике [31] классифицируется на нормальное, потенциально опасное и предаварийное:

- *нормальное* – состояние, при котором сооружение соответствует всем требованиям нормативных документов и проекта, при этом значения диагностических показателей состояния сооружения не превышает своих критериальных значений K_1 ;

- *потенциально опасное* – состояние, при котором значение хотя бы одного диагностического показателя стало большим (меньшим) своего первого (предупреждающего) уровня критериальных значений (значений K_1) или вышло за пределы прогнозируемого при данном сочетании нагрузок интервала значений. Потенциально опасное состояние сооружения не отвечает нормативным требованиям, но эксплуатация ГТС не приводит к угрозе немедленного прорыва напорного фронта и сооружение может ограниченное время эксплуатироваться;

- *предаварийное* – состояние, при котором значение хотя бы одного диагностического показателя стало большим (меньшим) второго (предельного) уровня критериальных значений (значений K_2). В этом случае эксплуатация сооружения в проектных режимах недопустима без оперативного проведения мероприятий по восстановлению требуемого уровня безопасности и без специального разрешения органа надзора.

Для сооружений IV класса, а также при специальном обосновании для сооружений III класса допускается устанавливать один уровень критериальных значений K_2 [31]. Анализ Методики показывает, что она рекомендуется к обязательному применению только для ГТС энергетики, т. е. в область применения не входят ГТС водохозяйственного комплекса.

4 ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ ДЛЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

4.1 Методы оценки риска аварий гидротехнических сооружений

В постановлении Правительства РФ от 21.05.2007 № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» установлено, что чрезвычайные ситуации могут быть локального, муниципального, межмуниципального, регионального, межрегионального и федерального характера.

Согласно СП 58.13330.2012 [2] оценка надежности и безопасности ГТС осуществляется с использованием метода предельных состояний. Вместе с тем для более полного раскрытия неопределенностей по факторам, определяющим надежность и безопасность ГТС, допускается применение вероятностного анализа.

Факторы риска повреждений или разрушений сооружений разделяются на следующие: природный (стихийный), технологический (антропогенный) и социально-экономический характеры.

К природным (стихийным) факторам относятся экстремальный сток рек, ледовые явления, нагоны, опасные метеорологические явления (бури, ураганы, ливни, снегопады, смерчи и др.), долговременные изменения климата, землетрясения, цунами, оползни, обвалы, снежные лавины и сели, вулканические извержения и др. Особые факторы риска характерны для сооружений, возведенных на вечной мерзлоте, в первую очередь недооценка криогенных процессов в теле плотин.

К факторам технологического (антропогенного) характера относятся ошибки при изысканиях, проектировании и строительстве сооружений, а также износ оборудования, некомпетентность и халатность эксплуатационного персонала.

Факторами социально-экономического характера являются организационно-управленческие недостатки в водном хозяйстве страны, потеря собственника некоторыми сооружениями, отсутствие финансирования для ремонтных и профилактических работ.

Важной задачей, решаемой в процессе исследований риска, является установление возможностей его изменения, т. е. управление риском. Здесь под управлением понимается комплекс мер и воздействий на факторы риска, направленные на минимизацию возможных потерь.

В процессе управления риском определяется совокупность всех задач, стоящих перед проектировщиками, строителями и эксплуатационными службами, как единая система выявления всех угроз, оценки величины риска путем анализа вероятности или частоты появления и анализа их последствий.

Риск можно оценить количественно, используя разработанные методы, например QRA – метод количественной оценки риска.

Полученная величина риска должна быть оценена по критерию допустимости, который назначается в соответствии с принятой концепцией управления риском.

Выделяют четыре уровня оценки и управления риском [46]:

1 Глобальная оценка риска – исследование масштаба проблемы и анализ ее составляющих с целью формулировки и выработки политики и принципов управления риском.

2 Относительная оценка риска с целью определения приоритетов и дальнейших действий по отношению к имеющейся проблеме.

3 Оценка риска на конкретной площадке для выявления основных угроз, уровней риска и принятия решений по снижению степени риска до допустимого уровня.

4 Построение карт риска с целью зонирования угроз и осуществления планиро-

вания контроля над рисками в данном регионе.

Метод количественной оценки риска (QRA) активно развивается в западной практике и позволяет ответить на следующие вопросы [46]:

- 1 Что может вызвать ущерб (определение угроз)?
- 2 Как часто могут происходить аварии (оценка частоты нежелательного события)?
- 3 Что и в какой степени может нарушиться в результате аварии (оценка последствий события)?
- 4 Какова возможность возникновения аварии (количественная оценка риска)?
- 5 Каково наше отношение к возможной аварии (оценка допустимости риска)?
- 6 Что следует сделать (управление риском)?

При расчете рисков и обеспечения безопасности сооружений используются детерминистические и вероятностные методы.

Детерминистические методы основаны на проектировании с использованием определенных величин коэффициентов надежности. В этих методах вводятся некоторые допущения по отношению к переменным прочности $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и нагрузки $(y_1, y_2, \dots, y_n)$. При этом определенный запас между расчетной прочностью R и нагрузкой S создается общим коэффициентом надежности γ_0 .

Коэффициенты надежности в какой-то степени отражают неполное знание реальной геотехнической ситуации, а их величина зависит от опыта, накопленного при проектировании и эксплуатации сооружений. Коэффициенты надежности помогают проектировщику в экспертной оценке ситуации, однако они ни прямо, ни косвенно не учитывают аварии и ущерб, связанный с ними.

Вероятностные методы являются более прогрессивными, в них безопасность сооружения оценивается в терминах возможности разрушения P_f , например, 1:2000, 1:10000 и т. д. При этом принимается допущение о потенциальных отклонениях величины различных параметров, которые рассматриваются как стохастические переменные.

Вероятностные методы расчета делятся на методы с использованием так называемых уровней I, II и III.

Метод с использованием уровня I рекомендован Еврокодами. В нем применяется серия частных коэффициентов надежности, на которые делятся или умножаются переменные, в результате чего получаются так называемые проектные значения.

При методах расчета с использованием уровней II и III требование к надежности сооружения выражается в понятиях вероятности разрушения или аварии:

$$P[R(x_1, \dots, x_n) < S(y_1, \dots, y_n)] = P(Z < 0) \leq P_{fo}, \quad (4.1)$$

где Z – функция надежности;

P_{fo} – приемлемая вероятность аварии.

Методы расчета с применением уровней II и III реализуются при помощи программных комплексов, использующих, например, метод конечных элементов. Эти методы используются в основном при расчете сложных их ГТС.

Вопросы оценки последствий возможных аварий на ГТС в настоящее время достаточно хорошо изучены. Существуют апробированные методики оценок последствий, которые хорошо зарекомендовали себя в практике декларирования ГТС. В большинстве своем они базируются на методах анализа «деревьев событий» [47].

На рисунке 4.1 приведен пример одного из таких «деревьев», в котором используются условные, а не истинные вероятности при условии наступления события – аварии.

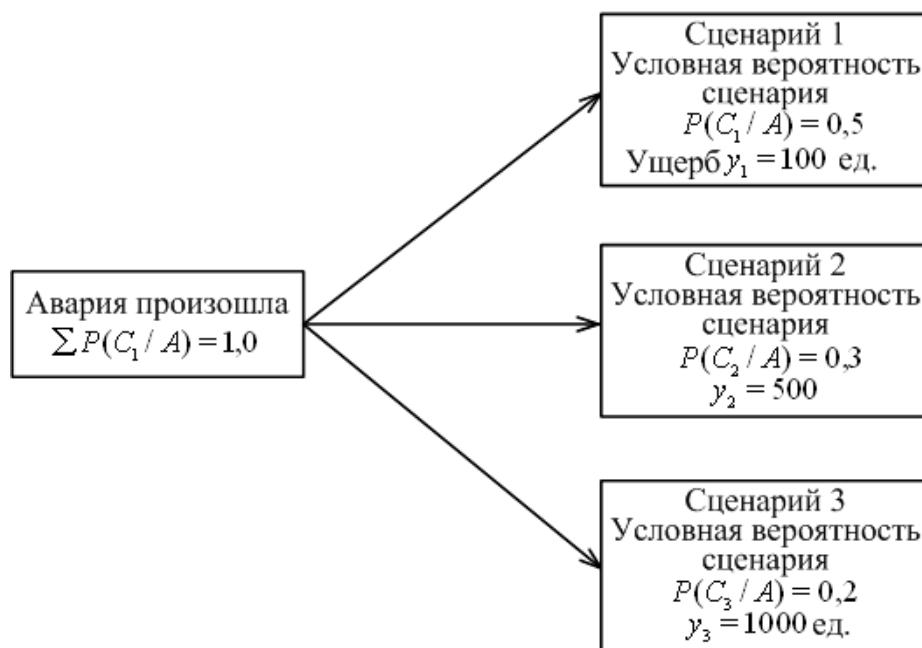


Рисунок 4.1 – Дерево исходов аварии

Как видно из примера, анализ последствий возможных аварий привязан к конкретному объекту и отражает его индивидуальную специфику (месторасположение, параметры, особенности конструкции и т. д.).

Однако при оценке риска основные трудности связаны с оценкой вероятности возникновения самой аварии – $P(A)$.

В настоящее время существуют методики оценки $P(A)$ для аварий, связанных с вероятностью превышения гидрологических характеристик, в то время как для иных видов аварий они сложны, громоздки и трудоемки в основном из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. В этой связи обычно $P(A)$ принимают как среднестатистическое значение для данного типа ГТС, что, к сожалению, не отражает специфики декларируемого сооружения. К тому же из рассмотрения зачастую выпадают некоторые специфические причины возникновения аварий и, соответственно, исключаются из рассмотрения индивидуальные меры безопасности, направленные на предупреждение аварии на конкретном сооружении. В то же время, как показывает практика, меры по снижению вероятности аварии на два-три порядка эффективнее мер, направленных на снижение возможных ущербов по критерию «затраты – результаты».

Одним из возможных решений создавшейся проблемы является оценка вероятности возникновения события $P(A)$ путем имитационного моделирования (ИМ) процесса возникновения происшествия в системе «оператор – оборудование – рабочая среда». Такое моделирование является компромиссным между неопределенностью исходных данных и точностью получаемых оценок. Кроме того, с помощью ИМ можно оптимизировать комплекс мероприятий безопасности по уменьшению вероятности $P(A)$, т. е. предупреждение аварий на конкретном ГТС.

В зарубежной практике расчетов (Нидерланды, Канада, США) используются следующие понятия:

- *индивидуальный риск (IR)*, который определяется как вероятность того, что обычный человек, постоянно пребывая в данном месте и не имея средств защиты, погибнет в результате несчастного случая, связанного с опасной деятельностью:

$$IR = P_f P_{d/f}, \quad (4.2)$$

где P_f – вероятность аварии (лет⁻¹);

$P_{d/f}$ – вероятность гибели индивидуума в результате аварии исходя из предположения его постоянного пребывания в этом месте при отсутствии средств защиты.

В Нидерландах риски, измеряемые величиной менее 10^{-6} в год, сводятся к практически целесообразному низкому уровню. Этот норматив относится к более или менее невольным рискам, когда речь идет о размещении опасных видов деятельности для заселенных областей;

- *общественный риск* как «соотношение между частотой реализации определенных угроз и числом людей, страдающих от определенного уровня результирующего вредного воздействия в данной популяции». В то время как индивидуальный риск сопряжен с возможностью гибели в определенном месте, общественный риск подразумевает, что гибель людей может произойти в любом месте данной территории, независимо от точного местоположения угрозы в границах данной территории.

Степень общественного риска можно определить по количеству ожидаемых несчастных случаев с летальным исходом $E(N)$.

Контроль рисков, связанных со строительством плотин, также основывается на подсчете ожидаемого числа летальных исходов. Соответствующие стандарты предлагаются Координационным комитетом Британской Колумбии (Канада) – $E(N) < 10^{-3}$ (жертв/ год) и Бюро мелиорации (США) – $E(N) < 10^{-2}$ (жертв/ год).

В Нидерландах в качестве пороговой величины используется норматив по общему риску $TR = \beta 100$, который учитывает уже упомянутый ранее коэффициент благоразумия β ;

- *экономический риск* – ожидаемая величина экономического ущерба $E(D)$. Проблема приемлемого уровня риска по существу является проблемой принятия экономического решения. При использовании метода экономической оптимизации общие затраты в системе C_{tot} определяются путем суммирования капиталовложений I на повышение безопасности системы и ожидаемой величины экономического ущерба. Оптимальная экономическая ситуация подразумевает минимизацию общих затрат:

$$\min (C_{tot}) = \min (I + E(D)). \quad (4.3)$$

На основании этого критерия можно определить оптимальную вероятность аварии в системе, когда капиталовложения (I) и ожидаемый экономический ущерб $E(D)$ зависят от вероятности аварии.

Координационный комитет Британской Колумбии предложил установить для плотин годовой предел ожидаемого экономического ущерба, при котором финансовые риски в расчете на одну плотину не должны превышать:

$$E(D) < \$10000 \text{ (год}^{-1}\text{)}. \quad (4.4)$$

Ожидаемую величину экономического ущерба можно подсчитать на основании вероятности наводнения P_b , ущерба в результате наводнения D , дисконтной ставки r .

Теперь можно определить общие затраты как сумму капиталовложения и ожидаемой величины экономического ущерба. Экономический оптимум достигается при минимизации общих затрат.

С помощью выведенного соотношения между общими затратами и высотой плотины можно определить оптимальную вероятность наводнения $P_{b,opt}$ и оптимальную высоту дамбы h_{opt} .

По методу Фелла (США) [48] количественная оценка вероятности (среднегодовой частоты) отказов грунтовой плотины по причинам потери устойчивости откосов, нарушения суффозионной (фильтрационной) прочности тела и основания, осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом:

1 Определяется категория грунтовой плотины $C_i - C_1 - C_9$.

2 Выбираются коэффициенты, влияющие на вероятность отказов грунтовой плотины по внутренним причинам:

- устойчивость низового откоса плотины в нормальных условиях эксплуатации $F_1 = f(\eta_{но})$, изменяется от 0 до более 32;

- конструкция плотины $F_{2S} = f(C_1)$, изменяется от 0,5 до 16;

- тип плотины $F_{2S} = f(C_1)$, изменяется от 0,5 до 12;

- параметры и качество устройства фильтров со стороны низового откоса плотины $F_3 = FG + FW$, где FG – гранулометрический состав фильтров, изменяется от 1 до 6; FW – толщина переходных слоев обратного фильтра, изменяется от 0 до 16;

- пропускная способность дренирующих слоев противофильтрационных элементов плотины $F_4 = f(C)$, изменяется от 0 до 16;

- свойства грунтов в противофильтрационном элементе плотины F_5 , зависит от рода грунта и наличия переходных зон А и их отсутствии В, изменяется от 1 до 6 при А и от 1 до 16 при В;

- условия примыкания плотины к основанию и бортам долины плотины F_6 к основанию зависит от угла примыкания, изменяется от 0 до 8;

- наличие трубопроводов в теле плотины и контроль за ними F_7 зависит от размеров трубопровод, изменяется от 0 до 16;

- влияние зон контакта грунта тела плотины с элементами из других материалов F_8 зависит от размеров контактов и их положения, изменяется от 0 до 8;

- геологическое строение основания плотины F_9 зависит от рода грунтов основания и изменяется от 1 до 16 для скальных, 4–16 для аллювиальных или коллювиальных и других оснований;

- степень выветренности основания F_{10} зависит от рода фунтов основания, изменяется от 0 до 16;

- градиент фильтрации в основании F_{11} зависит от рода грунтов основания и значений градиента напора при НПУ, изменяется от 0 до 6 для скальных оснований и от 1 до 16 для нескальных;

- качество устройства фильтров дренажа в основании плотины F_{12} зависит от гранулометрического состава и толщины слоев фильтра, изменяется от 0 до 16;

- характеристика прочностных свойств основания F_{13} зависит от рода грунтов основания, изменяется от 0 до 16.

3 Вычисляются коэффициенты риска, характеризующие нарушение:

- устойчивости откосов плотины:

$$F_{SS} = F_1 + 0,5(F_{2S} + F_4 + F_9 + F_{13}); \quad (4.5)$$

- суффозионной (фильтрационной) прочности грунтов тела плотины:

$$F_{EE} = F_{2p} + F_3 + F_5 + F_7 + 0,5(F_4 + F_6 + F_8); \quad (4.6)$$

- суффозионной (фильтрационной) прочности фунтов основания:

$$F_{FE} = F_{2p} + F_4 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}. \quad (4.7)$$

4 Определяется вероятность P_{SS} , P_{EE} и P_{FE} отказа грунтовой плотины за время срока ее службы по графику связи коэффициентов риска с вероятностью отказа (рисунок 4.2).

5 Определяется среднегодовая вероятность отказа, допустимая для среднего срока службы фунтовой плотины путем деления значений P_{SS} , P_{EE} и P_{FE} на 30 лет (средний срок службы плотин).

Осуществляется корректировка результатов с учетом качества мониторинга, уровня эксплуатации плотины, признаков нарушения устойчивости откосов или фильтрационных деформаций, которая выполняется экспертной группой, если харак-

теристики сооружения обладают рядом специфических отличий, в частности:

1 Допускается понижение в 5–10 раз среднегодовых вероятностей отказа плотины или дамбы, если сооружение хорошо запроектировано, проведены глубокие и всесторонние исследования площадки возведения, за сооружением осуществляется качественное наблюдение и контроль, имеются адекватные планы противоаварийных мероприятий, проводится регулярный (ежегодный) осмотр сооружения.

2 Допускается повышение среднегодовых вероятностей отказа плотины или дамбы, если:

- контроль за состоянием сооружения не ведется или наблюдения редки и нерегулярны, можно увеличить вероятность в 5–10 раз;

- анализируемое сооружение возведено без инженерного обоснования, соответствующей подготовки основания и т. п., вероятности увеличиваются на порядок;

- есть признаки нарушения устойчивости откосов плотины или дамбы. В данном случае можно выделить следующие ситуации:

- 1) при наличии следов существовавших сглаженных провалов на откосе вероятности увеличиваются в 5–10 раз;

- 2) при наличии свежих провалов, продолжающемся обрушении или оползании откосов среднегодовая вероятность отказа может быть принята равной 0,2 1/год.

3 При наличии признаков суффозионных процессов допускается:

- при сосредоточенных выходах чистой воды, объем которых постепенно увеличивается ($\approx 10\%$ в год), вероятность отказа увеличить в 2–10 раз;

- при интенсивно увеличивающихся в объеме выходах чистой воды (30–100 % в год) среднегодовая вероятность отказа принимается равной 0,1 1/год.

4 При нарастании мутности воды среднегодовая вероятность отказа может быть принята равной 0,1–0,2 1/год.

Последний метод (метод Фелла) можно отнести к экспертным методам, недостатком этого метода является очень большой диапазон изменения коэффициентов, влияющий на вероятность отказов, который достигает для устойчивости откосов 32, а для конструкции плотины до 16.

К методам, основанным на экспертной оценке риска аварий, также относятся методы ФГУП ВНИИ ВОДГЕО [34] и ОАО «НИИЭС» [35, 67], которые рассматриваются в п. 4.2.

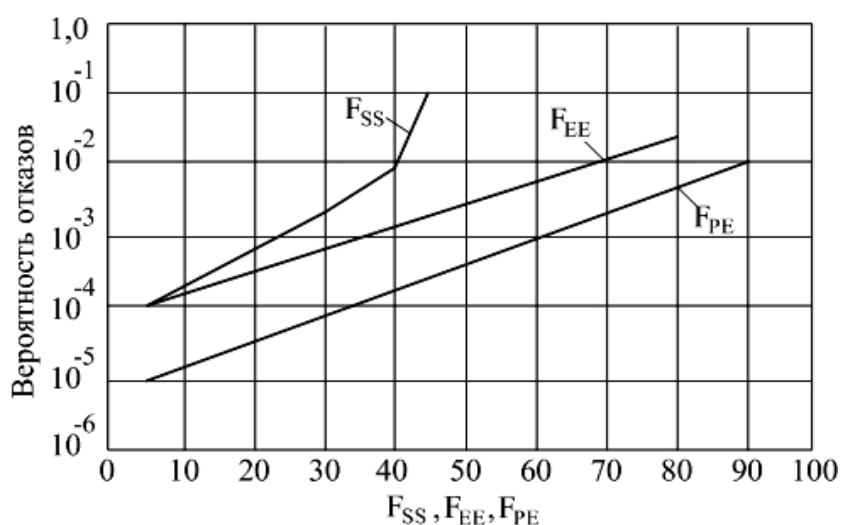


Рисунок 4.2 – Зависимость вероятности отказов плотины от коэффициентов риска

4.2 Применение методов экспертной оценки риска аварий для низконапорных гидротехнических сооружений

Большое применение для оценки риска аварий низконапорных ГТС водохозяйственного комплекса нашел метод ФГУП ВНИИ ВОДГЕО [34], который апробирован для объектов водного хозяйства. Так как он базируется на экспертных оценках, этот метод нашел применение на ГТС IV класса.

Метод ВОДГЕО предназначен для экспертной оценки риска аварий ГТС при декларировании их безопасности, экспертизе декларации безопасности, страховании рисков аварий и формировании Российского регистра ГТС.

В основу метода положена интегральная оценка состояния ГТС по трем степеням: опасности, уязвимости и риска аварии, каждое из которых является достаточно сложной функцией многих факторов.

За основу количественной оценки опасности, уязвимости, риска аварий ГТС принят широко известный подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу.

Опасность аварии ГТС определяется следующими показателями:

- опасность превышения принятых при обосновании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий;
- обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям;
- соответствие проекту конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания;
- возможные последствия и ущерб при аварии ГТС.

Степень опасности по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок.

Оценка риска аварии производится по результатам экспертной оценки степени опасности аварии и степени уязвимости ГТС. Степень риска аварии оценивается по принципу пересечения этих событий и количественно выражается коэффициентом риска аварии $r_a = \lambda \nu_y$.

Физический смысл коэффициента r_a стоит в том, что он представляет собой долю от риска, который имеет место на ГТС при наиболее неблагоприятных сочетаниях показателей опасности (код 3334, $\lambda = 1$) и уязвимости (код 333, $\nu_y = 1$).

Степень риска аварии оценивается по величине коэффициента аварии r_a в соответствии с данными таблицы 4.1.

Таблица 4.1– Коэффициенты риска аварии r_a

Степень риска аварии	r_a
Малая (нормальный уровень безопасности)	$r_a < 0,15$
Умеренная (пониженный уровень безопасности)	$r_a < 0,15 < 0,30$
Большая (неудовлетворительный уровень безопасности)	$0,30 < r_a < 0,50$
Аварийная ситуация (опасный уровень)	$r_a > 0,5$

Диапазон изменений коэффициента r_a принят с учетом степени риска аварии с качественными характеристиками уровня безопасности, регламентированными Инструкцией о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений.

При значениях $r_a < 0,15$ (малая степень риска аварии) уровень безопасности ГТС оценивается как нормальный.

Сооружение удовлетворяет всем проектным требованиям по назначению и конструктивной надежности, а также современным нормативным требованиям; эксплуатация осуществляется в соответствии с действующими законодательными актами, нормами и правилами.

Дальнейшая эксплуатация сооружений и оборудования возможна без проведения каких-либо технических или организационных мероприятий по повышению безопасности при обеспечении мониторинга безопасности, своевременном выполнении плановых ремонтно-профилактических работ.

В области значений $0,15 < r_a < 0,30$ (умеренная степень риска аварии) уровень безопасности ГТС оценивается как пониженный.

Имеют место те или иные отклонения от правил безопасной эксплуатации, которые не устранены своевременно в ходе плановых мероприятий по обеспечению нормального уровня безопасности, которые, однако, не препятствуют возможности выполнения ГТС заданных эксплуатационных функций.

Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме недопустима без проведения в установленные органами государственного надзора сроки тех или иных технических (вплоть до капитального ремонта, замены оборудования и др.) и организационных мероприятий по снижению риска аварии и восстановление нормального уровня безопасности на основе анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости.

Значения коэффициента аварии $r_a > 0,5$ свидетельствуют о возникновении аварийной ситуации, уровень безопасности ГТС оценивается как опасный.

Дальнейшая безопасная эксплуатация сооружения в проектном режиме возможна при обязательном выполнении в согласованные органами государственного надзора сроки мероприятий по повышению уровня безопасности, конкретный перечень которых вытекает из анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости. При большой степени риска аварии $0,30 < r_a < 0,50$ уровень безопасности ГТС оценивается как неудовлетворительный.

Имеются отклонения от проектного состояния и нарушения правил безопасной эксплуатации, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации.

Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме по условиям аварии недопустима и должна осуществляться в соответствии с требованиями Положения об эксплуатации гидротехнического сооружения и обеспечения безопасности гидротехнического сооружения, разрешение на строительство и эксплуатацию которого аннулировано, а также гидротехническое сооружения, подлежащего консервации, ликвидации либо не имеющего собственника, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 27 февраля 1999 г. № 237.

Расчеты коэффициента риска r_0 позволяют определить не только уровень безопасности ГТС, но и оценивать вероятность возникновения аварии $P_a(ГТС)$ по формуле:

$$P_a(ГТС) = 0,5 \operatorname{erfc} \left[\beta \frac{\ln(r_a / r_k)}{\ln(r_{\text{доп}} / r_k)} \right], \quad (4.8)$$

где erfc – вероятностная функция;

β – коэффициент вероятности, зависящий от класса ГТС;

r_a – риск аварии ГТС;

r_k – катастрофическое значение коэффициента риска ($r_k = 1$);

$r_{\text{доп}}$ – допускаемое значение коэффициента риска, выше которого не обеспечивается нормальный уровень безопасности ГТС ($r_{\text{доп}} = 0,15$).

В таблице 4.2 приведены допустимые значения вероятностей возникновения аварий (по СП 58.13330.2012 [2] – допускаемые значения уровня риска аварий) на напорных ГТС и значения коэффициента β .

Таблица 4.2 – Допускаемые значения уровня риска аварий на напорных гидротехнических сооружениях и значения коэффициента вероятности β

Класс сооружения	Уровень риска аварии $P_{\text{доп}} (ГТС), 1/\text{год}$	Значение коэффициента вероятности β
I	$5 \cdot 10^{-5}$	2,75
II	$5 \cdot 10^{-4}$	2,75
III	$2,5 \cdot 10^{-3}$	1,95
IV	$5 \cdot 10^{-3}$	1,90

В таблице 4.3 приведена классификация уровня риска аварий для оценки фактического уровня риска по полученному расчетному значению.

Таблица 4.3 – Классификация уровня риска по значению расчетного риска $P_a(ГТС), 1/\text{год}$

Класс сооружения	Приемлемый (допускаемый) уровень риска	Условно приемлемый уровень риска	Повышенный уровень риска	Недопустимый уровень риска
I	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-2}$	$> 7 \cdot 10^{-2}$
II	$< 5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2} - 0,12$	$> 0,12$
III	$< 2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2} - 0,16$	$> 0,16$
IV	$< 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} - 0,18$	$> 0,18$

Метод НИИЭС применяется для оценки уровня риска эксплуатируемых ГТС [36, 37] и рекомендуется осуществлять в форме обобщенного показателя J , объединяющего влияние количественных и качественных факторов безопасности, который определяется по формуле:

$$J = (J_{\text{max}} + q) - \prod_i^n [(J_{\text{max}} + q) - J_i] / [(J_{\text{max}} + q) - J_{\text{min}}]^{n-1}, \quad (4.9)$$

где $J = \max J_i (i = 1, 2, \dots, n)$, $J = \sum_1^n J_i / n$, J_i – значения факторов безопасности одного иерархического уровня;

J_{max} , J_{min} – максимальное и минимальное количественные значения интервала [35], в который показывают качественные оценки факторов;

q – величина, вводимая на экспертной основе, которую следует принимать равной 0,1.

Итоговая количественная и качественная оценки безопасности сооружений производится по обобщенному показателю в зависимости от количественного его значения, которому соответствуют следующие уровни безопасности:

- $0 < J \leq 3$ – нормальный уровень безопасности;
- $3 < J \leq 4$ – допустимый (низкий) уровень безопасности;

- $4 < J \leq 5$ – предельный (низкий) уровень безопасности;
- $5 < J \leq 6$ – недопустимый (опасный) уровень безопасности.

Однако по мнению специалистов по безопасности ГТС А. Г. Василевского и В. С. Серкова, данная методика имеет ряд недостатков:

- специальный показатель J , определяющий отклонение состояние эксплуатируемого ГТС от требований нормативных документов и проекта, по существу остался нераскрытым с физической точки зрения;
- не учитывается метод анализа рисков на основе «деревьев отказа и деревьев событий».

4.3 Наиболее вероятные сценарии возникновения аварий применительно к низконапорным гидротехническим сооружениям

Основными диагностическими показателями грунтовых плотин малых водохранилищ объемом от 1 до 10 млн м³, определяемых в результате обследований, являются: превышение гребня плотины над НПУ, пропускная способность открытых и трубчатых водосбросов, просадка гребня плотины, состояние откосов плотины (оползание и разрушение волнами), усиленная фильтрация через тело и основание плотины [59].

ФГБНУ «РосНИИПМ» в 2007–2008 гг. были проведены обследования прудов и малых водохранилищ Ростовской области и Краснодарского края с ГТС IV класса (грунтовыми плотинами и водосбросными сооружениями), в том числе бесхозных ГТС [68, 69].

По результатам обследований выявлено, что техническое состояние многих из обследованных ГТС является неудовлетворительным или аварийным, а по уровню безопасности они соответствуют неудовлетворительному или опасному уровню. На 60 % обследованных объектах превышение гребня плотины над уровнем воды в верхнем бьефе занижено и составляет от 0,25–0,50 до 1,5–1,6 м, на большинстве прудов верховые откосы разрушены волнобоем, глубина разрушения составляет 1,5–2,0 м по всему фронту уреза воды. На открытых водосбросах сопрягающие сооружения разрушены.

Аналогичные результаты были получены Московским государственным университетом природообустройства при обследовании низконапорных гидроузлов Московской области [70, 71].

По данным статической обработки имеющихся данных об авариях грунтовых плотин [50] интенсивность отказов грунтовых плотин малых водохранилищ объемом от 1 до 10 млн м³ получена равной $7,75 \cdot 10^{-3}$ 1/год или 0,00775 [68], что превышает допускаемое значение уровня риска аварии по СП 58.13330.2012 для ГТС IV класса более чем в 1,5 раза.

4.3.1 Возможные сценарии аварий грунтовых плотин прудов и малых водохранилищ

На прудах и малых водохранилищах наибольшую опасность представляют гидродинамические аварии, возникающие при разрушении плотин. Такие аварии могут приводить к тяжелым последствиям и причинять значительный материальный ущерб населенным пунктам, сельскому хозяйству и др.

Как правило, такие аварии связаны с разрушением грунтовых плотин с образованием прорана, через который уходит полный или частичный объем водоема и затопляется нижерасположенная территория.

В основном плотины прудов и малых водохранилищ выполняются высотой до 10–15 м и относятся к IV классу ответственности.

Разрушения могут происходить по различным причинам. Возможные сценарии разрушения грунтовых плотин можно разделить на два уровня (рисунок 4.3) [58].

На первом уровне выделяют три группы сценариев, основанных на воздействии гидролого-гидравлических факторов, фильтрационных и оползневых процессов.

Разрушения грунтовых плотин от гидролого-гидравлических факторов можно считать сценариями нарушения гидролого-гидравлической безопасности, от фильтрационных процессов – сценариями нарушения фильтрационной безопасности, от оползневых процессов – сценариями нарушения статической устойчивости.

На втором уровне представлены конкретные сценарии разрушения плотин, относящихся к трем выделенным группам. Так, для гидролого-гидравлических факторов рассматриваются сценарии разрушения грунтовых плотин при переливе через гребень вследствие паводка с превышением максимального расчетного расхода 1 % обеспеченности (для IV класса ответственности), снижения пропускной способности водосброса ниже проектной, недостаточного запаса превышения гребня плотины над ФПУ и НПУ вследствие просадок тела и основания плотины, воздействия волновых и нагонных явлений и др.

Для группы сценариев, обусловленных фильтрационными процессами, рассматриваются случаи разрушения вследствие выхода фильтрационного потока на низовой откос и береговые примыкания плотины в виде грифонов и ключей, превышения средних и выходных градиентов напора критических значений для тела и основания образования механической и химической суффозии грунта и др.

В качестве сценариев третьей группы рассматриваются сценарии разрушения плотин вследствие нарушения устойчивости низового откоса, образования на поверхности откоса оползневых бороздок, промоин, эрозионных канавок и сдвига массы грунта.

Авария напорного фронта ГТС приводит к образованию волны прорыва, распространяющейся в нижнем бьефе, и осушению верхнего бьефа. Территории, расположенные в долине реки ниже ГТС, подвергаются затоплению и воздействию ударной гидравлической волны, в акватории водохранилища возможно образование участков с большими скоростями течения, а также оползней и обрушений берега из-за фильтрации грунтовых вод.

Основные составляющие ущербов связаны с параметрами паводковой воды. Степень разрушения зданий и сооружений в первую очередь определяется максимальной удельной (на единицу ширины) энергией потока. При определении сельскохозяйственных и экологических ущербов существенными могут оказаться глубина и время затопления территории. При оценке возможных людских потерь важным фактором, кроме перечисленных, является время добегания волны прорыва до того или иного населенного пункта.

Точность прогнозирования гидродинамических параметров волны прорыва определяется:

- выбором сценария (сценариев) разрушения ГТС;
- точностью расчета волны прорыва в верхнем бьефе;
- точностью расчета распространения волны прорыва в нижнем бьефе.

Сценарий аварии ГТС с образованием волны прорыва предполагается как исходный для всех классов ГТС. При этом для ГТС I и II классов расчет производится для всех вариантов разрушения напорного фронта, для сооружений III и IV классов принимается вариант, как правило, прорыв земляной плотины, а для сооружений IV класса с малой емкостью водного объекта и небольшой высотой плотины – одиночный проран. Сценарии уточняются с учетом реального состояния элементов напорного фронта [34].

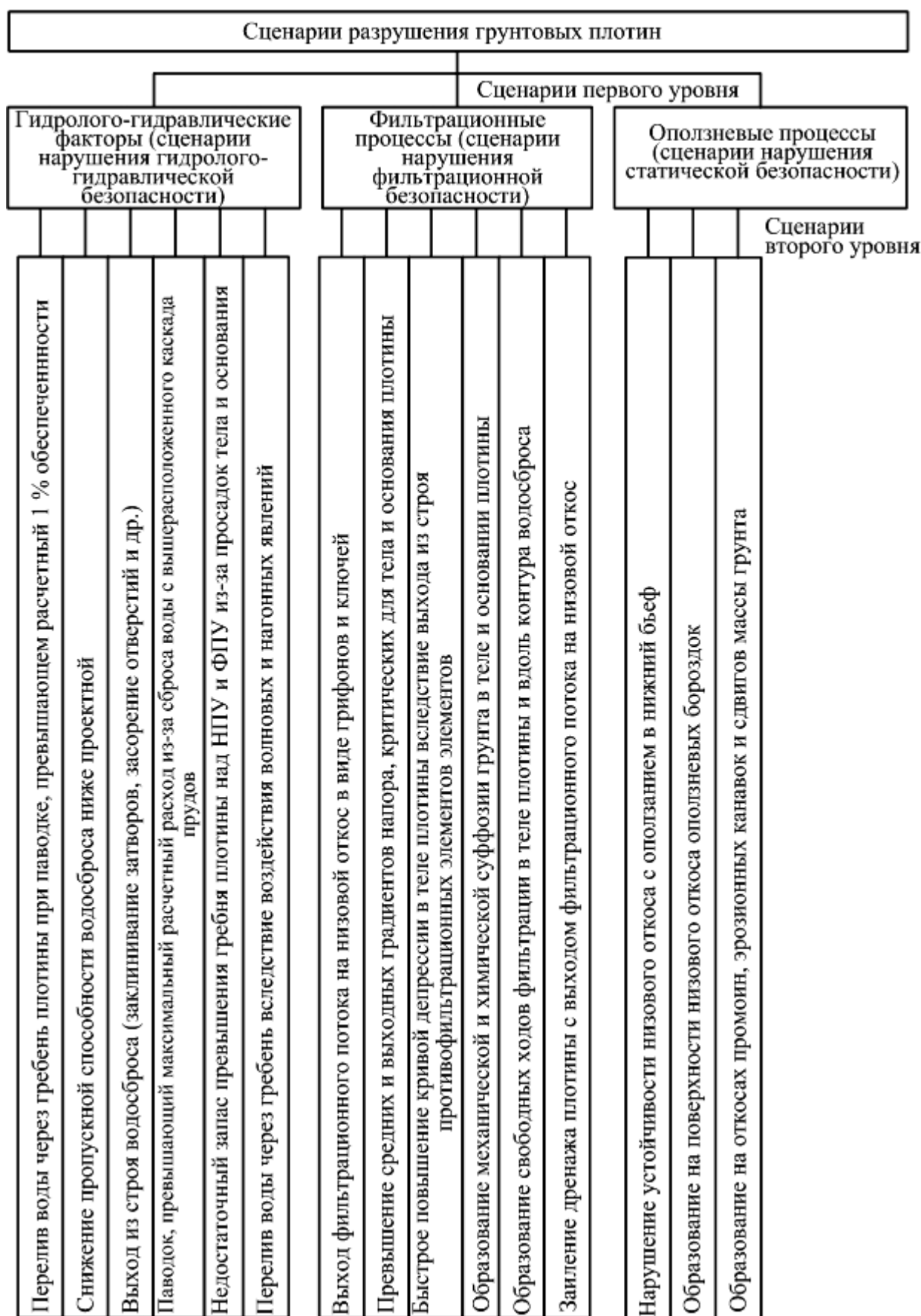


Рисунок 4.3 – Возможные сценарии аварий грунтовых плотин прудов и малых водохранилищ

Анализ аварийных ситуаций на грунтовых плотинах прудов и малых водохранилищ позволяет принять следующие наиболее характерные сценарии:

- перелив воды через гребень грунтовой плотины;
- сосредоточенная фильтрация через тело и основание грунтовой плотины вследствие фильтрационных деформаций (суффозии);
- недостаточная пропускная способность водосбросных сооружений из-за заклинивания затворов;
- контурная фильтрация вдоль трубы водосбросного сооружения.

Выделим в качестве основных возможных сценариев для низконапорных ГТС IV класса три:

- сценарий А1 – перелив воды через гребень грунтовой плотины при паводке, превышающем расчетный 1 % обеспеченности;
- сценарий А2 – сосредоточенная фильтрация через тело и основание плотины из-за фильтрационных деформаций грунта (суффозии);
- сценарий А3 – локальное разрушение участка грунтовой плотины при потере статической устойчивости откосов.

Описание данных сценариев аварий и повреждений ГТС представлено в таблице 4.4.

В таблице 4.5 приведены также сценарии аварий низконапорных бетонных ГТС.

Таблица 4.4 – Сценарии возможных аварий низконапорных грунтовых ГТС

Сценарий аварии	Причина возникновения	Возможные последствия
Сценарий А1	Перелив воды через гребень грунтовой плотины при паводке редкой повторяемости для особого сочетания нагрузок (1 % обеспеченности)	При переливе воды через гребень плотины произойдет образование прорана и, как следствие, в нижнем бьефе – волна прорыва, которая вызовет значительное затопление территорий, населенных пунктов и хозяйственных объектов
Сценарий А2	Сосредоточенная фильтрация через тело и основание плотины вследствие фильтрационных деформаций грунта (суффозии)	В результате образования механической суффозии произойдет вынос грунта и, как следствие, образование просадочных воронок и пустот, перелив воды через просадочные понижения гребня с образованием локальных участков разрушения плотины в зонах суффозии
Сценарий А3	Локальное разрушение участков грунтовой плотины при потере статической устойчивости откосов	В случаях, когда заложение откосов более крутое, чем расчетное по проекту или по нормативным документам, возможно их обрушение (оползание) по круглоцилиндрическим или плоским поверхностям сдвига с локальным разрушением участков плотины и возможностью перелива воды в этих местах

Таблица 4.5 – Сценарии возможных аварий бетонных гидротехнических сооружений

Сценарий аварии	Причина возникновения	Возможные последствия
Сценарий А1	Перелив воды через гребень бетонных плотин при заклинивании затворов на водосливной части	При переливе через гребень произойдет частичное разрушение плотины и повреждение бетона в пределах водосливной части плотины с разрушением крепления и гасителя энергии в нижнем бьефе
Сценарий А2	Разрушение водосбросного тракта при пропуске больших расходов	При пропуске больших расходов через водосливную часть может происходить разрушение бетона водосливной поверхности и бетонных бычков и отслаивание замороженного бетона
Сценарий А3	Локальное разрушение участков грунтового основания и боковых примыканий вследствие фильтрационных деформаций грунта (суффозии, контактного размыва на подошве и в обход плотины)	При подъеме уровня воды в верхнем бьефе до отметки ФПУ могут интенсифицироваться процессы фильтрационных деформаций грунта основания и боковых примыканий с локальным разрушением участков плотины

Рассмотрим далее расчеты рисков разрушения грунтовых плотин IV класса ответственности на прудах и малых водохранилищах от гидролого-гидравлических факторов и фильтрационных процессов, которые можно считать наиболее характерными для плотин высотой до 10–15 м. Оползневые процессы могут оказывать влияние на разрушение более высоких грунтовых плотин III класса и выше.

В качестве сценариев разрушения учитываются: перелив воды через гребень вследствие воздействия волновых и нагонных явлений при недостаточном запасе превышения гребня плотины над расчетным уровнем воды; перелив воды через гребень при паводке, превышающем расчетный 1 % обеспеченности, а также сценарии разрушения плотины вследствие фильтрационных процессов (превышение градиентов напора критических значений).

4.3.2 Расчет риска перелива воды через гребень плотины от волновых и нагонных явлений и при недостаточном запасе гребня над НПУ или ФПУ

Перелив воды через гребень является одной из основных причин аварийных ситуаций, которые могут возникнуть на грунтовых плотинах. По данным Международной комиссии по большим плотинам (International Commission on Large Dams – ICB) для грунтовых плотин до 30 % таких случаев является первоначальной причиной аварий. Поэтому оценка риска перелива воды через гребень плотины является важным этапом расчетов.

Возможные причины перелива воды через гребень плотины (см. рисунок 4.3):
- образование суффозии, выход фильтрационного потока на низовой откос в виде грифонов и ключей;

- пропуск паводка с максимальным расходом воды, превышающим расчетный;
- воздействие ветровых волн и ветрового нагона воды при скорости ветра, превышающих расчетную;
- недостаточный запас превышения гребня плотины над расчетным уровнем воды из-за просадок тела и основания;
- выход из строя водосброса из-за заклинивания затворов, засорения и забивки водосливных отверстий.

Рассмотрим расчет риска перелива воды через гребень плотины одновременно от второй и третьей причины. Для расчета использован метод статистических испытаний (Монте-Карло), изложенный в работе А. Н. Вайнберга [72].

Расчет риска перелива воды через гребень плотины заключается в определении вероятности события, состоящего в том, что отметка уровня воды перед плотиной достигнет отметки гребня плотины и начнется перелив воды. При этом некоторая случайная величина уровня воды перед плотиной представляет собой сумму статического уровня перед плотиной – НПУ или ФПУ, высоты наката волны на откос и высоты ветрового нагона воды. Распределение случайной величины уровня воды перед плотиной при НПУ или ФПУ определяется с учетом трансформации паводка в водохранилище, а вероятность перелива воды также зависит от минимального запаса превышения гребня плотины над НПУ или ФПУ. Высота наката волны на откос и ветрового нагона является функциями двух случайных величин: скорости ветра и статического уровня воды перед плотиной. Для определения высоты наката и высоты ветрового нагона могут быть использованы нормативные зависимости, которые рассчитываются в зависимости от скорости ветра, длины разгона волны, глубины водохранилища, заложения верхового откоса плотины и типа его защитного покрытия.

Для оценки вероятности перелива воды через гребень плотины используется метод статистических испытаний, заключающийся в выполнении большого количества испытаний (до 10^6).

При расчете для каждого испытания принимается следующая последовательность:

- задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью отметки уровня воды перед плотиной P_q обусловленной максимальным паводковым расходом;
- по значению P_q определяется квантиль – отметка статического уровня воды перед плотиной Z_q , обусловленная максимальным паводковым расходом;
- по известной отметке Z_q находятся значения длины разгона волны L и средней глубины воды в водохранилище H_{cp} ;
- по климатическим данным задаются скоростью ветра V_{max} ;
- по известным (или заданным) значениям длины разгона волны L , средней глубины воды в водохранилище H_{cp} и скорости ветра V_{max} находится значение высоты наката волны на откос h_{tun} и высоты ветрового нагона воды Δh_{set} ;
- определяется отметка уровня воды перед плотиной Z :

$$Z = Z_q + h_{run1\%} + \Delta h_{set}; \quad (4.10)$$

- проверяется выполнение условия, когда наблюдается перелив воды через гребень плотины:

$$Z \geq Z_{гп}, \quad (4.11)$$

где $Z_{гп}$ – отметка гребня плотины, м.

После выполнения всех испытаний вычисляется вероятность перелива воды через гребень плотины P_{ovt} или риск перелива воды (разрушения плотины) λ_1 как отно-

шение числа испытаний n_1 , при которых $Z_{ybb} \geq Z_{гп}$, к числу всех испытаний n : $\lambda_1 = P_{ovt} = n_1 / n$.

Ввиду невысоких значений $\lambda_1 = P_{ovt}$ число статистических испытаний должно быть сравнительно большим, чтобы обеспечить достаточную достоверность получаемых значений. Число статистических испытаний в зависимости от необходимой точности расчетов рекомендуется назначать порядка 10^3 – 10^6 .

При расчете риска перелива воды через гребень плотины от волновых и нагонных явлений рассматриваются два статистических уровня воды в водохранилище: нормальный подпорный уровень – НПУ, при котором осуществляется пропуск максимального расхода воды для основного расчетного случая, и форсированный подпорный уровень – ФПУ, при котором осуществляется пропуск максимального расхода воды для поверочного расчетного случая.

При оценке вероятности перелива воды через гребень плотины наиболее опасным случаем является случай при ФПУ, что и будет рассматриваться для расчета в дальнейшем.

В качестве исходных данных к расчету учитываются следующие характеристики: максимальная глубина воды перед плотиной при ФПУ – H_1 ; средняя глубина воды в водохранилище – H_{cp} ; отметка гребня плотины – $Z_{гп}$; расчетная максимальная скорость ветра – V_{max} ; длина разгона волны – L ; обеспеченность высоты волны – P_w ; коэффициент шероховатости откоса – K_p ; коэффициент проницаемости откоса – K_p ; коэффициент K_{sp} , принимаемый в зависимости от скорости ветра и заложения откоса; коэффициент заложения верхового откоса – m_1 ; угол заложения верхового откоса – φ ; угол между лучом волны и нормалью к урезу воды – α .

Расчет риска перелива воды через гребень плотины от волновых и нагонных явлений производится по следующей методике:

1 Путем моделирования устанавливаются случайным образом вероятности статистического уровня воды перед плотиной P_z уровня воды, обусловленного максимальным паводковым расходом P_q , и скорости ветра P_v .

При этом функция, аппроксимирующая кривую изменения уровней перед плотиной, может выражаться уравнением вида:

$$f_z(P_1, P_2) = H_1 + \log \left(\frac{1 - P_2}{1 - P_1} \right), \quad (4.12)$$

где P_1, P_2 – граничные вероятности кривой распределения уровней воды перед плотиной.

2 Рассчитывается средняя высота волны h_{cp} по эмпирической формуле:

$$h_{cp}(i, j, n) = 0,16 \frac{(V_n)^2}{g} \cdot \text{коэф1}(j; n) \cdot \text{th} \left[\frac{0,625 \left[\frac{g H_{cpi}}{(V_n)^2} \right]}{\text{коэф1}(j; n)} \right], \quad (4.13)$$

где $\text{коэф1}(j; n) = 1 - \left[1 + 0,006 \sqrt{\frac{g \times L_j}{(V_n)^2}} \right]^{-2}$.

3 Определяется средний период волн T_{cp} по эмпирической формуле:

$$T_{cp}(i, j, n) = 3,1 \cdot 2\pi \frac{V_n}{g} \left[\frac{gh_{cp}(i, j, n)}{V_n} \right]^{-0,025}. \quad (4.14)$$

4 Вычисляется средняя длина волн λ_{cp} по формуле:

$$\lambda_{cp}(i, j, n) = \frac{g(T_{cp}(i, j, n))^2}{2\pi}. \quad (4.15)$$

5 Находится высота волны обеспеченностью 1 % $h_{1\%}$ (принимается распределение Вейбулла) по эмпирической формуле:

$$h_{1\%}(i, j, n) = h_{cp}(i, j, n) \frac{(-\ln(P_w))^{\text{коэф}2(i, n)}}{\Gamma(\text{коэф}2(i, n) + 1)}, \quad (4.16)$$

где $P_w = 0,001$ – обеспеченность высоты волны;

$$\text{коэф}2(j; n) = 0,001 \left[390 + \sqrt{\frac{gL_i}{(V_n)^2}} \right];$$

Γ – обозначение гамма-функции.

6 Определяется высота наката волны на откос h_{run} , м, по формуле:

$$h_{run}(i, j, n) = K_r \cdot K_p \cdot K_{sp} \cdot K_{run}(i, j, n), \quad (4.17)$$

где $K_{run}(i, j, n)$ – коэффициент, принимаемый по формуле:

$$K_{run}(i, j, n) = 1,2 \cos(\alpha) \sqrt{\frac{\lambda_{cp}(i, j, n)}{h_{1\%}(i, j, n)(1 + \text{ctg } \varphi)}}. \quad (4.18)$$

7 Вычисляется высота ветрового нагона воды Δh_{set} по формуле:

$$\Delta h_{set}(i, j, n) = K_w \frac{(V_n)^2 L_i}{gH_j} \cos \alpha, \quad (4.19)$$

где K_w – коэффициент, принимаемый в зависимости от расчетной скорости ветра.

8 Определяется отметка уровня воды перед плотиной:

$$Z(i, j, n) = Zg_n + h_{run}(i, j, n) + \Delta h_{set}(i, j, n). \quad (4.20)$$

9 Рассчитывается риск перелива воды через гребень (разрушение плотины) или вероятность перелива воды по формуле:

$$\lambda_1(i, j, n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_{ovt}(i, j, k, n), \quad (4.21)$$

где $U_{ovt}(i, j, k, n) = \text{if}(Z(i, j, n) \geq Z_{гпк})$.

Для расчетов по вышеприведенной методике разработана соответствующая программа в среде программирования Borland Delphi.

4.3.3 Расчет риска перелива воды через гребень плотины при пропуске максимального расхода паводка, превышающего расчетный

В соответствии со сценариями разрушения грунтовых плотин (см. рисунок 4.3) одним из наиболее опасных случаев является перелив воды через гребень при пропуске максимального расхода паводка или половодья, превышающего расчетный, который для сооружений IV класса ответственности для поверочного случая составляет 1 % обеспеченность при максимальном уровне воды в водохранилище, соответствующем ФПУ.

Случаи перелива воды через гребень плотины при пропуске максимальный рас-

хода паводка (половодья) имеют особое значение при расположении прудов и малых водохранилищ на малых реках.

Расчет риска перелива воды через гребень при пропуске максимального расхода паводка можно выполнить по методике, изложенной в работе В. Г. Зотеева и др. [73].

При недостаточности данных наблюдений величина максимального расхода воды расчетной обеспеченности $Q_{\max P\%}$ оценивается на основе приведения к пункту-аналогу по формуле:

$$Q_{\max P\%} = Q'_{\max P\%} + \frac{\sigma t_{\alpha}}{\tau - \sigma t_{\alpha}}, \quad (4.22)$$

где $Q'_{\max P\%}$ – максимальный расход паводка (половодья) в растительном створе обеспеченностью P_{p1} вычисляемый по формуле:

$$Q'_{\max P\%} = K_{P\%} \cdot Q_{\max .cp}, \quad (4.23)$$

где $K_{P\%}$ – модуль расхода, соответствующий обеспеченности (для сооружений IV класса – 1 % обеспеченности), принимаемый 1,82–2,34 при коэффициенте вариации $C_v = 0,3–0,45$ и коэффициенте асимметрии $C_s = 2C_v$;

$Q_{\max .cp}$ – среднегогодежный максимальный расход по данным продленного ряда аналога, м³/с;

σ – среднеквадратическое отклонение максимального расхода;

t_{α} – коэффициент Стьюдента;

τ , σ_{τ} – соответственно коэффициент корреляции и его погрешность, оцененные по расходам воды расчетного створа и реки-аналога за период совместных наблюдений.

Коэффициент надежности плотины с точки зрения перелива через гребень можно найти из соотношения:

$$K_H = \frac{Q_{сбр}}{Q_{\max P\%}}, \quad (4.24)$$

где $Q_{сбр}$ – сбросной расход, пропускаемый водосбросными сооружениями при пропуске паводка (половодья), м³/с.

Сбросной расход через водосбросное сооружения рассчитывается по формуле Д. И. Кочерина:

$$Q_{сбр} = Q_{\max P\%} \left(1 - \frac{V_{\phi o}}{W_{\Pi}}\right), \quad (4.25)$$

где $V_{\phi o}$ – объем форсировки, задерживаемый водохранилищем, км³;

W_{Π} – объем паводка (половодья), км³.

Фактическое значение риска перелива воды через гребень при пропуске максимального расхода паводка (половодья) λ_2 вычисляется по формуле:

$$\lambda_2 = \frac{P}{100K_H}, \quad (4.26)$$

где P – вероятность паводка, %;

K_H – коэффициент надежности.

Для расчета риска разработана программа в среде программирования Borland Delphi.

4.3.4 Расчет риска разрушения плотины вследствие фильтрационных процессов

Риск разрушения грунтовой плотины вследствие фильтрационных процессов может наблюдаться при появлении суффозии (механической и химической) грунта тела и основания, когда градиенты напора средние и местные превышают допустимые (критические), при превышении фильтрационных расходов в теле и основании расчетных значений, повышении кривой депрессии в теле плотины выше расчетной.

В связи с этим вероятность риска разрушения плотины возникает при следующих условиях, нарушающих фильтрационную прочность грунта плотины:

$$J_{cp} > J_{kp} / \gamma_n, \quad (4.27)$$

$$J_{вых} > J_{вых.kp} / \gamma_n, \quad (4.28)$$

$$q > q_p, \quad (4.29)$$

$$h_{xi} > h_{xpi}. \quad (4.30)$$

где $J_{cp} = J_{est,m}$ – действующий средний градиент напора тела плотины;

$J_{kp} = J_{cr,m}$ – критический средний градиент напора, принимаемый по СП 39.13330.2012 равным: для глин – 2–8, суглинков – 1,5–4, для супеси – 1–2; для песков – 0,75–1;

γ_n – коэффициент надежности, принимаемый для плотин IV класса по СП 39.13330.2012 равным 1,10;

$J_{вых}$ – местный выходной градиент напора фильтрационного потока при выходе на низовой откос;

$J_{вых.kp} = J_{cr}$ – местный критический градиент напора. Значения местного критического градиента напора принимаются следующими: при выходе на откос – для песчаных несущих грунтов – 0,30, для глинистых – 1,0; при выходе в наклонный дренаж: для песчаных фунтов – 1,0, для глинистых – 1,5;

q – общий удельный фильтрационный расход через тело и основание грунтовой плотины (по данным наблюдений), м³/с;

q_p – общий, расчетный удельный фильтрационный расход тела и основания сооружения, м³/с;

h_{xi} – ординаты кривой депрессии в теле плотины (по данным наблюдений за пьезометрами);

h_{xpi} – расчетные ординаты кривой депрессии.

Действующий средний градиент напора тела однородной плотины без дренажа или с наклонным дренажом (рисунок 4.4) рассчитывается по формуле Р. Р. Чугаева [74]:

$$J_{cp} = \frac{H}{L_{yp} + 0,4H_1 + 0,4H_2}, \quad (4.31)$$

где H – напор (основные параметры плотины), м:

$$H = H_1 - H_2, \quad (4.32)$$

где H_1 , H_2 – глубина воды в верхнем и нижнем бьефах, м;

L_{yp} – длина уреза воды, м:

$$L_{yp} = m_1 d + b_{гр} + (H_1 + d)m_1 - H_2 m_2, \quad (4.33)$$

где m_1 , m_2 – коэффициент заложения верхового и низового откосов;

d – превышение гребня плотины над уровнем воды в верхнем бьефе, м;

$b_{гр}$ – ширина плотины по гребню, м.

Действующий средний градиент напора в основании J_{cp} определяется по формуле [69]:

$$J_{cp0} = \frac{H}{0,88T + L_0}, \quad (4.34)$$

где T – мощность водопроницаемого основания, м;

L_0 – расстояние по подошве плотины от уреза воды верхнего бьефа до точки пересечения откоса плотины с основанием в нижнем бьефе, м:

$$L_0 = b_{гр} + (H_1 + d)(m_1 + m_2). \quad (4.35)$$

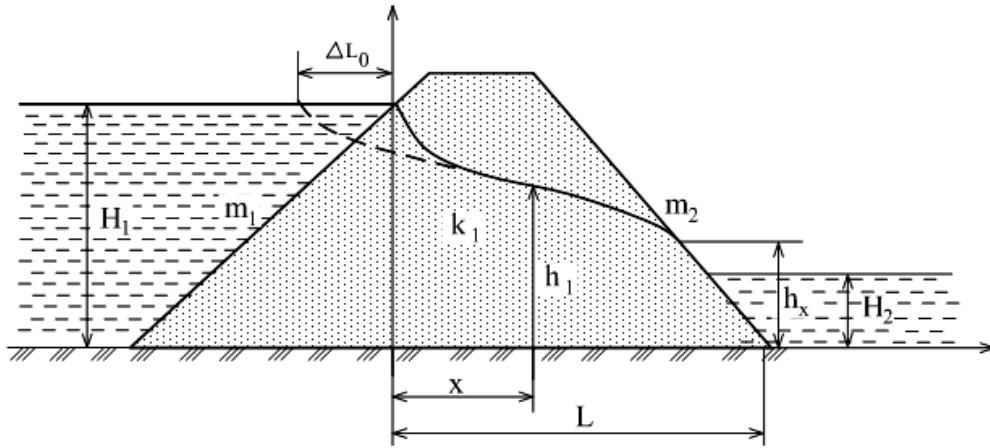


Рисунок 4.4 – Расчетная схема земляной однородной плотины без дренажа (или с наклонным дренажом)

Значения критического среднего градиента основания принимаются по СП 23.13330.2011: для песка – 0,32–0,48; для супеси – 0,6, для суглинка – 0,8, для глины – 1,35.

Максимальный местный градиент напора при выходе потока в нижний бьеф $J_{вых}$ рассчитывается приближенно, как для плоского флюتبета, по формуле [75]:

$$J_{вых} = \frac{H}{\pi \sqrt{x_1^2 - l^2}} = \frac{H}{0,05\pi L_0}, \quad (4.36)$$

где H – напор на плотине, м;

x_1 – координата точки кривой депрессии;

L_0 – длина кривой депрессии, м.

Риск разрушения грунтовой плотины вследствие фильтрационных процессов можно установить через гарантированный коэффициент надежности, величина которого определяется по формуле:

$$K_{H_{J_{cp}}}^{гар} = \frac{J_{кр} - m_{J_{кр}}}{J_{cp} + m_{J_{cp}}}, \quad (4.37)$$

где $J_{кр}$ – критический градиент;

J_{cp} – средний градиент;

$m_{J_{кр}}$, $m_{J_{cp}}$ – математические ожидания градиента критической и средней величин, определяемые по зависимостям:

$$m_{J_{кр}} = \sigma_{J_{кр}} \cdot t_\alpha, \quad m_{J_{cp}} = \sigma_{J_{cp}} \cdot t_\alpha, \quad (4.38)$$

где $\sigma_{J_{кр}}$, $\sigma_{J_{cp}}$ – среднее квадратическое отклонение соответственно критического и среднего градиентов;

t_α – коэффициент Стьюдента.

Значение риска разрушения плотины и ее основания вследствие фильтрацион-

ных процессов λ_3 определяется по формуле [73]:

$$\lambda_3 = \frac{\gamma_n}{K_{H_{\text{Jcp}}}^{\text{гар}}} \lambda_n, \quad (4.39)$$

где $\gamma_n = 1,10$ – коэффициент надежности для IV класса капитальности;

λ_n – нормативный риск, определяется в зависимости от класса сооружения для основного вида нагрузок (для ГТС IV класса $\lambda_n = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/год).

Расчетный удельный расход фильтрационного потока в плотине q_p , м³/с, равен сумме расходов через тело q_T , м³/с, и основание q_0 , м³/с:

$$q_p = q_T + q_0. \quad (4.40)$$

Удельный расход фильтрационного потока через тело однородной плотины без дренажа q_p , м³/с, определяется по формуле:

$$q_T = k_T \frac{H_1^2 - h_1^2}{2(L_p - m_2 h_1)}, \quad (4.41)$$

где k_T – коэффициент фильтрации тела плотины, м/сут;

h_1 – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос, м;

L_p – ширина эквивалентного профиля плотины по основанию, м, определяемая по зависимости:

$$L_p = \Delta L + L, \quad (4.42)$$

$$L = m_1 d + b_{rp} + m_2 (H_1 + d); \Delta L = \beta H_1, \beta = \frac{m_1}{2m_1 + 1}, \quad (4.43)$$

где m_1, m_2 – коэффициенты заложения верхового и низового откосов;

d – превышение гребня плотины над уровнем воды, м;

ΔL – отрезок от точки пересечения откоса с урезом плотины до точки начала кривой депрессии;

β – коэффициент приведения.

Удельный фильтрационный расход в основании плотины q_0 , м³/с, находится по формуле:

$$q_0 = k_0 T \frac{H}{0,88T + L_0}. \quad (4.44)$$

где k_0 – коэффициент фильтрации грунта основания, м/сут;

$H = H_1 - H_2$ – напор на плотине, м.

Риск разрушения грунтовой плотины также может быть определен в зависимости от расхода фильтрационного потока по формуле:

$$\lambda_3 = \frac{\gamma_n}{K_{n_q}^{\text{гар}}} \lambda_n, \quad (4.45)$$

где $K_{n_q}^{\text{гар}}$ – гарантированный коэффициент надежности.

Расчетные ординаты кривой депрессии h_{xp_i} вычисляются по уравнению:

$$h_{xp_i} = \sqrt{H_1^2 + \frac{2q_T}{k_T} X_i}, \quad (4.46)$$

где X_i – координаты точек кривой депрессии:

$$X_i = \Delta L + i\Delta x (i = 0 \div 10); \Delta x = \frac{x_n - \Delta L}{10}; x_n = L_p - m_2 h_1, \quad (4.47)$$

где q_T – удельный расход фильтрационного потока через тело, м³/с;

ΔL – отрезок от точки пересечения откоса с урезом плотины до точки начала кривой депрессии, м;

Δx – элементарная длина участка кривой депрессии, м;

x_n – координаты точек кривой депрессии;

m_2 – заложение низового откоса.

На основании данной методики, риск разрушения грунтовой плотины вследствие фильтрационных процессов оценивается как непосредственно по величине рассчитанного риска λ_3 в зависимости от действующего среднего градиента напора, так и по другим сценариям нарушения фильтрационной безопасности в зависимости от местного выходного градиента напора на низовом откосе и по дну нижнего бьефа, удельного расчетного расхода фильтрационного потока через тело и основание плотины, а также расчетных ординат кривой депрессии.

5 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БАЙЕСА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

5.1 Теорема полной вероятности случайного события, формула Байеса

Метод Байеса основан на формуле полной вероятности, которая формулируется по следующей теореме.

Теорема: Пусть событие A может наступить при условии одного из несовместимых событий $B_1, B_2, \dots, B_n$, образующих полную группу. Тогда вероятность появления события A определяется по формуле полной вероятности, согласно которой она равна сумме произведений вероятностей каждого из этих событий на соответствующую условную вероятность события A [76, 77]:

$$P(A) = P(B_1)P_{B_1}(A) + P(B_2)P_{B_2}(A) + \dots + P(B_n)P_{B_n}(A). \quad (5.1)$$

Для вычисления вероятности события A воспользуемся теоремой сложения:

$$P(A) = P(B_1 A) + P(B_2 A) + \dots + P(B_n A). \quad (5.2)$$

Так как по теореме умножения вероятностей зависимых событий имеем:

$$P(B_1 A) = P(B_1)P_{B_1}(A); \quad P(B_2 A) = P(B_2)P_{B_2}(A); \quad \dots; \quad P(B_n A) = P(B_n)P_{B_n}(A), \quad (5.3)$$

то подставив последние соотношения (5.3) в (5.2) получим формулу полной вероятности (5.1).

Найдем сначала условную вероятность $P_A(B_1)$. По теореме умножения имеем:

$$P(AB_1) = P(A)P_{B_1}(A) = P(B_1)P_{B_1}(A). \quad (5.4)$$

Отсюда

$$P_A(B_1) = \frac{P(B_1)P_{B_1}(A)}{P(A)}. \quad (5.5)$$

Заменив здесь $P(A)$ по формуле (5.1), получим:

$$P_A(B_1) = \frac{P(B_1)P_{B_1}(A)}{P(B_1)P_{B_1}(A) + P(B_2)P_{B_2}(A) + \dots + P(B_n)P_{B_n}(A)}. \quad (5.6)$$

Аналогично выводятся формулы для других гипотез $P_A(i = 1, 2, \dots, n)$.

Полученная формула (5.6) называется формулой Байеса.

5.2 Оценка надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища

Обеспечение длительной безаварийной работы ГТС является одной из основных задач проектирования, строительства и эксплуатации ГТС.

Оценка уровня безопасности на стадии эксплуатации осуществляется инструментальными и визуальными методами с использованием технических и программных средств мониторинга.

Изучение повреждений сооружений необходимо для повышения надежности эксплуатации и качества проектирования и строительства подобных сооружений.

Рассмотрим расчет оценки надежности грунтовой плотины по диагностическим признакам с использованием метода Байеса [68].

Метод Байеса в настоящее время нашел применение для количественной оценки надежности ГТС благодаря своей простоте и эффективности [47, 78, 79]:

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (5.7)$$

где $P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза D_i ;

$P(k_j / D_i)$ – условная вероятность появления признака k_j у объектов с состоянием D_i ;

$P(k_j)$ – вероятность появления признака k_j во всех сооружениях независимо от состояния.

При оценке надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища рассмотрим в качестве возможных четыре основных состояния (диагноза): D_1 – отказ грунтовой плотины при переливе воды через гребень вследствие недопустимого запаса гребня над НПУ (менее 0,5 м) из-за просадок тела и основания плотины; D_2 – отказ водосбросного сооружения по причине его неудовлетворительного состояния и недостаточной пропускной способности и заклинивания затворов; D_3 – отказ плотины вследствие усиленной фильтрации и недопустимых фильтрационных деформаций грунта тела и основания, а также контактной фильтрации вдоль стенок трубчатого водосброса; D_4 – нормальное (безотказное) состояние.

Интенсивность отказов грунтовых плотин малых водохранилищ объемом от 1 до 10 млн м³ по данным статистической обработки имеющихся данных [50] нами получена равной $7,75 \cdot 10^{-3}$ 1/год или 0,00775.

На основании обобщения данных об отказах (разрушениях) грунтовых плотин малых водохранилищ приведем значения риска аварий в зависимости от причин, объединенных в группы отказов (таблица 5.1)

Таблица 5.1 – Отказы (разрушения) грунтовых плотин для малых водохранилищ от 1 до 10 млн м³

Группа отказа	Вид отказа	Процент отказа	Риск аварии
1	Отказ грунтовой плотины из-за малого запаса гребня (< 0,5 м)	45	$3,5 \cdot 10^{-3}$
	Отказ из-за неравномерной просадки гребня		
2	Отказ водосбросного сооружения	30	$2,3 \cdot 10^{-3}$
3	Отказ при фильтрации через тело и основание плотины	25	$1,87 \cdot 10^{-3}$
	Отказ при контактной фильтрации вдоль стенок трубчатого водосброса		

Учитывая данные по отказам, вероятности их появления составят:

$$P(D_1) = 0,0035; P(D_2) = 0,0023; P(D_3) = 0,0019; P(D_4) = 0,9923.$$

В процессе наблюдений за грунтовой плотинной проверяются признаки k_1 (пропускная способность водосброса недостаточна для пропуска паводка расчетной обеспеченности для сооружений IV класса с обеспеченностью 1–5 %) и признак k_2 (снижение запаса гребня плотины над НПУ ниже предельного значения, который примем равным 0,5 м).

Таким образом, в качестве признаков опасного состояния грунтовой плотины запишем следующие условия:

$$k_1 < Q_{P=1-5\%}; k_2 < d = 0,5 \text{ м.}$$

Исходя из формулы Байеса (5.7), общий вид зависимости для определения вероятностей диагнозов (состояний) грунтовой плотины при проверке двух диагностических признаков k_1 и k_2 имеет следующий вид:

$$P(D_i / k_1 k_2) = P(D_i)P(k_1 / D_i)P(k_2 / D_i) / P(D_1)P(k_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(k_2 / D_4), \quad (5.8)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число состояний (диагнозов) плотины.

Используя формулу (5.8), определим вероятность нахождения плотины малого водохранилища в одном из состояний D_1 – D_4 при различном значении диагностических параметров.

Примем априорно, что при состоянии D_1 признак k_1 для грунтовых плотин IV класса малых водохранилищ встречается в 30 % случаев ($P(k_1 / D_1) = 0,30$), а признак k_2 – в 60 % случаев ($P(k_2 / D_1) = 0,60$). При состоянии D_2 признак k_1 встречается в 70 % случаев ($P(k_1 / D_2) = 0,70$), а признак k_2 – в 20 % случаев ($P(k_2 / D_2) = 0,20$). При состоянии D_3 – $P(k_1 / D_3) = 0,10$; $P(k_2 / D_3) = 0,05$; при состоянии D_4 – $P(k_1 / D_4) = 0,05$, $P(k_2 / D_4) = 0,03$.

Определим вероятность состояний грунтовой плотины, если обследование показало, что признак k_1 (пропускная способность водосброса недостаточна) отсутствует, но имеется признак k_2 (малый запас гребня над уровнем воды). Отсутствие признака k_1 является наличием признака $\bar{k}_1$ (противоположное событие). Соответственно, вероятность появления признака $\bar{k}_1$ определяется как разность полной вероятности, равной единице, и вероятности признака k_1 [79]:

$$P(\bar{k}_1 / D_i) = 1 - P(k_1 / D_i). \quad (5.9)$$

Также определим вероятность состояний грунтовой плотины, если отсутствует признак k_2 , но имеется признак k_1 с наличием противоположного признака $\bar{k}_2$:

$$P(\bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_2 / D_i). \quad (5.10)$$

В том случае, когда оба признака k_1 и k_2 отсутствуют, вероятность появления противоположных признаков вычисляется аналогично по формуле:

$$P(\bar{k}_1 \bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_1 k_2 / D_i). \quad (5.11)$$

Из формулы Байеса (5.7) могут быть получены следующие расчетные формулы вероятностей диагнозов (состояний) грунтовой плотины при проверке диагностических признаков:

- при отсутствии признака k_1 и наличии признака k_2 :

$$P(D_i / \bar{k}_1 k_2) = P(D_i)P(\bar{k}_1 / D_i)P(k_2 / D_i) / P(D_1)P(\bar{k}_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(\bar{k}_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(\bar{k}_1 / D_4)P(k_2 / D_4); \quad (5.12)$$

- при наличии признака k_1 и отсутствии признака k_2 :

$$P(D_i / k_1 \bar{k}_2) = P(D_i)P(k_1 / D_i)P(\bar{k}_2 / D_i) / P(D_1)P(k_1 / D_1)P(\bar{k}_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(\bar{k}_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(\bar{k}_2 / D_4); \quad (5.13)$$

- при отсутствии обоих признаков k_1 и k_2 :

$$P(D_i / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) / P(D_1)P(k_1 / D_1)P(\bar{k}_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(\bar{k}_1 / D_4)P(\bar{k}_2 / D_4), \quad (5.14)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число состояний (диагнозов) плотины.

Результаты расчетов различных состояний грунтовой плотины приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты оценки вероятности состояний грунтовой плотины малого водохранилища с учетом вероятности различных состояний и диагностических признаков

D_i	$P(k_1 / D_i)$	$P(k_2 / D_i)$	$P(D_i)$	$P(D_i / k_1 k_2)$	$P(D_i / \bar{k}_1 \bar{k}_2)$	$P(D_i / k_1 \bar{k}_2)$	$P(D_i / \bar{k}_1 \bar{k}_2)$
D_1	0,30	0,60	0,0035	$2,58 \cdot 10^{-1}$	$0,49 \cdot 10^{-1}$	$0,83 \cdot 10^{-2}$	$0,10 \cdot 10^{-2}$
D_2	0,70	0,20	0,0023	$3,19 \cdot 10^{-1}$	$0,46 \cdot 10^{-2}$	$0,25 \cdot 10^{-1}$	$0,60 \cdot 10^{-3}$
D_3	0,10	0,05	0,0019	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,36 \cdot 10^{-2}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$
D_4	0,05	0,03	0,9923	$6,09 \cdot 10^{-1}$	$9,43 \cdot 10^{-1}$	$9,62 \cdot 10^{-1}$	$9,96 \cdot 10^{-1*}$
* Значения вероятностей состояния отвечают допускаемым показателям.							

При анализе результатов расчета вероятности состояний грунтовой плотины малых водохранилищ будем учитывать допускаемые их значения как в целом для плотины при нормальном (безаварийном) состоянии D_4 , так и для отдельных ее состояний $D_1 - D_3$.

Согласно Д. В. Стефанишина [80], допускаемый обобщенный риск предельных состояний первой группы плотин из грунтовых материалов IV класса составляет для нижней границы – $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год и верхней границы – $6 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Принимая в качестве расчетной допускаемую величину обобщенного риска аварий грунтовых плотин (нижний предел $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год), найдем распределение частных рисков основных причин аварийных ситуаций и допустимые количественные значения вероятностей отдельных состояний грунтовых плотин с учетом двух диагностических признаков k_1 и k_2 – $P(D_i / k_1 k_2)$ (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Допускаемые значения рисков аварийных ситуаций и вероятностей отдельных состояний грунтовых плотин малых водохранилищ

Состояние грунтовой плотины, D_i	Доля состояния (причины), %	Допускаемый риск аварийной ситуации, 1/год	Допускаемая вероятность состояний $P_{\text{доп}}(D_i / k_1 k_2)$
1	2	3	4
Недостаточный запас гребня над уровнем воды D_1	30	$1,50 \cdot 10^{-3}$	0,99850
Недостаточная пропускная способность водосброса D_2	45	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,99775

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4
Опасные фильтрационные деформации в теле и основании D_3	25	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,99875
Нормальное (безаварийное состояние) D_4	100	$5,00 \cdot 10^{-3}$	0,99500

Допускаемая вероятность появления состояния (диагноза) грунтовой плотины рассчитывалась исходя из следующего соотношения:

$$P_{\text{доп}}(D_i / k_1 k_2) = 1 - R_{\text{доп}}, \quad (5.15)$$

где $R_{\text{доп}}$ – допускаемый риск аварийной ситуации.

Сопоставление расчетных данных вероятностей отдельных состояний грунтовой плотины в таблице 5.2 с допускаемыми значениями в таблице 5.3 показывает, что полученные значения значительно ниже их для состояний грунтовой плотины D_1 – D_3 .

Следовательно, можно считать, что опасное состояние грунтовой плотины по этим причинам маловероятно.

Последнее состояние D_4 , которое в целом характеризует нормальное состояние грунтовой плотины, удовлетворяет допускаемым нормам только при условии отсутствия признаков k_1 и k_2 – $P(D_4 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 9,96 \cdot 10^{-1}$. Близкие значения вероятностей состояния к допускаемым характеристикам получены при отсутствии обоих признаков k_1 или k_2 – $P(D_4 / \bar{k}_1 k_2) = 9,43 \cdot 10^{-1}$ и $P(D_3 / k_1 \bar{k}_2) = 9,62 \cdot 10^{-1}$.

При этом следует отметить, что вероятность появления состояний плотины D_1 и D_2 при условии обнаружения обоих диагностических признаков k_1 и k_2 существенно выше, чем при наличии только одного признака k_1 или k_2 и отсутствии другого признака k_2 или k_1 . А в случае отсутствия обоих признаков k_1 и k_2 вероятность этих состояний получается наименьшей.

Так, например, для состояния D_1 при наличии признаков k_1 и k_2 вероятность появления его составляет $P(D_1 / k_1 k_2) = 2,58 \cdot 10^{-1}$, а при отсутствии одного из признаков снижается до значений $P(D_1 / \bar{k}_1 k_2) = 0,49 \cdot 10^{-1}$ и $P(D_1 / k_1 \bar{k}_2) = 0,83 \cdot 10^{-2}$, наименьшее значение получено при отсутствии этих признаков $P(D_1 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 0,1 \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, можно заключить, что с уменьшением числа обследуемых диагностических признаков прогнозируемая вероятность того или иного состояния плотины будет снижаться и составит минимальное значение при отсутствии диагностики любых признаков, характеризующих техническое состояние и работоспособность сооружения. Сказанное свидетельствует о целесообразности предварительного проведения обследований и установлении реальных диагностических параметров с целью уточнения прогнозируемых состояний объекта. На основании анализа результатов расчетов прогнозируемой вероятности состояний грунтовой плотины по формулам Байеса наглядно показано существенное влияние на результаты ряда диагностических признаков, установленных при эксплуатации объекта.

5.3 Оценка надежности резервного водосброса с размываемой вставкой

Водосбросные сооружения (водосбросы) относятся к наиболее ответственным сооружениям водохранилищных гидроузлов, поэтому проблеме оценки и обеспечения их надежности и безопасности всегда уделялось особое внимание. Важнейшей особенностью данных объектов в составе гидроузлов является функция обеспечения надежности и безопасности других гидросооружений и народнохозяйственных объектов в верхнем и нижнем бьефах. При помощи водосбросов осуществляется управление уровнями воды в бьефах, аварийные опорожнения водохранилищ с целью недопущения аварийных ситуаций на сооружениях гидроузла и т. п. [81–83]. В настоящее время в компоновках речных гидроузлов для безопасного пропуска паводковых вод применяют различные водосбросы (береговые, туннельные, шахтные, сифонные, ковшовые и другие).

Исследованиями водосбросов с переливом через гребень грунтовых плотин были впервые начаты в МГСУ П. И. Гордиенко в 50-е годы прошлого столетия и продолжены Ю. П. Правдивцем и другими исследователями [84–87].

Как отмечается в работе Г. К. Дерюгина [88], актуальность безопасности гидроузлов подтверждается тем, что около 44 % грунтовых плотин разрушилось по причине отказа водосбросного сооружения [89–94]. Наиболее распространенными причинами аварий на водосбросных сооружениях являются недостаточная пропускная способность, заклинивание затворов и неисправность подъемных механизмов. Поэтому в ряде случаев применение в составе гидроузлов водосбросов, рассчитанных на паводки расчетной обеспеченности, оказывается недостаточным. В этих условиях на прудах и водохранилищах целесообразно использование кроме основных водосбросов дополнительных или резервных, предусмотренных для пропуска паводков редкой повторяемости [95–97].

Основной водосброс в виде бетонного водослива, входящий в напорный фронт и сопрягающийся с грунтовыми частями плотины, расположен на отметке НПУ, а резервный водосброс устраивается ниже отметки ФПУ на 0,3–0,5 м.

Изучение возможных сценариев аварий грунтовых плотин и их водосбросов представляет собой важную задачу, особенно в период длительной эксплуатации, так как их техническое состояние со временем ухудшается [98].

При этом для повышения эффективности работы резервных водосбросов на грунтовых плотинах применяют размываемую грунтовую вставку.

В ФГБНУ «РосНИИПМ» для низконапорных плотин предложен резервный водосброс с размываемой вставкой [99, 100], описание конструкции которой приведено ниже в п. 6.4, а методика гидравлического расчета и обоснование основных параметров – в п. 6.5.1 [101–103].

С использованием известной формулы для гидравлического расчета водослива с широким порогом [104] была получена расчетная зависимость высоты размываемой вставки $H_{\text{вст.}i}$, м, с учетом N -го количества секций водосброса трапецеидального сечения в следующем виде:

$$H_{\text{вст.}i} = \left(\frac{Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}}}{m_i \cdot (b_i + m_0 \cdot H_{\text{вст.}i}) \cdot N \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (5.16)$$

где $Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}}$ – расчетный расход, пропускаемый через все секции резервного водосброса, м³/с;

m_i – коэффициент расхода для водослива с широким порогом i -ой секции резервного водосброса;

b_i – ширина по дну i секции резервного водосброса, м;

m_0 – коэффициент заложения откосов трапецеидального сечения водопропускной

части;

N – количество секций водосброса, шт.

Расчет высоты вставки по данной зависимости производится методом последовательных приближений, где предварительно задаемся шириной каждой секции b_i и количеством секций N . Общий расчетный расход $Q_{рез.в}^{общ}$, м³/с, пропускаемый через все секции резервного водосброса, определяется как разность максимального паводочного расхода редкой повторяемости $Q_{p<0,5...1,0\%}$, м³/с, и расчетного расхода основного водосброса для низконапорного гидроузла III–IV класса $Q_{осн.в}$ м³/с:

$$Q_{рез.в}^{общ} = Q_{p<0,5...1,0\%} - Q_{осн.в}. \quad (5.17)$$

Ниже рассмотрим оценку надежности резервного водосброса с размываемой вставкой [105].

С целью количественной оценки надежности работы подобной конструкции резервного водосброса используем метод технической диагностики, основанный на формуле Байеса [78, 106]:

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (5.18)$$

где $P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза D_i ;

$P(k_j / D_i)$ – условная вероятность появления признака k_j у водосбросных сооружений с состоянием D_i ;

$P(k_j)$ – вероятность появления признака k_j во всех водосбросных сооружениях независимо от состояния.

Для анализа надежной работы резервного водосброса рассмотрим в качестве возможных четыре основных состояния (диагноза):

D_1 – отказ сработки размываемой вставки (неразрыв грунта тела переливающимся потоком) из-за уплотнения и закрепления корнями растений грунта;

D_2 – отказ защитного покрытия водосливного порога из-за ненадежного крепления на верховом откосе плотины бетонными плитами и бортовых креплений водопроводящего русла резервного водосброса с последующим образованием прорана до подошвы плотины;

D_3 – другие виды отказов;

D_4 – нормальное состояние резервного водосброса, заключающееся в полном освобождении водосливного отверстия резервного водосброса вследствие размыва грунтовой вставки и отсутствии повреждений защитного покрытия из геомембраны в местах крепления.

В процессе наблюдений за резервным водосбросом проверяются признаки:

- k_1 – средняя скорость переливающегося потока через грунтовую вставку превышает размывающую скорость для грунта вставки ($V \geq V_{разм}$), а, следовательно, происходит ее сработка;

- k_2 – прочность материала геомембраны при разрыве превышает напряжение в местах крепления $R \geq \sigma$, а следовательно надежность крепления защитного покрытия из геомембраны обеспечивается.

Противоположные признаки $\bar{k}_1$ и $\bar{k}_2$, соответственно, будут означать, что размыв грунта вставки не наблюдается или происходит медленно и не обеспечивается надежность крепления защитного покрытия водосливного порога в верхней части водо-

сливного русла. Таким образом, в качестве признаков ненадежной работы водосброса с размываемой вставкой будут следующие условия:

- когда не будет происходить размыв грунтовой вставки: $V \leq V_{разм}$;
- когда не будет обеспечена надежность защитного покрытия из полимерной геомембраны в местах крепления: $R \leq \sigma$.

Общий вид формулы Байеса для определения вероятностей состояний диагнозов резервного водосброса при проверке двух диагностических признаков k_1 и k_2 :

$$P(D_i / k_1 k_2) = P(D_i)P(k_1 / D_i)P(k_2 / D_i) / P(D_1)P(k_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(k_2 / D_4) \quad (5.19)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число состояний (диагнозов) водосбросных сооружений.

Используя формулу (5.19), определим вероятность одного из состояний резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой $D_1 - D_4$ при различном значении диагностических параметров. Примем, что при состоянии D_1 признак k_1 встречается в 10 % случаев – $P(k_1 / D_1) = 0,10$, а признак k_2 – в 5 % случаев $P(k_2 / D_1) = 0,05$. При состоянии D_2 признак k_1 встречается в 5 % случаев $P(k_1 / D_2) = 0,05$, а признак k_2 – в 10 % случаев $P(k_2 / D_2) = 0,10$. При состоянии D_3 – $P(k_1 / D_3) = 0,03$, $P(k_2 / D_3) = 0,05$, при состоянии D_4 – $P(k_1 / D_4) = 0,05$, $P(k_2 / D_4) = 0,03$ [88].

Исходные данные представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Исходные данные вероятностей признаков и состояний (диагнозов) для оценки надежности работы резервного водосброса

D_i	$P(k_1 / D_i)$	$P(k_2 / D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,10	0,05	0,00145
D_2	0,05	0,10	0,00025
D_3	0,03	0,05	0,0033
D_4	0,05	0,03	0,995

Ввиду отсутствия данных о работе резервных водосбросов, интенсивность их отказов примем соответствующей отказам грунтовых плотин равной 0,005 [79]. Тогда значения вероятностей отказов резервного водосброса с размываемой вставкой по вышеприведенным состояниям (диагнозам) примем следующими: $P(D_1) = 0,00025$, $P(D_2) = 0,00145$, $P(D_3) = 0,0033$, $P(D_4) = 1 - \sum P(D_{1..3}) = 0,995$.

Определим вероятность состояний размываемой грунтовой вставки резервного водосброса, если обследование показало, что признак k_1 отсутствует (грунтовая вставка не размывается), но имеется признак k_2 (обеспечивается надежное крепление защитного покрытия водосливного порога и бортовых креплений). Отсутствие признака k_1 является наличием признака $\bar{k}_1$ (противоположное событие). Соответственно вероятность появления признака $\bar{k}_1$ определяется как разность полной вероятности, равной единице, и вероятности признака k_1 :

$$P(\bar{k}_1 / D_i) = 1 - P(k_1 / D_i). \quad (5.20)$$

Также определим вероятность состояний грунтовой плотины, если отсутствует признак k_2 , но имеется признак k_1 с наличием противоположного признака $\bar{k}_2$:

$$P(\bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_2 / D_i). \quad (5.21)$$

В том случае, когда оба признака k_1 и k_2 отсутствуют, вероятность появления противоположных признаков вычисляется аналогично по следующей формуле:

$$P(\bar{k}_1\bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_1k_2 / D_i). \quad (5.22)$$

Из формулы Байеса (5.19) могут быть получены следующие расчетные формулы вероятностей состояний диагнозов резервного водосброса при проверке диагностических признаков [47]:

- при отсутствии признака k_1 и наличии признака k_2 :

$$\begin{aligned} P(D_i / \bar{k}_1k_2) = & P(D_i)P(\bar{k}_1 / D_i)P(k_2 / D_i) / P(D_1)P(\bar{k}_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(\bar{k}_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(\bar{k}_1 / D_4)P(k_2 / D_4); \end{aligned} \quad (5.23)$$

- при наличии признака k_1 и отсутствии признака k_2 :

$$\begin{aligned} P(D_i / k_1\bar{k}_2) = & P(D_i)P(k_1 / D_i)P(\bar{k}_2 / D_i) / P(D_1)P(k_1 / D_1)P(\bar{k}_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(\bar{k}_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(\bar{k}_2 / D_4); \end{aligned} \quad (5.24)$$

- при отсутствии обоих признаков k_1 и k_2 :

$$\begin{aligned} P(D_i / \bar{k}_1\bar{k}_2) = & P(D_i)P(\bar{k}_1 / D_i)P(\bar{k}_2 / D_i) / P(D_1)P(\bar{k}_1 / D_1)P(\bar{k}_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(\bar{k}_1 / D_2)P(\bar{k}_2 / D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(\bar{k}_1 / D_4)P(\bar{k}_2 / D_4), \end{aligned} \quad (5.25)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число состояний (диагнозов) плотины.

Результаты расчетов различных состояний размываемой грунтовой вставки резервного водосброса приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты оценки вероятностей состояний резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой

D_i	$P(D_i / k_1k_2)$	$P(D_i / \bar{k}_1k_2)$	$P(D_i / k_1\bar{k}_2)$	$P(D_i / \bar{k}_1\bar{k}_2)$
D_1	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3*}$
D_2	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3*}$	$1,35 \cdot 10^{-3*}$
D_3	$3,29 \cdot 10^{-3*}$	$5,58 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3*}$	$3,30 \cdot 10^{-3*}$
D_4	$9,91 \cdot 10^{-1*}$	$9,89 \cdot 10^{-1*}$	$9,96 \cdot 10^{-1}$	$9,95 \cdot 10^{-1}$
* Значения, не соответствующие требованиям сработки размываемой вставки резервного водосброса.				

При анализе результатов расчета вероятности состояний размываемой грунтовой вставки резервного водосброса будем учитывать допускаемые их значения как для размываемой грунтовой вставки при нормальном состоянии D_4 , так и для отдельных ее состояний $D_1 - D_3$. В качестве допускаемого значения вероятности нормального состояния резервного водосброса будем считать достаточно высокое значение вероятности сработки (размыва) грунтовой вставки, составляющее 0,995.

Согласно СП 58.13330.2012, допускаемое значение риска аварий на напорных ГТС IV класса составляет $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год [2]. Принимая в качестве расчетной допускаемую величину минимума риска сработки резервного водосброса $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год, найдем распределение частных рисков основных причин отказов сработки резервного водосброса и допустимые значения вероятностей отдельных состояний резервного водосброса с учетом двух диагностических признаков k_1 и k_2 – $P(D_i / k_1k_2)$ (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Допускаемые значения рисков отказов резервного водосброса с размываемой вставкой

Состояние резервного водосброса D_i	Доля состояния (причины), %	Допускаемый минимум риска сработки резервного водосброса, 1/год	Допускаемая вероятность появления состояний $P_{дон}(D_i / k_1 k_2)$
Отказ сработки размываемой вставки, D_1	5	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,9985
Отказ защитного покрытия из геомембраны водосливного порога, D_2	29	$1,45 \cdot 10^{-3}$	0,9997
Другие виды отказов, D_3	66	$3,30 \cdot 10^{-3}$	0,9967
Нормальное состояние, D_4	100	$5,00 \cdot 10^{-3}$	0,9950

Допускаемая вероятность появления состояния (диагноза) резервного водосброса рассчитывалась, исходя из следующего соотношения [107]:

$$P_{дон}(D_i / k_1 k_2) = 1 - R_{дон}, \quad (5.26)$$

где $R_{дон}$ – допускаемый минимум риска сработки резервного водосброса.

Сопоставление расчетных данных вероятностей отдельных состояний резервного водосброса в таблице 5.5 с допускаемыми значениями в таблице 5.6 показывает, что при выполнении условий k_1 и k_2 будет происходить сработка (размыв) грунтовой вставки, за исключением состояний D_3 и D_4 . При выполнении условия k_2 и невыполнения условия k_1 сработка (размыв) грунтовой вставки будет происходить при диагнозах $D_1 - D_3$, а при выполнении условия k_1 и невыполнения условия k_2 – D_1 и D_4 . При условии отсутствия признаков k_1 и k_2 удовлетворяет допускаемым нормам только состояние D_4 . Близкие значения вероятностей состояния к допускаемым характеристикам получены при присутствии обоих признаков k_1 и k_2 , и отсутствии обоих признаков для состояния D_3 – $P(D_3 / k_1 k_2) = 3,29 \cdot 10^{-3}$ и $P(D_3 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 3,30 \cdot 10^{-3}$. В случае отсутствия признака k_1 и присутствия признака k_2 вероятность состояний получается наибольшей для состояния D_3 – $P(D_3 / \bar{k}_1 k_2) = 5,58 \cdot 10^{-3}$, а в случае отсутствия обоих признаков k_1 и k_2 наименьшей для состояния D_1 – $P(D_1 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 0,23 \cdot 10^{-3}$.

5.4 Расчетная оценка надежности конструкций противофильтрационных экранов из геокомпозитов

Противофильтрационные устройства ГТС могут выполняться из полимерных геомембран или их сочетания с геотекстилями, последние из которых получили название геокомпозитов.

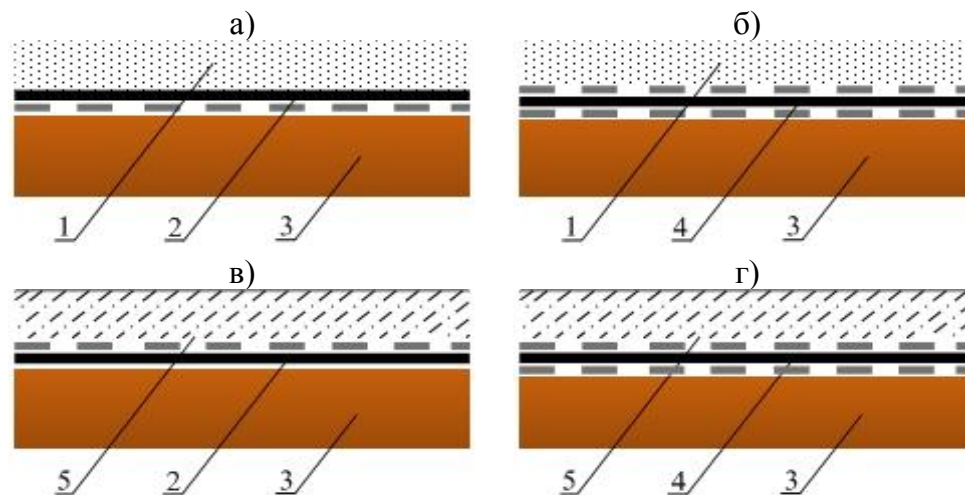
Таким образом, под геокомпозитом (ГК) будем понимать комбинацию двух или трех геосинтетических материалов, которые изготавливаются в заводских условиях в виде единого материала, либо представляют собой комбинированную конструкцию, состоящую из двух или нескольких слоев геосинтетических материалов, не соединенных между собой.

Для противофильтрационных целей наиболее чаще применяют ГК, состоящие из противофильтрационного элемента – геомембраны и защитных прокладок из геотек-

стиля [99, 108–110].

Применение таких ГК повышает эксплуатационную надежность конструкций противофильтрационных экранов и расширяет область их применения.

Рассмотрим наиболее известные конструкции противофильтрационных экранов из ГК, которые включают геомембрану и один-два слоя геотекстиля, а также защитное покрытие из слоя грунта или бетона (рисунок 5.1).



а – с защитным слоем грунта и геокомпозита (геомембрана + один слой геотекстиля);
б – с защитным слоем грунта и геокомпозита (геомембрана + два слоя геотекстиля);
в – с защитным покрытием из бетона и геокомпозита (геомембрана + один слой геотекстиля); г – с защитным покрытием из бетона и геокомпозита (геомембрана + два слоя геотекстиля); 1 – защитный слой грунта; 2 – геокомпозит (геомембрана + геотекстиль); 3 – подстилающий слой грунта; 4 – геокомпозит (геотекстиль + геомембрана + геотекстиль); 5 – защитное покрытие из бетона

Рисунок 5.1 – Конструкции противофильтрационных экранов из геокомпозитов

Данные экраны из ГК могут быть отнесены к высоконадежным конструкциям, поскольку они позволяют снизить повреждаемость противофильтрационного элемента за счет применения защитных прокладок сверху и снизу геомембраны до 4–5 раз при использовании геотекстиля «Дорнит» плотностью 450 г/м² и до 8–10 раз при его плотности 900 г/м² [111]. Кроме того, они обеспечивают высокий противофильтрационный эффект с показателем водонепроницаемости не более 10⁻⁸–10⁻¹⁰ см/с и значительный срок службы от 50 до 100 лет [99].

Конструкции противофильтрационных экранов с защитным слоем грунта не менее 0,50 м из ГК на рисунке 5.1а, б рекомендуются к применению на водоемах и прудах-накопителях сточных вод, а конструкции с защитным покрытием из бетона (монолитного или сборного) на рисунке 5.1в, г – на каналах.

Для уточнения условий их применения приведем существующие рекомендации к грунтовым слоям (подстилающего и защитного) при устройстве полимерных противофильтрационных экранов.

Так, по СН 551-82 [112] для пленочных противофильтрационных устройств толщиной 0,2–0,4 мм, в защитном и подстилающих слоях должны применяться песчаные грунты с частицами максимальной крупности до 5 мм. Согласно исследованиям Ю. М. Косиченко и др. [99, 113], в качестве грунта основания под экран из геомембраны толщиной не менее 1 мм может использоваться подстилающий слой или естественная уплотненная поверхность грунта с частицами максимальной крупности до 10 мм.

В случаях, когда вышеприведенные требования к созданию подстилающего и защитного слоев не удовлетворяются, для защиты полимерного материала от механических повреждений необходимо использовать защитные прокладки из геотекстильных материалов [113, 114].

В соответствии с действующими рекомендациями [114], наибольший допустимый диаметр частиц грунта d_ϕ определяется расчетом по формулам:

- из условий обеспечения сплошности (неповреждаемости) геомембраны:

$$\delta_{\text{ГМ}} = \frac{16qd_\phi K_\phi K_d}{EK_\pi}, \quad (5.27)$$

где $\delta_{\text{ГМ}}$ – толщина геомембраны, мм;

q – нагрузка, принимаемая как большее из двух значений в строительный или эксплуатационный период, МПа;

d_ϕ – минимальный размер максимальной фракции грунта, мм;

K_ϕ – коэффициент формы грунтовых частиц, принимаемый $K_\phi = 1$ при хорошей окатанности и $K_\phi = 2$ при наличии остроугольных зерен;

K_d – динамический коэффициент, принимаемый в зависимости от типа применяемого механизма при отсыпке грунтового защитного слоя (для бульдозера $K_d = 2,0$);

K_π – коэффициент эффективности защитных прокладок (при их отсутствии $K_\pi = 1$);

E – модуль упругости полимерного материала, МПа;

- из условий допускаемого растягивающего напряжения в геомембране:

$$\delta_{\text{ГМ}} = 0,135\alpha_3 d_\phi q_\Gamma \sqrt{\frac{E}{\sigma_p^3}}, \quad (5.28)$$

где α_3 – коэффициент эффективности, зависящий от размера максимальной фракции и толщины полотна ($\alpha_3 = 1 - 0,30$);

q_Γ – величина гидростатического давления, МПа;

σ_p – допускаемое напряжение при растяжении полимерного материала, МПа.

Для определения коэффициента эффективности защитных прокладок из геотекстиля учтем исследования по повреждаемости геомембран с защитным и подстилающим слоями из щебня [111], в результате которых установлены предельные нагрузки, приводящие к проколам. В опытах с щебнем фракции 5–20 мм для геомембраны без защитных прокладок предельные нагрузки составили: при толщине геомембраны 1,0 мм – 0,67 кг/см², при толщине 2,0 мм – 1,71 кг/см², а в опытах с щебнем фракции 20–40 мм соответственно – 0,22 кг/см² и 0,87 кг/см². Для геомембраны с защитными прокладками из дорнита плотностью 450 г/м² предельные нагрузки при фракции щебня 5–20 мм и 20–40 мм составили соответственно: при толщине геомембраны 1,0 мм – 3,20 кг/см² и 1,16 кг/см², при толщине 2,0 мм – 7,13 кг/см² и 3,07 кг/см².

На основании полученных результатов коэффициент эффективности защитных прокладок из дорнита сверху и снизу геомембраны составит: при фракции 5–20 мм и толщине $\delta_{\text{ГМ}} = 1,0 - 2,0$ мм – $K_\pi = 4,77 - 4,17$, при фракции 20–40 мм и $\delta_{\text{ГМ}} = 1,0 - 2,0$ мм – $K_\pi = 5,27 - 3,53$. Осредняя и округляя значения коэффициента эффективности защитных прокладок из двух слоев геотекстиля (дорнита) с плотностью 450 г/м² в меньшую сторону с учетом некоторого запаса, получим $K_\pi = 4,0$.

В качестве примера рассмотрим вопрос о применении геокомпозитов, проведем соответствующие расчеты по формулам (5.27) и (5.28) для определения необходимой толщины геомембраны $(\delta_{\text{ГМ}})_{\text{ГК}}$ с учетом защитного эффекта от прокладок из геотек-

стиля в зависимости от максимальной фракции грунта в защитном и подстилающем слоях основания d_ϕ при принятом значении коэффициента эффективности защитных прокладок сверху и снизу $K_\Pi = 4,0$. Одновременно выполнены расчеты толщины геомембраны без защитных прокладок $\delta_{ГМ}$. Диапазон изменения максимальной фракции грунта d_ϕ составил от 0 до 100 мм.

Результаты выполненных расчетов представлены в графическом виде (номограммы) на рисунке 5.2. Исходные данные для расчетов приняты в соответствии с Рекомендациями [114]: $q = 0,5$ МПа, $q_\Gamma = 0,1$ МПа, $E = 120$ МПа, $\sigma_p = 1,2$ МПа, $K_\phi = 1$, $K_d = 2$, $K_\Pi = 4$ (для геомембраны с двумя слоями геотекстиля), $d_\phi = 2-5; 5-10; 20-30; 30-50; 50-100$ мм.

Анализ номограммы (см. рисунок 5.2) показывает, что область применения геомембран и ГК в противофильтрационных экранах может быть разделена на четыре зоны: I – зона применения геомембран без дополнительных защитных прокладок при толщине $\delta_{ГМ} \leq 1,0$ мм; II – зона применения геомембран без защитных прокладок при $1,0 \leq \delta_{ГМ} \leq 4,0$ мм; III – зона применения ГК, включающих геомембрану и два слоя геотекстиля плотностью 450 г/м^2 , при толщине геомембраны в составе геокомпозита $1,0 \leq (\delta_{ГМ})_{ГК} \leq 2,0$ мм; IV – зона применения ГК, включающих геомембрану и два слоя геотекстиля плотностью 450 г/м^2 , при $2,0 \leq (\delta_{ГМ})_{ГК} \leq 4,0$ мм.

Для получения расчетной оценки эксплуатационной надежности различных конструкций полимерных противофильтрационных экранов, в том числе разработанных Ю. М. Косиченко и О. А. Баевым высоконадежных конструкций из геокомпозитных материалов, представленных на рисунке 5.2, используем известную в теории надежности [47, 65, 78, 79, 105, 115] формулу Байеса в следующем виде:

$$P(D_j / K_i) = \frac{P(D_j)P(K_i / D_j)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K_i / D_s)}, \quad (5.29)$$

где $P(D_j)$ – априорная вероятность диагноза D_j ;

$P(K_i / D_j)$ – условная вероятность появления признака K_i у объектов с состоянием D_j ;

K_i – признак, относящийся к диагнозу с наибольшей вероятностью.

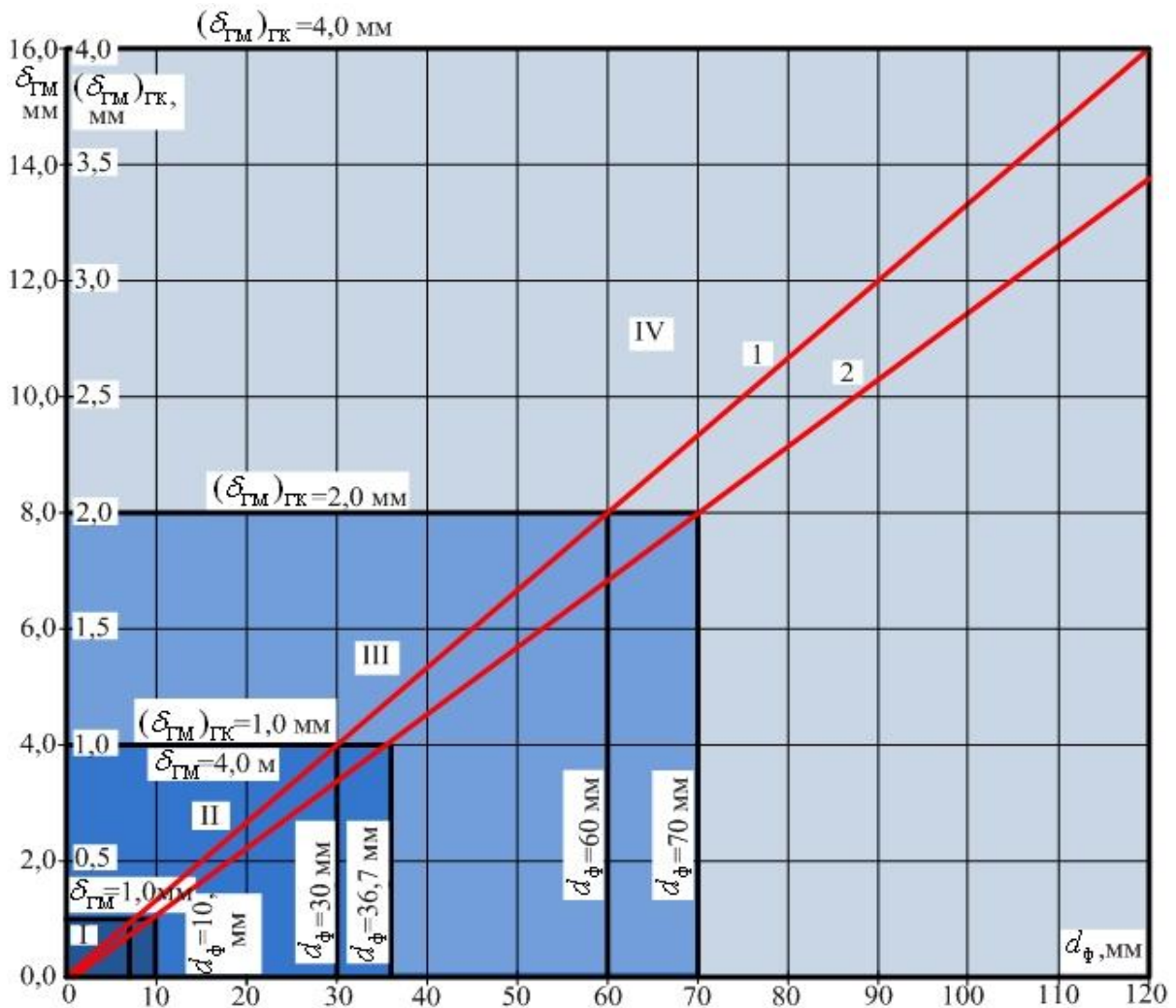
Из выражения (5.29) расчетные формулы для оценки вероятности диагноза (состояния) различных конструкций полимерных экранов в зависимости от априорного диагноза и диагностических признаков K_1 и K_2 получают следующий вид:

$$\begin{aligned} P(D_1 / K_1 K_2) = & P(D_1)P(K_1 / D_1)P(K_2 / D_1) / [P(D_1)P(K_1 / D_1)P(K_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(K_1 / D_2)P(K_2 / D_2) + P(D_3)P(K_1 / D_3)P(K_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(K_1 / D_4)P(K_2 / D_4)]; \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} P(D_2 / K_1 K_2) = & P(D_2)P(K_1 / D_2)P(K_2 / D_2) / [P(D_1)P(K_1 / D_1)P(K_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(K_1 / D_2)P(K_2 / D_2) + P(D_3)P(K_1 / D_3)P(K_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(K_1 / D_4)P(K_2 / D_4)]; \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} P(D_3 / K_1 K_2) = & P(D_3)P(K_1 / D_3)P(K_2 / D_3) / [P(D_1)P(K_1 / D_1)P(K_2 / D_1) + \\ & + P(D_2)P(K_1 / D_2)P(K_2 / D_2) + P(D_3)P(K_1 / D_3)P(K_2 / D_3) + \\ & + P(D_4)P(K_1 / D_4)P(K_2 / D_4)]; \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$P(D_4 / K_1 K_2) = P(D_4)P(K_1 / D_4)P(K_2 / D_4) / P(D_1)P(K_1 / D_1)P(K_2 / D_1) + \\ + P(D_2)P(K_1 / D_2)P(K_2 / D_2) + P(D_3)P(K_1 / D_3)P(K_2 / D_3) + \\ + P(D_4)P(K_1 / D_4)P(K_2 / D_4). \quad (5.33)$$



1 – график изменения толщины геомембраны два условия сплошности (неповреждаемости); 2 – график изменения толщины геомембраны из условия ее статической работы как мембраны; I и II – зоны геомембран: $\delta_{ГМ} \leq 1,0$ и $1,0 \leq \delta_{ГМ} \leq 4,0$ мм; III и IV – зоны ГК (геомембрана + два слоя геотекстиля): $1,0 \leq (\delta_{ГМ})_{ГК} \leq 2,0$ и $2,0 \leq (\delta_{ГМ})_{ГК} \leq 4,0$ мм

Рисунок 5.2 – Номограмма выбора типа геокомпозитов на основе геомембран из ПЭВД или ПЭНД при $d_\phi \geq 7,5$ мм

При оценке надежности полимерных экранов рассмотрим следующие их диагнозы (состояния): D_1 – образование сквозных механических повреждений экрана; D_2 – деформации основания экрана; D_3 – повреждения экрана при изменении свойств от старения полимерного материала; D_4 – нормальное (безотказное состояние экрана).

При наблюдении за противофильтрационными экранами проверяются два диагностических признака: K_1 – показатель водонепроницаемости экрана (осредненный коэффициент фильтрации); K_2 – показатель деформации основания экрана.

Расчетную оценку надежности современных конструкций противофильтраци-

онных экранов выполним для следующих конструкций экранов: из геомембраны толщиной 1,0 мм с защитным слоем грунта 0,50 м; геомембраны и одним слоем защитной прокладки из геотекстиля сверху с плотностью 450 г/м²; геомембраны с двумя слоями геотекстиля плотностью 450 г/м² сверху и снизу. Последние две конструкции отнесены к высоконадежным из ГК материалов, содержащих в своем составе геомембрану и один-два слоя защитного геотекстиля [99].

Для сравнения проведем также оценку надежности традиционного пленочного экрана из полиэтиленовой пленки толщиной 0,2–0,4 мм и защитным слоем грунта.

Задаваясь исходными данными: частотой состояния экрана a_j от 50 % до 2,5 %, интенсивностью повреждаемости λ_j от $1,07 \cdot 10^{-2}$ до $0,12 \cdot 10^{-3}$ 1/год, вероятностью признаков $P(K_1 / D_j)$, $P(K_2 / D_j)$ и априорных состояний $P(D_j)$, проведем расчеты вероятности появления каждого состояния диагноза $P(D_j / K_1 K_2)$ по формулам (5.30)–(5.33). Все расчеты сведем в таблицу 5.7.

При определении вероятности каждого диагноза $P(D_j)$ учитывались имеющиеся статистические данные повреждаемости пленочных противофильтрационных экранов [116], дополненные Ю. М. Косиченко и О. А. Баевым. Общее количество объектов составило $N = 28$, количество отказов на объектах с принятой повреждаемостью ($\Pi \geq 0,03\%$) составило $\Pi_{отз} = 12$, период наблюдений $\Delta t = 40$ лет. В соответствии с этим, интенсивность отказов покрытий с пленочными экранами толщиной 0,2–0,4 мм составит:

$$\lambda_{пл} = \frac{n_{отк}}{N \cdot \Delta t} = \frac{12}{28 \cdot 40} = 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ 1/год.} \quad (5.34)$$

Учитываем, что повреждаемость противофильтрационных экранов из геомембран толщиной 1,0–2,0 мм практически на порядок будет ниже [117], примем коэффициент эффективности геомембраны по отношению к пленке равным $K_{эф} = 10$. Тогда интенсивность отказов экранов из геомембран будет равна:

$$\lambda_{гм} = \frac{\lambda_{пл}}{K_{эф}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-2}}{10} = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.} \quad (5.35)$$

Для оценки интенсивности отказов экранов из геомембраны с защитными прокладками из геотекстиля учтем результаты исследований повреждаемости геомембраны статическими нагрузками [99], согласно которым коэффициент эффективности защитных прокладок плотностью 450 г/м² из двух слоев сверху и снизу геомембраны составит $K_{\Pi} = 4,19 - 4,77$ или примем с запасом $K_{\Pi_2} = 4,0$, тогда для одного слоя геотекстиля $K_{\Pi_1} = 2,0$.

В соответствии с этими данными получим интенсивность отказов:

- для геомембраны с одним слоем геотекстиля:

$$(\lambda_{гм})_{ГК1} = \frac{\lambda_{гм}}{K_{\Pi_1}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год;} \quad (5.36)$$

- для геомембраны с двумя слоями геотекстиля:

$$(\lambda_{гм})_{ГК2} = \frac{\lambda_{гм}}{K_{\Pi_2}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год;} \quad (5.37)$$

Таблица 5.7 – Результаты оценки эксплуатационной надежности различных конструкций противофильтрационных экранов с учетом их диагностических признаков и состояний

Наименование диагноза (состояния) экрана D_j	Частота состояния экрана $a_j, \%$	Тип экрана	Интенсивность $\lambda_j, 1/\text{год}$	Вероятность признаков и априорных состояний			Вероятность появления состояния диагноза $P(D_j / K_1 K_2)$
				$P(K_1 / D_j)$	$P(K_2 / D_j)$	$P(D_j)$	
1	2	3	4	5	6	7	8
Отказы вследствие образования повреждений экрана	50,0	пленочный	$1,07 \cdot 10^{-2}$	0,80	0,70	$0,535 \cdot 10^{-2}$	0,0723
	30,0	геомембрана без защитных прокладок	$1,07 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,20	$0,381 \cdot 10^{-3}$	0,0125
	20,0	геомембрана с одним слоем геотекстиля	$0,53 \cdot 10^{-3}$	0,25	0,20	$0,106 \cdot 10^{-3}$	0,00266
	10,0	геомембрана с двумя слоями геотекстиля	$0,27 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,15	$0,027 \cdot 10^{-3}$	0,000324
Отказы при деформациях основания экрана	35,0	пленочный	$1,07 \cdot 10^{-2}$	0,70	0,60	$0,375 \cdot 10^{-2}$	0,380
	20,0	геомембрана без защитных прокладок	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,25	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,00975
	5,0	геомембрана с одним слоем геотекстиля	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,15	$0,025 \cdot 10^{-3}$	0,000375
	3,0	геомембрана с двумя слоями геотекстиля	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,15	0,10	$0,0075 \cdot 10^{-3}$	0,000042

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8
Отказы вследствие старения полимерного материала экрана	15,0	пленочный	$0,5 \cdot 10^{-2}$	0,80	0,70	$0,075 \cdot 10^{-2}$	0,101
	10,0	геомембрана без защитных прокладок	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,35	0,25	$0,05 \cdot 10^{-3}$	0,00284
	5,0	геомембрана с одним слоем геотекстиля	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,15	$0,0125 \cdot 10^{-3}$	0,000282
	2,5	геомембрана с двумя слоями геотекстиля	$0,12 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,00	$0,003 \cdot 10^{-3}$	0
Нормальное (безотказное) состояние экрана	—	пленочный	—	0,02	0,02	0,9901	0,158
	—	геомембрана без защитных прокладок	—	0,05	0,03	0,9994	0,600
	—	геомембрана с одним слоем геотекстиля	—	0,04	0,05	0,9998	0,800
	—	геомембрана с двумя слоями геотекстиля	—	0,05	0,05	0,9999	0,9999

Расчеты вероятности появления состояний диагнозов различных конструкций экранов, представленных в таблице 5.7, свидетельствуют о том, что при наличии признаков K_1 и K_2 наиболее вероятным является диагноз D_1 – образование сквозных повреждений в пленочном экране с вероятностью 0,723, менее вероятны для пленочного экрана деформации основания D_2 и повреждения экрана вследствие старения полимерного материала D_3 .

В то же время вероятность появления этих диагнозов D_1 – D_3 для других типов экранов (с геомембраной с защитными прокладками из геотекстиля и без) очень мала и приближается практически к нулю.

Это обуславливает их более высокую эксплуатационную надежность по сравнению с пленочными экранами, где пленка толщиной 0,2–0,4 мм легко повреждается в период строительства и эксплуатации объектов.

Подтверждением сказанному являются результаты расчета вероятности последнего диагноза D_4 – нормальное (безотказное) состояние экрана. Согласно этим результатам наиболее низкие значения вероятности диагноза D_4 получены для пленочного экрана с вероятностью всего 0,158, а для остальных типов экранов с геомембраной вероятность диагноза D_4 значительно возрастает от 0,60 и выше.

Причем для высоконадежных конструкций экранов с защитными прокладками из геотекстиля вероятность нормального (работоспособного) состояния экрана возрастает до 0,80 и более. И, наконец, для экрана из геомембраны с двумя слоями геотекстиля вероятность этого состояния возрастает почти до единицы, как для самой надежной конструкции экранов из рассмотренных.

5.5 Расчет надежности работы крупного канала

Важное значение имеет количественная оценка канала при его эксплуатации, так как часто при этом возникают неблагоприятные сценарии разрушения дамб каналов из-за недостаточного запаса гребня над уровнем воды, значительного превышения уровня воды над прилегающей территорией для участков в высоких насыпях, опасных фильтрационных деформаций грунта дамб и просадок гребня.

Для количественной оценки надежности канала используем метод Байеса [118]. В этом методе широко могут использоваться диагностические показатели по данным наблюдений или имеющимся статистическим данным, которые позволяют дать прогнозную оценку надежности системы и выбрать одну или несколько наиболее вероятных диагностических гипотез.

Полная формула Байеса имеет вид [65, 79]:

$$P(D_i/K_j) = \frac{P(D_i)P(K_j/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K_j/D_s)}, \quad (5.38)$$

где $P(D_i)$ – предварительная вероятность диагноза D_i ;

$P(K_j/D_i)$ – вероятность появления признаков K_j у объектов с состоянием D_i ;

$\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K_j/D_s)$ – сумма вероятностей появления событий.

Применительно к каналам в насыпи будем учитывать четыре диагностических признака, непосредственно влияющие на состояние и безопасность канала: K_1 – превышение гребня дамбы над уровнем воды на участке канала в насыпи; K_2 – превышение уровня воды в канале над поверхностью прилегающей территории; K_3 – средний градиент при фильтрации через тело и основание дамбы; K_4 – просадку гребня дамбы. Каждый признак состояния дамбы канала в насыпи имеет m_j разрядов (K_{js}), соответствующих нормальному, пониженному и опасному (критическому) состоянию.

Методика решения подобных задач технической диагностики для двухразрядных признаков впервые описана И. А. Биргером [78].

В рассматриваемой задаче учитывается четыре диагностических двухразрядных признака K_{js} . Тогда формула Байеса приобретает следующий вид:

$$P(D_i/K_{js}) = \frac{P(D_i)P(K_{1n}/D_i)P(K_{2m}/D_i)P(K_{3z}/D_i)P(K_{4f}/D_i)}{\sum_{s=1}^4 P(D_s)P(K_{1n}/D_s)P(K_{2m}/D_s)P(K_{3z}/D_s)P(K_{4f}/D_s)}, \quad (5.39)$$

где $P(D_i)$ – априорная вероятность (диагноза) D_i ;

$P(D_s)$ – вероятность состояния D_s ;

$K_{1n}, K_{2m}, K_{3z}, K_{4f}$ – двухразрядные признаки $K_1, \dots, K_4$.

Рассмотрим решение данной задачи по исходным данным, представленным в диагностической матрице (таблица 5.8). Здесь каждый диагностический признак K_j представлен тремя состояниями, соответствующими нормальному, пониженному и опасному уровням. Примем, что диагноз D_1 соответствует безопасному состоянию ГТС, а диагноз D_2 – отказу. Значениями вероятности диапазонов задаемся априорно: $P(D_1) = 0,83$, $P(D_2) = 0,17$.

При составлении матрицы должно соблюдаться условие, чтобы сумма вероятности всех возможных реализаций признака была равна единице, т. е.:

$$\sum_{s=1}^{m_j} P(K_{js}/D_i) = 1, \quad (5.40)$$

где m_j – число разрядов признаков K_j .

Считая признаки независимыми, установим вероятность наступления событий D_i (отказа или безотказного состояния) с учетом четырех диагностических признаков $K_1 - K_4$. Расчет выполним по формуле Байеса (5.39) сначала для вероятности диагноза D_2 (отказ) по максимальному значению вероятности каждого признака, а затем для вероятности диагноза D_1 (безотказное состояние) – по минимальным значениям вероятности каждого признака:

$$P(D_2/K_{js}) = \frac{0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65}{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05 + 0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65} = 0,9967,$$

$$P(D_1/K_{js}) = \frac{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05}{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05 + 0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65} = 0,0033.$$

Таблица 5.8 – Диагностическая матрица для расчета вероятности диагнозов состояний крупного канала ТПС

Диагноз D_i	Признак K_1					
	Превышение гребня дамбы над уровнем воды в канале K_1 , м			Превышение уровня воды в канале над прилегающей территорией K_2 , м		
	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{21}	K_{22}	K_{23}
	< 0,3	0,3–0,5	> 0,5	< 1,0	1,0–10,0	> 10,0
	$P(K_{11}/D_i)$	$P(K_{12}/D_i)$	$P(K_{13}/D_i)$	$P(K_{21}/D_i)$	$P(K_{22}/D_i)$	$P(K_{23}/D_i)$
D_1	0,15	0,25	0,60	0,50	0,35	0,15
D_1	0,55	0,25	0,20	0	0,40	0,60
Диагноз D_i	Признак K_1					
	Средний градиент напора при фильтрации через дамбы K_3 , м			Просадка гребня дамбы K_4 , м		
	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}	K_{43}
	< 0,5	0,5–1,0	> 1,0	< 0,1	0,1–0,5	> 0,5
	$P(K_{31}/D_i)$	$P(K_{32}/D_i)$	$P(K_{33}/D_i)$	$P(K_{41}/D_i)$	$P(K_{42}/D_i)$	$P(K_{43}/D_i)$
D_1	0,55	0,35	0,10	0,70	0,25	0,05
D_1	0	0,20	0,75	0,10	0,25	0,65

Полученные значения вероятностей отказа и безопасного состояния в сумме составляют единицу, что соответствует условию.

Проведенные расчеты показали, что при неблагоприятных характеристиках дамбы канала, соответствующих описанному (критическому) состоянию, будет наблюдаться в процессе эксплуатации высокая вероятность отказа или аварии сооружения. При этом риск аварии составит $3,3 \cdot 10^{-3}$, что превышает допускаемое значение для ГТС III класса (по СП 58.13330.2012) [2].

6 ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

6.1 Современное состояние водосбросных сооружений на грунтовых плотинах

В последние годы в соответствии с реализацией закона Российской Федерации № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [1] крайне актуальным является оценка уровня безопасности гидротехнических объектов и разработка мер по обеспечению безопасности. Анализ аварий и повреждений ГТС в разные периоды их существования (строительство и эксплуатация) свидетельствуют о невозможности достижения абсолютной безопасности, так как современные нормы допускают вероятность аварии 10^{-4} – 10^{-5} [119–122].

Современная концепция безопасности ГТС является основой нормативно-правовых документов и включает в себя теоретические положения и методы решения связанных между собой задач: контроль, оценка и управление безопасностью. В этом направлении имеются много научных разработок по изучению системы «сооружение – основание», исследованию и прогнозированию волны прорыва, образованию прорана при порыве земляной плотины, определению пиковых расходов соответствующих мгновенному разрушению плотин и др. При этом важно, чтобы эти проблемы не рассматривались в отрыве от работы водосбросных сооружений.

Очевидно, что нормальная эксплуатация водосброса не должна приводить к таким катастрофическим явлениям, как, например, перелив воды через гребень глухой плотины. Поэтому крайне важно выполнить оценку возможности превышения принятых в проекте расчетных уровней природных воздействий (расход, напор, размывы, оползни в нижнем бьефе и др.) из-за изменения водопропускной способности сооружения. Это актуально для водосбросов любого типа, но особенно для закрытых водосбросных сооружений: трубчатых и туннельных.

Опыт проектирования и эксплуатации показывает, что расчетные расходы, пропускаемые закрытыми водосбросами, достигают больших значений, но обычно меньше, чем для открытых водосбросов.

Гидравлические условия работы таких сооружений сложные, так как «вход» и «выход» могут быть затопленными и незатопленными, а водосбросной тракт работает в напорном, частично-напорном, безнапорном или в условиях переходных режимов. Переходные режимы сопровождаются значительными гидродинамическими воздействиями на элементы отводящего тракта, особенно нерегулируемых водосбросов. Недопустимо образование «воздушных» пробок с выбросом их в атмосферу.

В рассматриваемых условиях работы водосбросов важной задачей является обеспечение нормальной эксплуатации нижнего бьефа гидроузла, а это возможно при применении рациональных схем гашения энергии, устранении недопустимых гидродинамических нагрузок на элементы водосброса, что и приводит к формированию допустимых размывов грунта за сооружением.

Большим недостатком закрытых водосбросных сооружений является возможность его «захлебывания». Поэтому надо учитывать, особенно в высоконапорных водосбросах, что ошибки в прогнозировании расчетного паводка более опасны, чем при открытых водосбросах. Если туннельный водосброс входит в гидроузел с глухой грунтовой плотиной, то «захлебывание» особенно опасно, так как оно может повлечь за собой перелив через гребень плотины, что недопустимо, в этом случае, безусловно, необходимо учитывать срезку пика паводка водохранилищем при превышении в нем расчетного уровня.

Из анализа аварий гидротехнических объектов следует, что в России наблюдались катастрофические аварии, например недавно произошедших аварий на Киселевской и Тирлянской плотинах [123].

Мировой опыт эксплуатации водосбросных сооружений, в том числе и туннельных водосбросов, показывает, что они довольно часто получают различные повреждения, причинами которых являются обычно недостатки изысканий, проектных решений или сейсмическое воздействие, некачественное выполнение строительных работ, а часто и отступление от требуемых в проекте рекомендаций по технологии строительства и эксплуатации. К типичным видам разрушений в водосбросных сооружениях можно отнести: срыв металлической облицовки в затворных камерах; заклинивание затворов; повреждение опорно-ходовых устройств и, как следствие, невозможность регулирования затворами; кавитационно-эрозионные повреждения водосбросного тракта; недопустимая фильтрация по трещинам в бетонной обделке туннельных водосбросов.

Перечисленные виды разрушений в водосбросных сооружениях, нарушение нормальной эксплуатации из-за несоблюдения необходимых режимов работы сооружения и плохое состояние гидромеханического оборудования (перекосы затворов, отсутствие энергоснабжения подъемных механизмов, коррозия затвора и прочее) являются главными причинами аварий на гидротехнических объектах.

Важным критерием надежности водосбросных сооружений любого типа является состояние русла в нижнем бьефе. Образование значительных донных деформаций и недопустимых местных размывов может являться источником экологических катастроф прилегающего района.

Поэтому в настоящее время одним из актуальных вопросов в рассмотрении гидравлических аспектов проблемы оценки и прогноза безопасности гидротехнического объекта (например, при прогнозе условий прорыва напорного фронта гидроузла при пропуске паводков редкой повторяемости, сопровождающийся возникновением катастрофического паводка в нижнем бьефе [124]) является учет условий работы водосбросных сооружений и повышение уровня их безопасности за счет специальных инженерных и эксплуатационных решений. Такими решениями могут быть:

- разработка соответствующей схемы включения в работу водосбросных сооружений в зависимости от принятой компоновки гидроузла, то есть поэтапное включение в работу основных водосбросов (глубинных и поверхностных), а при необходимости использование резервных водосбросов (естественных пойменных и «плавких» вставок);

- повышение надежности затворов водосбросных отверстий, подъемно-транспортного и электрического оборудования за счет использования современных инженерных решений (одним из таких решений является поверхностный затвор французской фирмы «Hydroplus» или так называемый «плавкий затвор» [125]);

- применение водосбросов с повышенной пропускной способностью, что достигается за счет:

- 1) водосливов и оголовков вакуумного очертания (в поверхностных и глубинных водосбросах);

- 2) отсутствия затворов (водосбросы автоматического действия);

- 3) специальных конструкций, приводящих к восстановлению части кинетической энергии в напорных водоводах;

- 4) наращивания плотин и устройство при этом вакуумных водосливов;

- разработка и внедрение новых конструкций туннельных водосбросов с эффек-

тивным гашением энергии в отводящем туннеле, приводящем к безопасной и надежной работе всего водосбросного тракта и нижнего бьефа.

В настоящее время особое внимание уделяется экологии территорий [126], прилегающих к возводимым и действующим ГТС, а также безопасной эксплуатации этих объектов.

Разрушение напорного фронта гидроузлов является одним из самых опасных случаев аварий при работе ГТС, приводящих к существенным экономическим, экологическим и социальным последствиям, а также влияющих в значительной степени на экологию нижнего бьефа гидроузлов.

Поэтому для предотвращения разрушения напорного фронта гидроузлов с грунтовыми плотинами в последнее время в России и ряде стран за рубежом получили применение резервные водосбросы в дополнение к основным водосбросам.

6.2 Классификация водосбросных сооружений

В настоящее время существуют различные классификации водосбросных сооружений [81, 127, 128].

Согласно справочнику [128], водосбросы делят на низконапорные ($H < 12$ м), средненапорные ($12 \leq H \leq 60$ м), высоконапорные ($H > 60$ м). В состав водосбросного сооружения входят: входная часть, водопроводящий тракт и сопряжение с нижним бьефом (концевой участок или выходная часть).

Основные требования к проектированию водосбросных сооружений заключаются в обеспечении устойчивого режима потока в пределах проточной части: напорный или безнапорный. Переходные (частично напорные режимы) допускаются лишь при постепенном переходе из безнапорного режима в напорный и обратно без значительных пульсационных воздействий.

Водосбросные сооружения классифицируются по общим признакам (назначению), гидравлическим условиям и гидравлическим режимам потока (таблицы 6.1–6.3) [127, 128].

Основные типы водосбросных сооружений низконапорных гидроузлов представлены в таблице 6.4. Для низконапорных гидроузлов наиболее часто используются среди открытых водосбросов русловой и береговой типы, а среди закрытых – трубчатый и шахтные типы.

Русловой водосброс представляет собой водосливы с широким порогом или практического профиля, выполненные из бетона и железобетона. Береговой водосброс устраивается в обход плотины и включает подводящий канал с водосливом или без него, отводящий канал и сопрягающее сооружение в виде быстротока, перепада и консольного сброса. Трубчатый водосброс состоит из входной части, одной или нескольких водопропускных труб с устройствами для гашения энергии. Шахтный водосброс включает кольцевой водослив с развитой входной воронкой и водоотводящий тракт (шахту) круглого сечения.

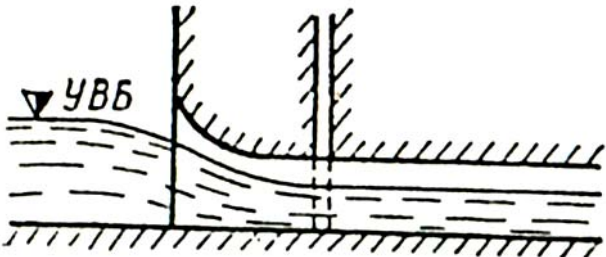
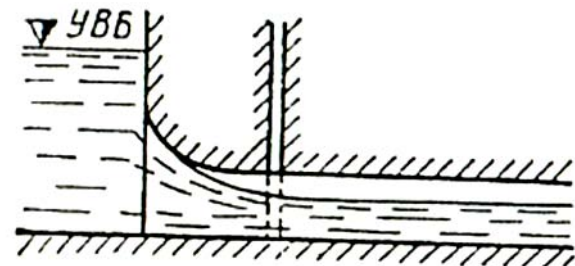
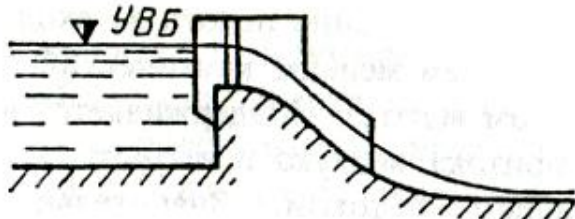
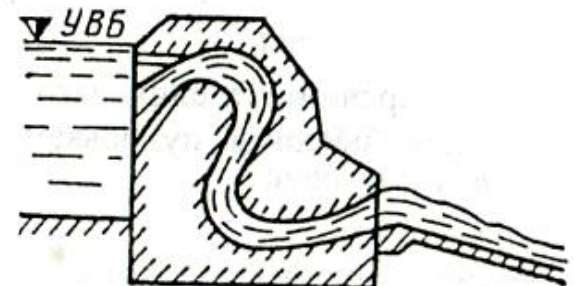
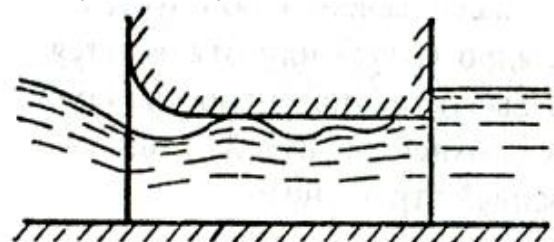
Кроме перечисленных типов водосбросов на низконапорных гидроузлах находят применение сифонные водосбросы конструкции Мисинева, выполненные из нескольких труб круглого сечения с входным оголовком, заглубленным под уровень НПУ водохранилища. Зарядка таких водосбросов осуществляется самостоятельно или принудительно.

Следует отметить, что в последнее время за рубежом и у нас в стране находят также применение резервные водосбросы [127].

Таблица 6.1 – Классификация водосбросных сооружений по общим признакам

Признак классификации	Сооружение	Назначение
Функциональное назначение	Водосбросы	Сооружения для сброса воды из верхнего бьефа (ВБ) во избежание его переполнения. Можно использовать для пропуска льда, шуги и других плавающих тел, а также для промыва ВБ от наносов
	Водовыпуски	Сооружения для полезных попусков воды из ВБ в канал, трубопровод, русло реки
	Водоспуски (иногда одновременно используют и как водовыпуски или водосбросы)	Сооружения для полного или частичного (предпаводкового аварийного) опорожнения водохранилищ
Характер использования	Постоянные (эксплуатационные)	Для всего периода эксплуатации
	Временные (строительные)	Только для периода строительства или ремонта постоянных сооружений
	Строительно-эксплуатационные	Совмещающие функции постоянных и временных сооружений
Повторяемость пропускаемых паводков	Основные (главные, рабочие)	Для сброса часто повторяющихся паводков
	Вспомогательные (резервные или аварийные)	Для пропуска совместно с основными редко повторяющихся высоких паводков
Местоположение	Русловые	Размещают в пределах напорного фронта в русловой или примыкающей пойменной частях русла, непосредственно в теле или на поверхности плотины
	Береговые	Открытые (крепленые каналы, быстротоки, перепады) или закрытые (туннельные, трубчатые) водоводы в коренных берегах речной долины
	Пойменные	Участок речной поймы, используемый как резервный водосброс для пропуска части расхода в обход гидроузла
Оборудование водосливных отверстий	Регулируемые	Оборудованные затворами, механизмами и средствами для управления ими
	Нерегулируемые (автоматического действия)	Без затворов или с затворами, отрегулированными на их поднятие при достижении уровнем воды заданной отметки
Тип водопроводящего тракта	Открытые (поверхностные)	С незамкнутым поперечным сечением водовода
	Закрытые	С замкнутым сечением водовода
	Комбинированные	С участками открытыми и закрытыми, расположенными последовательно или в несколько ярусов

Таблица 6.2 – Классификация водосбросов по гидравлическим условиям

Тип и схема классификации	Характерная особенность
1	2
Условия на входе:	
С незатопленным входом 	Вода касается лишь части входного сечения и имеет в его пределах свободную поверхность
С затопленным входом 	Вода касается всего периметра входного сечения
Гидравлический режим:	
Безнапорный 	Режим давления, при котором поток имеет свободную поверхность
Напорный 	Режим движения, при котором поток со всех сторон имеет твердую границу
Переходный (частично напорный): устойчивый с замкнутой воздушной полостью 	Возникает при глубинах потока больше критических в случае подтопления со стороны нижнего бьефа (НБ)

Продолжение таблицы 6.2

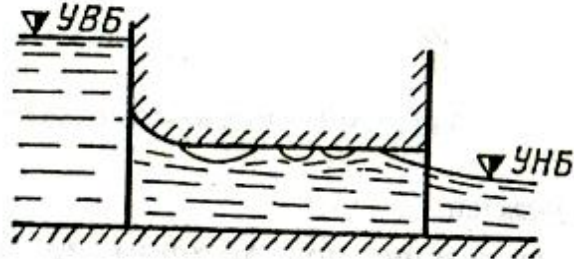
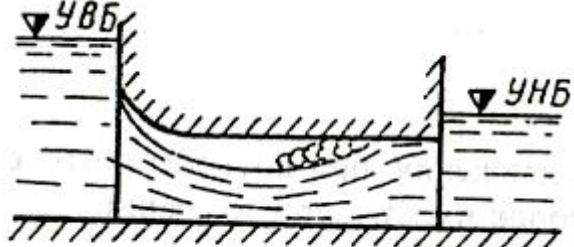
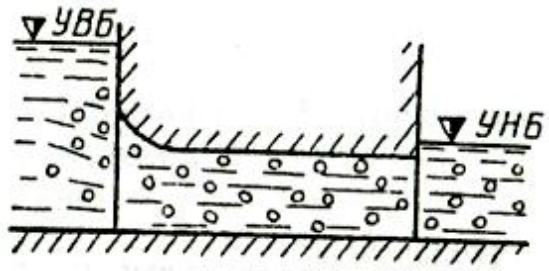
1	2
Устойчивый с незамкнутой воздушной полостью 	Возникает на участке смены режимов течения в потоке при глубинах потока больше критических и отсутствии подтопления со стороны НБ
Неустойчивый (пробковый) с непрерывным образованием и перемещением воздушных полостей и пузырьков воздуха 	Возникает на участке смены режимов течения в потоке при глубинах меньше критических и отсутствии подтопления со стороны НБ. Опасен значительной пульсацией давления. Переводится в устойчивый режим при специальной конструкции оголовка
Неустойчивый с гидравлическим прыжком в водоводе 	Возникает при глубине потока за входным отверстием меньше критической и затопленном выходе. Поддерживается в случае притока воздуха в полость над безнапорным потоком. Значительная пульсация давления за прыжком
Эмульсионный 	Возникает в поперечном сечении, затопленном водой с мелкими пузырьками воздуха
Кольцевой – с закруткой потока	Поток прижимается к стенкам, а в центральной части сечения образуется воздушное ядро (жгут) или отжимается от нижней выпуклой поверхности, прижимаясь в верхней вогнутой, с интенсивной аэрацией струи снизу

Таблица 6.3 – Рекомендуемый гидравлический режим потока на участках водосбросных сооружений

Режим потока	Участок водосброса	Средства обеспечения
Безнапорный	Водопроводящие участки открытых водосбросов. Закрытые водосбросы при сравнительно небольших расходах. Концевые и отводящие участки	Поверхностные водоприемники; затворы в начале трубы или туннеля; увеличение уклона тракта и воздушного пространства над свободной поверхностью потока; подвод воздуха в начале безнапорного участка; одностороннее обжатие потока
Напорный	Входные участки трубчатых и туннельных водосбросов. Транзитные участки закрытых водосбросов при пропуске больших расходов (для исключения кавитационной эрозии)	Глубинные отверстия; затворы в конце туннеля. Переменное сечение шахты (особенно по координатам свободнопадающей струи) или цилиндрическая шахта с носком-отклонителем; подвод воздуха (воздуховоды, аэрационные шахты)
Переходный (частично напорный)	Водопроводящие участки – при смене основных режимов работы. Требуют обоснования расчетом или модельными исследованиями	Оголовки специального очертания, устраняющие неблагоприятные режимы потока; «спокойная зарядка» напорного тракта

Таблица 6.4 – Основные типы водосбросных сооружений низконапорных гидроузлов

Водосброс	Водопроводящая часть	Область применения
1	2	3
Открытые		
Русловой	Водослив с широким порогом или практического профиля	Земляные, каменно-набросные, бетонные плотины с напором до 15 м
Береговой (на одном, реже на обоих берегах)	Подводящий канал; водослив с фронтальным входом; отводящий канал и сопрягающее сооружение в виде быстротока или многоступенчатого перепада для гашения энергии	Гидроузлы с грунтовыми, бетонными глухими плотинами с напором до 15 м
Траншейный (береговой с боковым отводом воды)	Водосливная часть в виде водослива с широким порогом или практического профиля; траншея; отводящий канал и сопрягающее сооружение (быстроток, перепад, трамплин) с устройством для гашения энергии. Регулируемый или автоматического действия	В скальных и полускальных породах при крутых береговых склонах, затрудняющих размещение берегового водосброса фронтального типа

Продолжение таблицы 6.4

1	2	3
Резервный (в теле грунтовой плотины или пойменный)	В теле грунтовой плотины в виде порога, работающего как водослив с широким порогом, с размываемой вставкой. Пойменный в виде участка речной поймы с креплением, иногда с размываемыми дамбами	Устраиваются в дополнение к основному водосбросу в теле грунтовой плотины или в обход гидроузла
Закрытые		
Трубчатый	Входная часть в виде водослива или глубинных отверстий; одна или несколько труб с затворами; выходной оголовок с устройствами для гашения энергии	Водосбросы, водовыпуски, водоспуски в теле грунтовых плотин небольшой высоты
Ковшовый	С безвакуумными и вакуумными входными оголовками, нерегулируемые	Для пропуска расходов при небольшом повышении уровня в ВБ
Сифонный	Ряд изогнутых труб в теле плотины; входная часть в виде конфузора, расположенная ниже НПУ. Автоматического действия	Водосбросы конструкции Мисинева применяются на грунтовых плотинах низконапорных гидроузлов
Башенный	Трубчатый водосброс с устройством для приема воды и управления затворами в виде башни	Водоспуски и водовыпуски грунтовых плотин средней и небольшой высоты
Шахтный	Поверхностный водослив с развитой входной воронкой; вертикальный или слегка наклонный водоотводящий тракт (шахта) круглого сечения	Управляемые – при расходах свыше 600–700 м ³ /с и напорах до 5–6 м; без затворов – при малых расходах и напорах не более 2 м

Резервные (вспомогательные) водосбросы обычно применяют в дополнение к основным водосбросам. Основной водосброс выполняют капитальным из бетона, железобетона и может быть рассчитан на пропуск паводков частой повторяемости, а резервные водосбросы рассчитываются на пропуск паводков редкой повторяемости. При этом резервные водосбросы стремятся строить простыми и дешевыми [128]. Часто для этой цели используются в теле грунтовой плотины размываемые вставки из грунта или пойма и местные понижения рельефа или береговые каналы, где устраиваются размываемые перемычки [127].

6.3 Конструкции резервных водосбросов

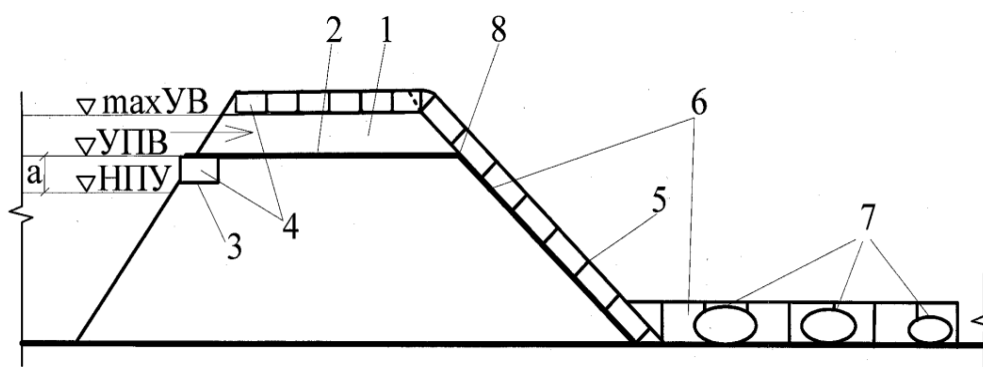
Резервные водосбросы применяют в компоновках речных гидроузлов для снижения общей стоимости водосбросных сооружений. Крупные гидроузлы с глухими плотинами из грунтовых материалов обычно имеют водосбросы большой пропускной способности. Стоимость их высока, однако весьма вероятно, что за весь период существования гидроузла водосброс ни разу не будет работать на полную мощность. В связи с этим обычно предусматривают несколько водосбросов: один (реже несколько) основной бетонный и один или два резервных (вспомогательных).

В настоящее время разработаны конструкции резервных водосбросов, которые

защищены охранными документами и патентами, способные обеспечить безопасный пропуск чрезвычайного паводка и не допускающие разрушения плотины и затопление нижележащей территории во избежание экологического и материального ущерба.

6.3.1 Быстровозводимый резервный водосброс

Резервный водосброс грунтовой плотины представляет собой искусственный проран трапецеидального сечения, устроенный в гребне плотины, глубиной до отметки расчетного уровня перелива воды, в ложе которого уложено защитное покрытие из полимерного материала в виде геомембраны, закрепленное в прямках со стороны верхнего бьефа и на бровках откосов пригрузами. На низовом откосе плотины по ширине искусственного прорана устроен водопроводящий лоток, переходящий в водобойную часть водосброса. Дно водопроводящей и водобойной частей выполнено из двойного полотнища геомембраны с несовпадающими отверстиями, предназначенными для свободного отвода фильтрационного потока. Стенки водопропускного лотка и водобойной части и гасители энергии водного потока сформированы из гибких оболочек, заполненных песком. Двойное полотнище геомембраны крепят к защитному покрытию искусственного прорана с выполнением сварного шва. Обеспечивается безопасный пропуск чрезвычайного паводка, не допускающий разрушение плотины и затопление нижележащей территории, во избежание экологического и материального ущерба (рисунок 6.1).



- 1 – искусственный проран; 2 – защитное покрытие из геомембраны; 3 – прямка со стороны верхнего бьефа; 4 – пригруз; 5 – двойное полотнище геомембраны; 6 – гибкая оболочка из геомембраны с песком; 7 – гасители энергии водного потока; 8 – сварной шов

Рисунок 6.1 – Схема резервного водосброса грунтовой плотины

Рассмотрим конструкцию быстровозводимого водосброса низконапорного гидроузла малого водохранилища, защищенную патентом РФ [103].

Резервный водосброс грунтовой плотины представляет собой искусственный проран трапецеидального сечения, в ложе которого с целью предотвращения размыва потоком укладывается защитное покрытие из геомембраны, закрепленное на бровках и со стороны верхнего бьефа с помощью коробчатых габионов, заложённых каменным материалом. Водопроводящая и водобойная части резервного водосброса выполнены в виде лотка с дном из двойного полотнища геомембраны с несовпадающими отверстиями, предназначенными для свободного отвода фильтрационного потока, а также гибких оболочек из материала геомембраны, заполненных песком и образующих стенки водопропускной и водобойной частей, на которых устроены гасители энергии водного потока из таких же гибких оболочек.

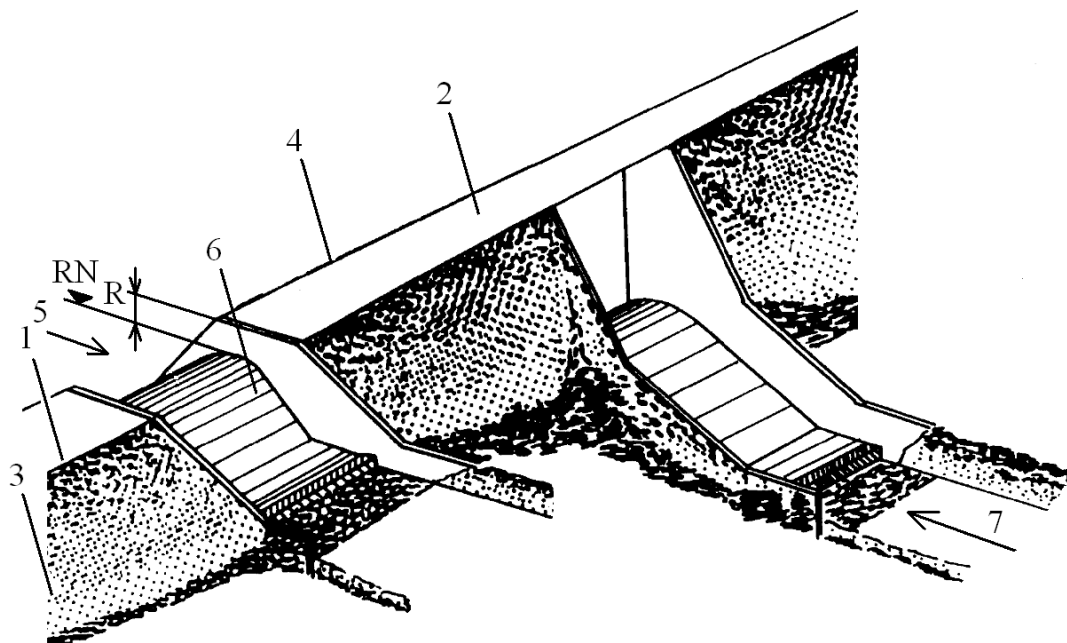
Преимуществом предлагаемой конструкции резервного водосброса, по сравнению с существующими, является повышенная пропускная способность за счет гладкой поверхности геомембраны, быстрота возведения (в течение двух-трех дней) и сравнительно невысокая стоимость. Такие резервные водосбросы наиболее целесообразно применять в дополнение к основным при эксплуатации малых водохранилищ, если по прогнозу предполагается паводок, превышающий расчетную обеспеченность. В случаях, когда оболочки будут заполняться воздухом или водой, водосброс может использоваться как аварийный с полной его установкой в течение трех – пяти часов.

6.3.2 Резервный водосброс с легкоразрушаемыми блоками

Водосброс чрезвычайных паводков для плотин и сооружений подобного типа включает два водослива, один из которых предназначен для сброса паводков с небольшими или средними расходами, а второй снабжен установленным на его гребне перегораживающим элементом, причем гребень второго водослива расположен ниже катастрофического подпорного уровня, а перегораживающий элемент имеет высоту большую, чем разница между уровнем гребня водослива и катастрофическим подпорным уровнем [129].

На гребне одного из водосливов устанавливают перегораживающий элемент, образованный, по меньшей мере, одним цельным блоком, причем блоки выполнены легкоразрушаемыми при опрокидывании для расчетного напора воды, соответствующего максимальному уровню при прохождении чрезвычайного паводка, а паводки с меньшим расходом сбрасываются другим водосливом.

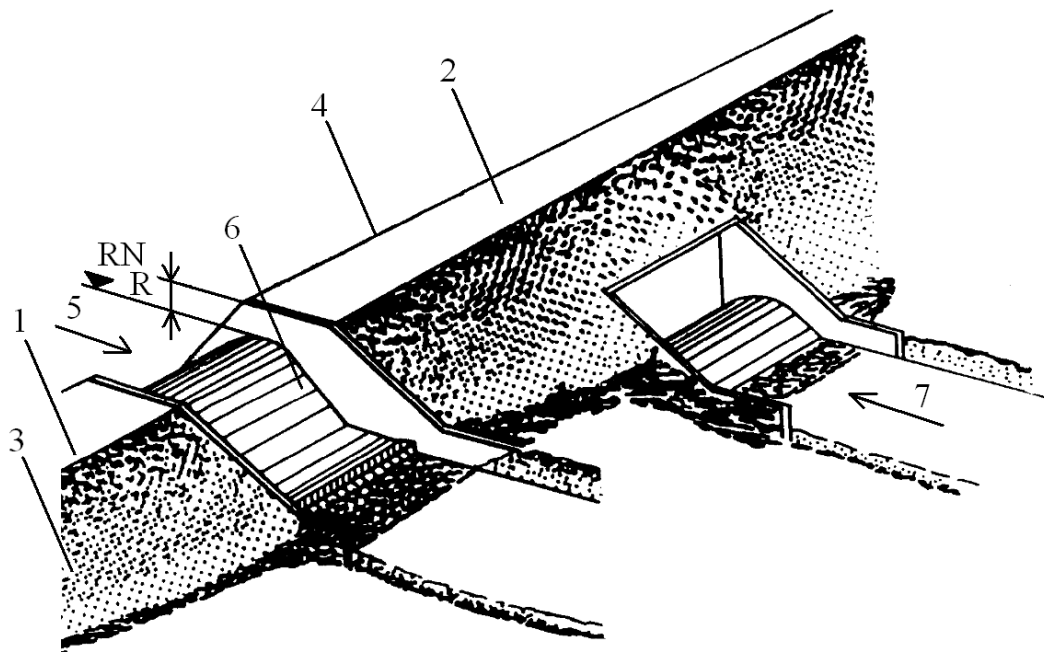
На рисунке 6.2 представлен водосброс чрезвычайных паводков, состоящий из плотины, сливного желоба с открытым сливным порогом и другим сливным желобом, предназначенным для сброса частных паводков и снабженным затворами.



1 – сливной порог; 2 – гребень плотины; 3 – низовая грань плотины; 4 – верховая грань плотины; 5 – водосливной желоб для сброса паводковых вод; 6 – сливной желоб; 7 – устройство сброса текущих паводков

Рисунок 6.2 – Водосброс чрезвычайных паводков с открытым сливным порогом и сливным желобом, снабженным затворами

На рисунке 6.3 представлен водосброс чрезвычайных паводков, состоящий из плотины, сливного желоба с открытым сливным порогом и глубинного водослива с затвором.



1 – сливной порог; 2 – гребень плотины; 3 – низовая грань плотины; 4 – верховая грань плотины; 5 – водосливной желоб для сброса паводковых вод; 6 – сливной желоб; 7 – устройство сброса глубинных вод

Рисунок 6.3 – Водосброс чрезвычайных паводков с открытым сливным порогом и глубинным водосливом с затвором

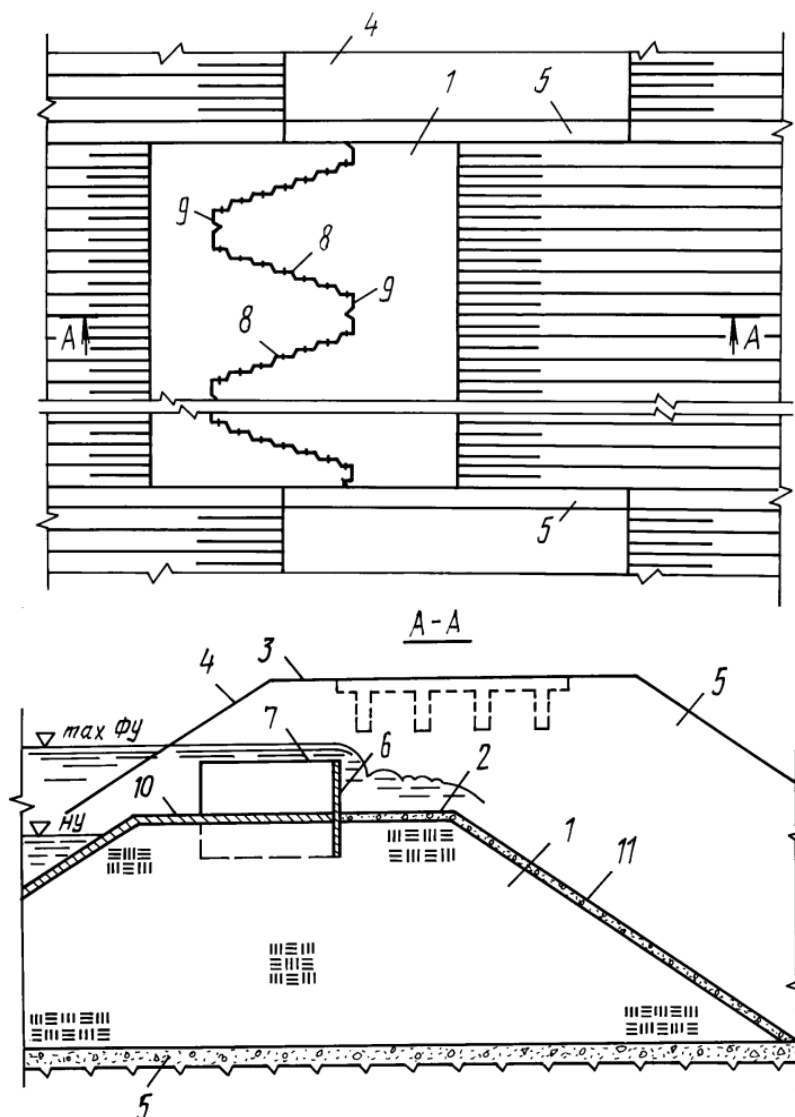
Водосбросы чрезвычайных паводков могут быть применены как на плотинах с земляной дамбой, так и на плотинах из бетона или каменной кладки.

В данных сооружениях уровень водохранилища в отсутствии паводка всегда ниже или равен уровню RN – нормальный подпорный уровень (НПУ).

Недостатком данного способа является то, что в процессе эксплуатации такого водослива возможны повреждения и деформации при опрокидывании блока, его разрушение. Создание такого водосброса предусматривает его строительство до начала эксплуатации плотины. При пропуске паводков через водосброс могут наблюдаться размывы низового откоса плотины, которые могут вызвать разрушение самой плотины.

6.3.3 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и водосливной стенкой зигзагообразной формы

Резервный водосброс подпорного сооружения включает размываемую вставку, выполненную в виде грунтовой плотины с отметкой гребня ниже отметки гребня подпорного сооружения и заключенную с боков и снизу в одежду из неразмываемого материала. Гребень грунтовой плотины снабжен водосливной стенкой зигзагообразной в плане формы и водонепроницаемо сопряженной с грунтовой плотиной (рисунок 6.4) [130].



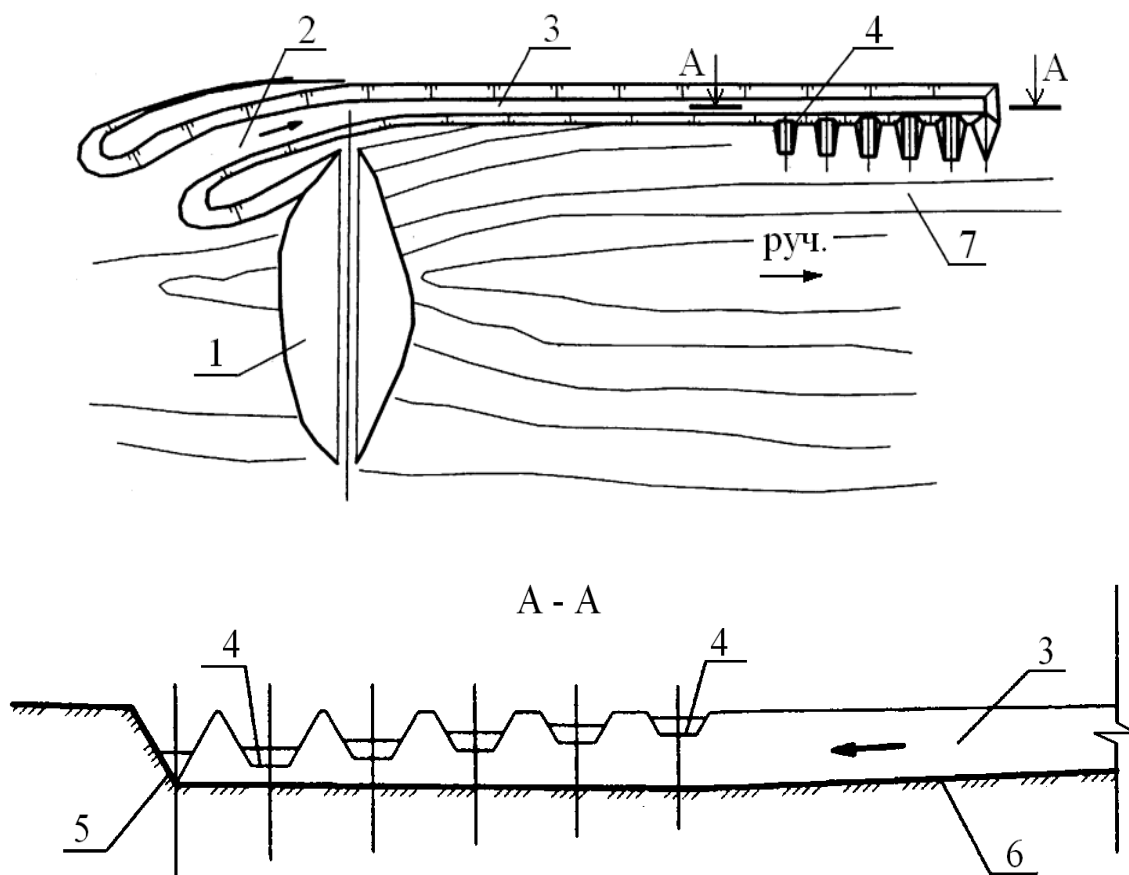
- 1 – грунтовая плотина; 2 – отметка гребня плотины; 3 – отметка гребня подпорного сооружения; 4 – подпорное сооружение; 5 – одежда из бетона; 6 – водосливная стенка; 7 – отметка гребня водосливной стенки; 8 – стальные шпунты зетового профиля; 9 – стальные шпунты корытного профиля; 10 – защитный слой из бетона; 11 – защитный слой из песчано-гравийного материала

Рисунок 6.4 – Резервный водосброс подпорного сооружения

Недостатком данного способа является сложность в выполнении и недостаточная эффективность срабатывания резервного водосброса за счет размыва вставки в теле плотины и необходимости подмыва и опрокидывания.

6.3.4 Резервный водосброс с водовыпусками

Водосброс ГТС относится к открытым береговым приплотинным водосбросам автоматического действия и предназначенного для сброса паводковых вод. Водосброс включает головной водосливной участок, отводящий канал и концевой участок сопряжения бьефов, который снабжен расположенными на боковых стенках по нормали к склону долины водотока выпусками. Последний по течению потока выпуск выполнен треугольным в поперечном сечении (рисунок 6.5).



1 – плотина; 2 – головной водосливной участок; 3 – отводящий канал; 4 – концевой участок с выпусками; 5 – последний выпуск (треугольного сечения); 6 – дно отводящего канала; 7 – береговой склон долины водотока (ручья) в нижнем бьефе

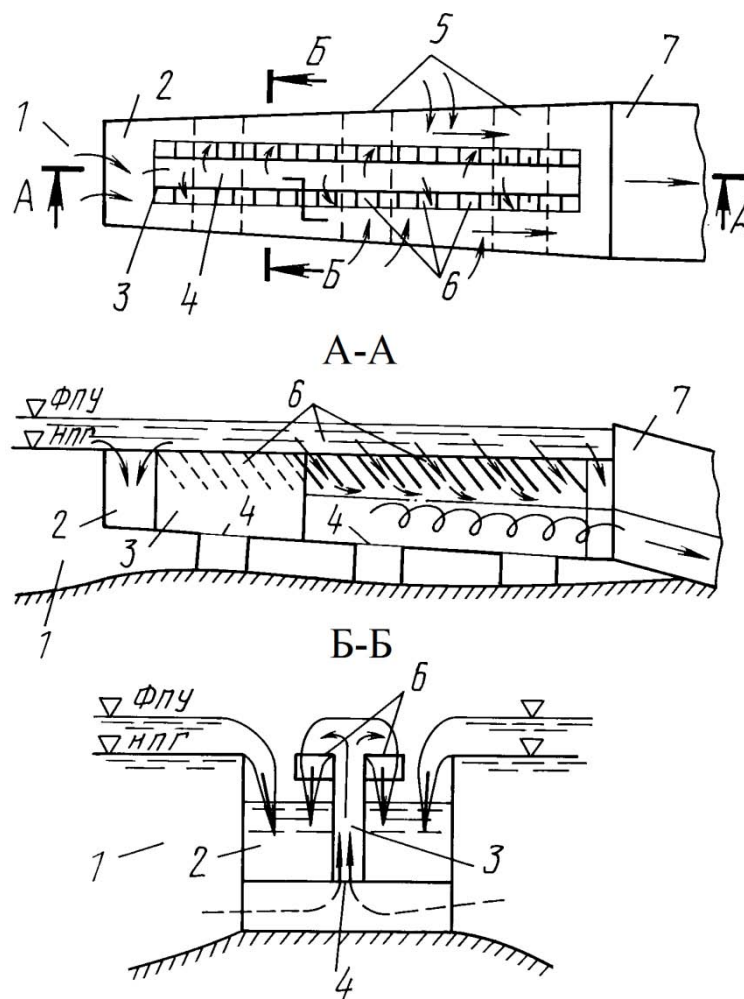
Рисунок 6.5 – Водосброс гидротехнического сооружения

Общий фронт выпусков определяется из условия распределения расчетного расхода потока на склоне с допустимой неразмывающей для растительного покрова склона долины скоростью. Водосброс позволяет обеспечить достаточно надежную защиту от паводковых вод с минимальным ущербом для ГТС и окружающей среды при снижении затрат на возведение ГТС, ограничивая их только затратами на земляные работы [131].

6.3.5 Траншейный резервный водосброс

Траншейный водосброс применяют для сброса паводковых вод из верхнего бьефа водохранилищного гидроузла и частичного опорожнения водохранилища [132]. Сущность конструкции заключается в том, что во внутреннем пространстве траншеи водосброса размещают дополнительные водоприемные оголовки. Наружная сторона дополнительных оголовков снабжена струенаправляющими элементами. Размещение в траншее дополнительных оголовков уменьшает глубину сливной призмы в водохранилище и улучшает гидравлический режим потока в траншее.

Траншейный водосброс может быть применен для сброса паводковых вод из верхнего бьефа водохранилищного гидроузла и частичного его опорожнения (рисунок 6.6).



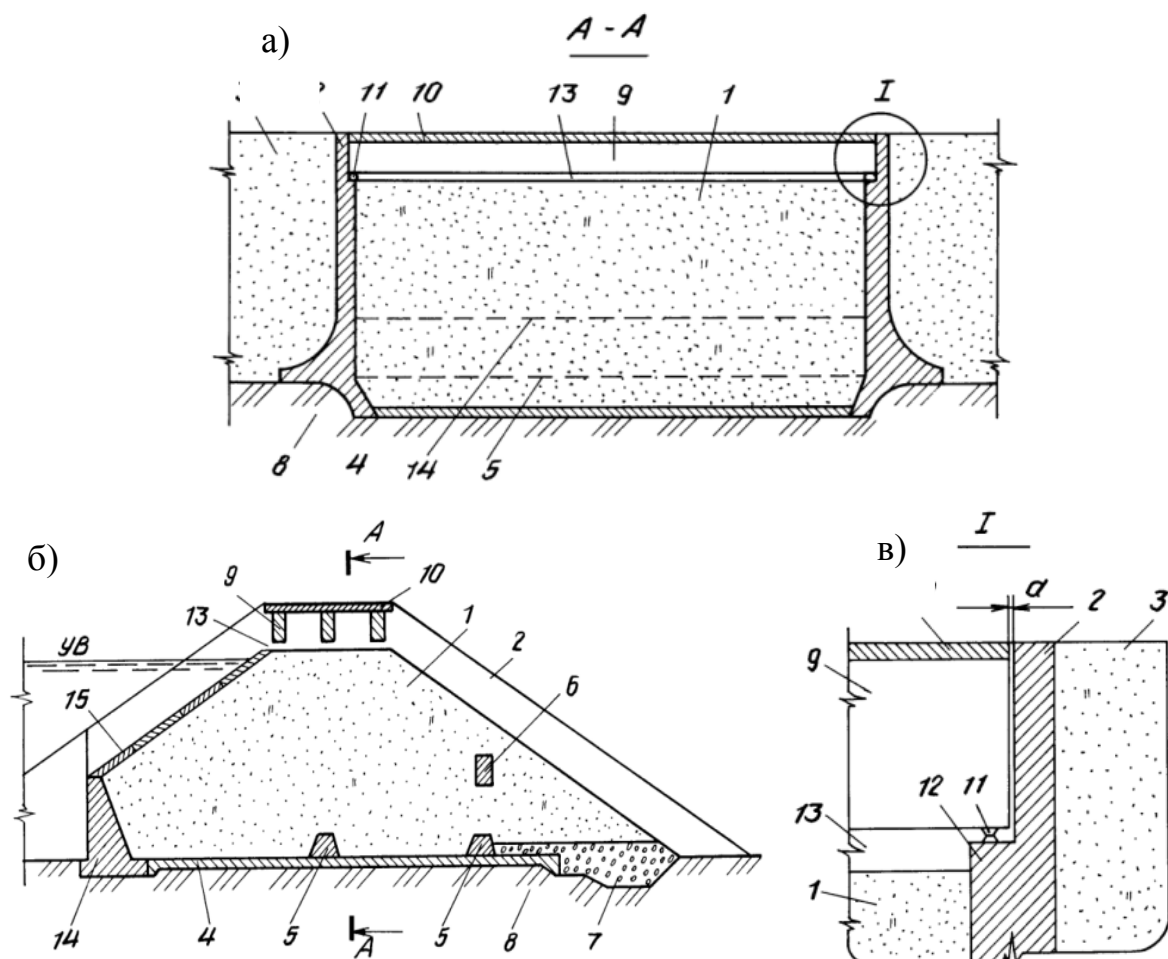
1 – водохранилище; 2 – траншейный водоприемный оголовок;
3 – дополнительный водоприемный оголовок; 4 – отверстия; 5 – водовод;
6 – струенаправляющие элементы; 7 – отводящий водовод

Рисунок 6.6 – Траншейный водосброс

6.3.6 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и водосливной стенкой

Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения [133] может быть использован в качестве вспомогательного водосброса для пропуска паводков редкой повторяемости.

Резервный водосброс (рисунок 6.7) включает размываемую грунтовую вставку, бетонные устои, отделяющие вставку от основной плотины, водобой, состоящий из плиты, стенок, балки и концевого участка, и балочный мост, состоящий из бетонных балок, проезжей части и подвижных опорных частей. В устоях выполнены уступы, на которых расположены подвижные опорные части балочного моста так, что торцы мостовых балок в летнее время уперты в устои в результате температурного удлинения балок. Водобойные стенки и балки выполнены по длине сплошными и размещены в теле вставки для распираания устоев. Гребень вставки расположен ниже гребня основной плотины, а нижняя часть балок расположена над гребнем вставки с образованием между ними зазора.



а – вертикальный разрез резервного водосброса;

б – горизонтальный разрез размываемой вставки; в – узел I

1 – размываемая грунтовая вставка; 2 – бетонные устои; 3 – грунтовое подпорное сооружение; 4 – плита водобоя; 5 – стенки водобоя; 6 – балки водобоя; 7 – концевой участок водобоя в виде заполненного камнем ковша; 8 – основание концевой участка водобоя; 9 – балочный мост; 10 – проезжая часть; 11 – подвижные опорные части балочного моста; 12 – уступы в бетонных устоях; 13 – зазор между балочным мостом и гребнем размываемой вставки; 14 – водосливная стенка; 15 – плиты на верховом откосе размываемой вставки

Рисунок 6.7 – Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения

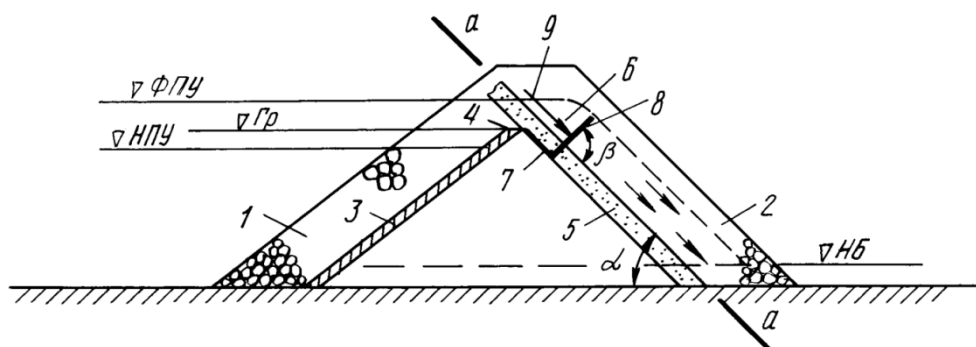
Технический результат от использования резервного сооружения заключается в снижении материалоемкости водосброса при одновременном упрощении эксплуатации подпорного сооружения.

Недостатком данной конструкции является то, что железобетонные плиты на верхом откосе размываемой вставки будут препятствовать полному размыву грунта, а следовательно, данное сооружение не сможет обеспечить необходимый пропуск паводковых вод.

6.3.7 Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса

Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса (рисунок 6.8) включает верховую и низовую призмы с откосами, комбинированное противифльтрационное

устройство, содержащее наклонную в сторону нижнего бьефа вставку из материала с коэффициентом трения, отличным от коэффициента трения грунта низовой призмы [134].



- 1 – верховая призма плотины; 2 – низовая призма плотины; 3 – верховая грань противифльтрационного устройства в виде экрана; 4 – гребень верховой грани; 5 – наклонная вставка; 6 – траншея; 7 – верховая стенка траншеи; 8 – низовая стенка траншеи; 9 – сила гидростатического давления

Рисунок 6.8 – Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса

На рисунке 6.8 показана плоскость $a-a$, проходящая через верховую грань наклонной вставки и образующая угол α с дном водосброса, пунктиром обозначена кривая депрессии в низовой призме и стрелками направление действия фильтрационных сил, а также отметка форсированного подпорного уровня (∇ ФПУ), отметка нормального подпорного уровня (∇ НПУ) и отметка гребня (∇ Гр) противифльтрационного устройства и угол β между низовой стенкой и наклонной вставкой. Наклонная в сторону нижнего бьефа вставка с коэффициентом трения, отличным от коэффициента трения грунта низовой призмы, имеет верхнюю грань $a-a$, которая наклонена к дну водосброса под углом α больше угла внутреннего трения материала наклонного слоя, что обеспечивает сдвиг низовой призмы.

Под действием силы гидростатического давления воды на низовую стенку траншеи, собственного веса низовой призмы, фильтрационных сил и сил взвешивания грунта водой в низовой призме, когда уровень воды в водохранилище превысит отметку конца низовой стенки траншеи и достигнет отметки ФПУ, произойдет сдвиг (оползание) низовой призмы по наклонной вставке и обрушение гребня плотины, т. е. размыв плотины переливающимся потоком воды и включение в работу резервного водосброса.

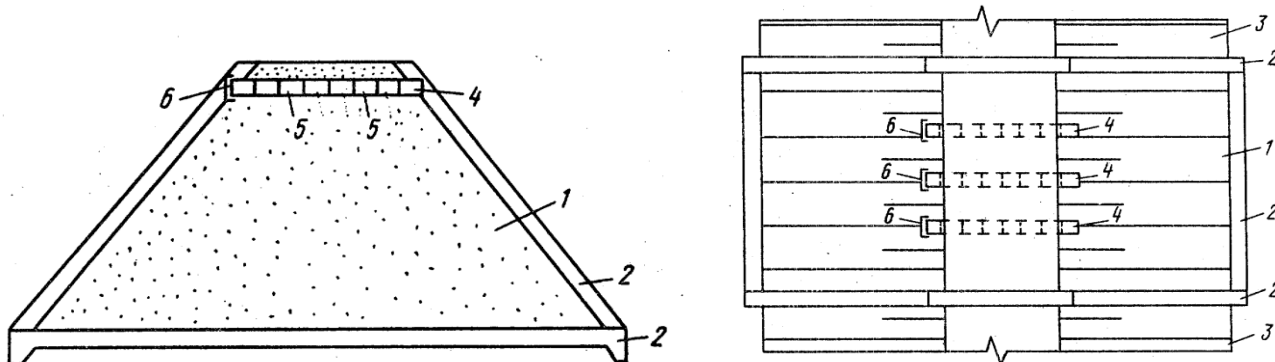
Недостатком является то, что эффективность резервного водосброса будет зависеть от оползания низовой призмы по наклонной вставке из песка или синтетической пленки. Однако сдвиг низовой призмы будет происходить под действием гидростатического давления и фильтрационных сил в пределах низовой призмы.

Поскольку движение фильтрационного потока в грунтовом массиве происходит очень медленно, а силы трения по поверхности сдвига снижаются незначительно, то оползание низовой призмы будет происходить в течение длительного периода. В результате обрушение гребня плотины также будет осуществляться замедленно, что в конечном итоге снижает эффективность размыва грунтовой плотины резервного водосброса.

Кроме того, противифльтрационное устройство в виде экрана будет препятствовать размыву грунтовой плотины резервного водосброса, в результате чего пропускная способность уменьшится, что в свою очередь снизит эффективность, а следовательно, и безопасность сооружения.

6.3.8 Резервный водосброс с размываемой грунтовой пробкой

Водосброс, включающий грунтовую размываемую пробку в бетонной одежде [135], повышает эффективность работы путем интенсификации размыва пробки, где в гребне последней размещены составные водоводы, выполненные из отдельных свободно примыкающих друг к другу трубчатых элементов, при этом водоводы со стороны верхнего бьефа снабжены заслонками (рисунок 6.9).



1 – грунтовая пробка; 2 – бетонная одежда водосброса; 3 – плотина; 4 – водоводы;
5 – трубчатый элемент; 6 – заслонки водоводов

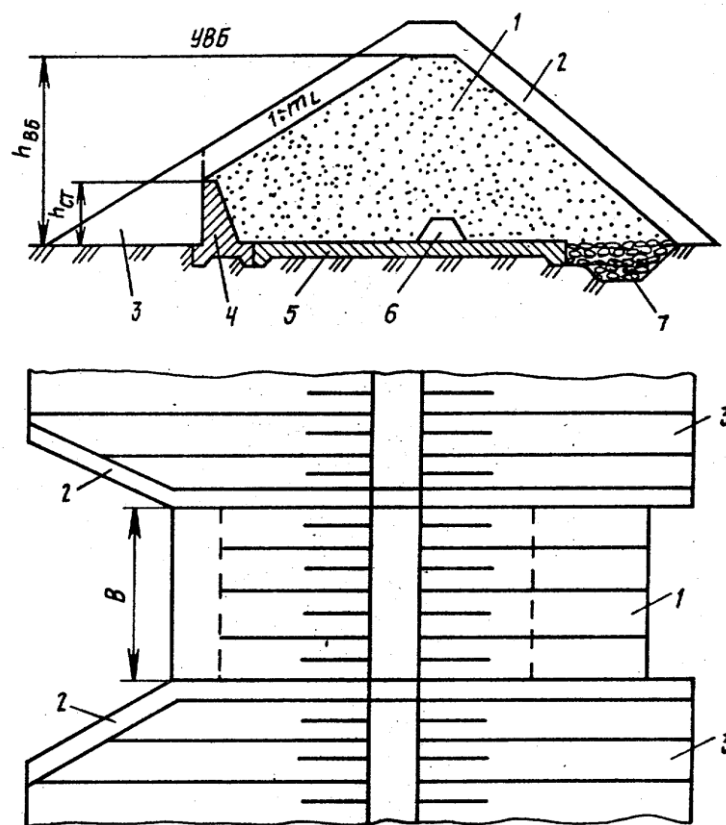
Рисунок 6.9 – Водосброс с размываемой грунтовой пробкой

Недостатком данной конструкции является то, что при размыве грунтовой пробки, водоводы не закреплены к водосбросному сооружению, а значит во время размыва пробки водоводы смоят в нижний бьеф, что в свою очередь будет означать засорение русла реки. В случае если водоводы останутся в месте пропуска паводков, то будут затруднен пропуск паводковых вод в нижний бьеф, а также возможно повреждение ими бетонной одежды водосброса.

При пропуске паводка размыв происходит до самого дна водосбросного сооружения, и соответственно плотины, что в свою очередь означает сброс большого количества воды на нижележащие территории, которое может привести к затоплению или подтоплению объектов экономики. В случае полного опорожнения водоема водопользователи останутся без воды.

6.3.9 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и бетонной водосливной стенкой

Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения (рисунок 6.10) включает в себя устои и флютбет из бетона, расположенную между ними грунтовую размываемую вставку, выполненную в виде плотины высотой, меньшей высоты подпорного сооружения [136]. Данная конструкция может быть использована в качестве вспомогательного водосброса для пропуска паводков редкой повторяемости. В условиях, когда пропуск паводка осуществляется через основной водосброс, резервный водосброс работает как участок глухой плотины. При паводке редкой повторяемости, когда пропускная способность основного водосброса становится недостаточной, происходит перелив воды через грунтовую вставку, так как ее высота меньше высоты плотины, то вставка разрушается до бетонной плиты и происходит сброс воды через водосливную стенку, и водохранилище срабатывается до ее гребня, а значит, сохраняется часть объема водохранилища.



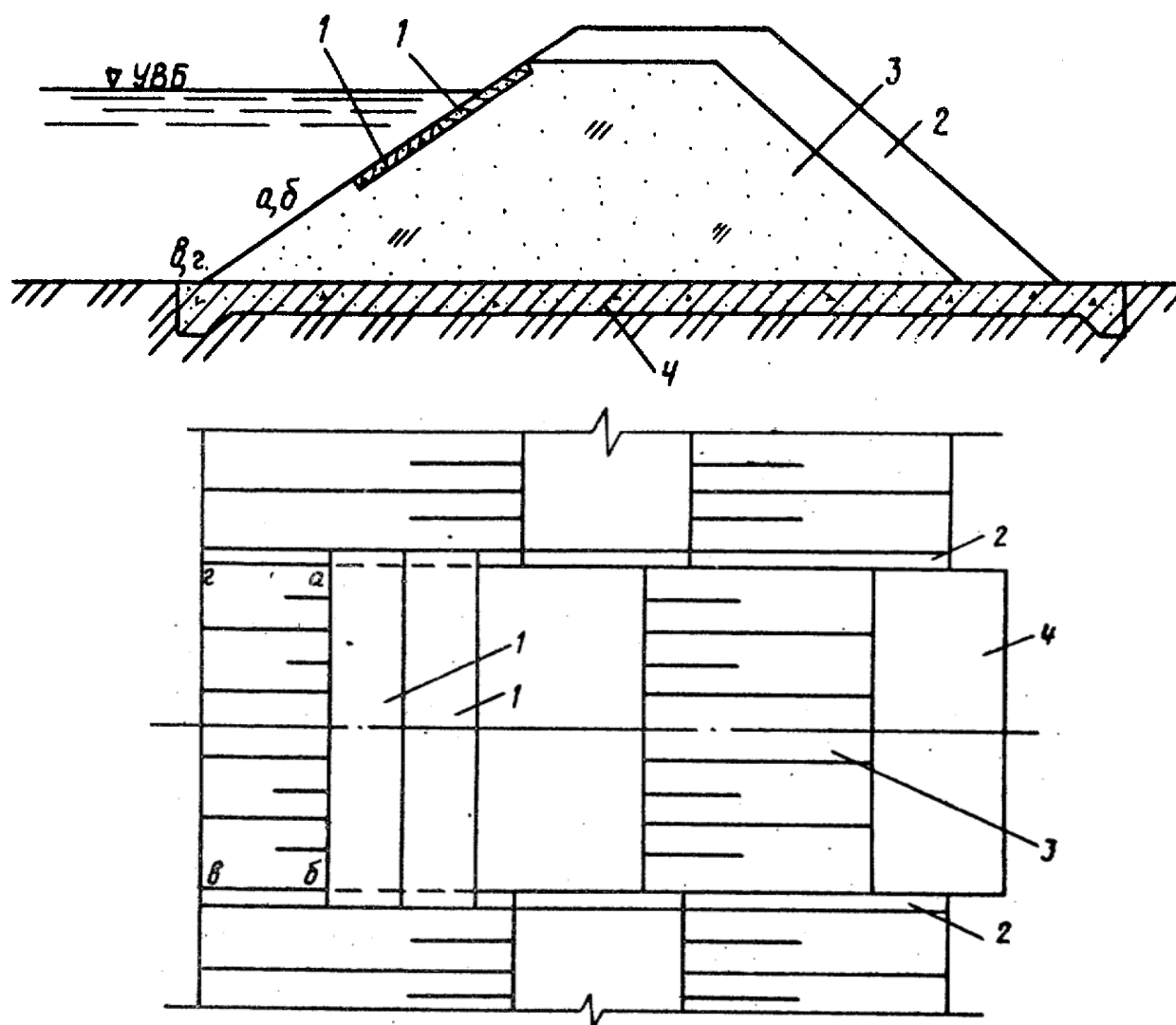
1 – грунтовая размываемая вставка; 2 – устои; 3 – грунтовое подпорное сооружение;
4 – водосливная стенка; 5 – бетонная плита; 6 – гасители энергии водного потока;
7 – ковш

Рисунок 6.10 – Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой и бетонной водосливной стенкой

Недостатком вышеприведенного изобретения является то, что требуется достаточно длительное время на возведение резервного водосброса из-за устройства основных элементов – устоев и флютбета из бетона и сложности выполнения грунтовой вставки, что увеличивает стоимость строительства резервного водосброса.

6.3.10 Резервный водосброс с размываемой грунтовой вставкой на флютбете

Наиболее простая конструкция резервного водосброса с размываемой вставкой [137] включает размываемую грунтовую вставку в виде секции грунтовой плотины с отметкой гребня ниже, чем у плотины. Грунтовая вставка уложена на бетонный флютбет между бетонными устоями, на которые опирается железобетонная плита, уложенная на верховой откос в зоне волнового воздействия. При большом паводке, когда пропускная способность основного водосброса становится недостаточной, уровень воды в верхнем бьефе повышается, происходит перелив через грунтовую вставку и ее разрушение до флютбета и между бетонными устоями. Часть избыточного расхода сбрасывается через верхнюю кромку плиты, а часть через отверстие $a-b-v-z$ под бетонной плитой после размыва грунтовой вставки. По окончании паводка грунтовая вставка восстанавливается до первоначальных размеров. Использование резервного водосброса подобного типа позволит проектировать основные водосбросы с меньшей пропускной способностью (рисунок 6.11).



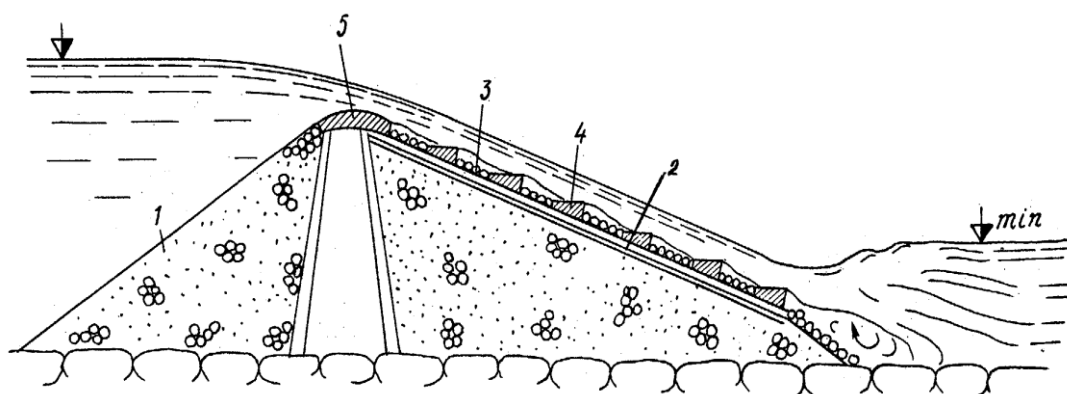
1 – плиты; 2 – бетонные устои; 3 – грунтовая вставка; 4 – бетонный флютбет

Рисунок 6.11 – Водосброс с меньшей пропускной способностью

Недостатком технических решений по устройству резервного водосброса с размываемой вставкой является то, что использование для них бетонных (флютбета и устоев) и шпунтовых элементов (водосливной стенки) требует проведения достаточно сложных и дорогостоящих бетонных и шпунтовых работ. Кроме того, бетонные конструкции водосброса представляют собой элементы, по контуру которых возможно образование неплотностей и пустот, что приведет к снижению надежности работы грунтовой плотины и в целом гидроузла.

6.3.11 Водосливная грунтовая плотина с плитами клиновидной формы на низовом откосе

Водосливная грунтовая плотина [138] включает защитное крепление откосов, состоящее из плит клиновидной формы, уложенных с возрастанием толщины вниз по откосу (рисунок 6.12).



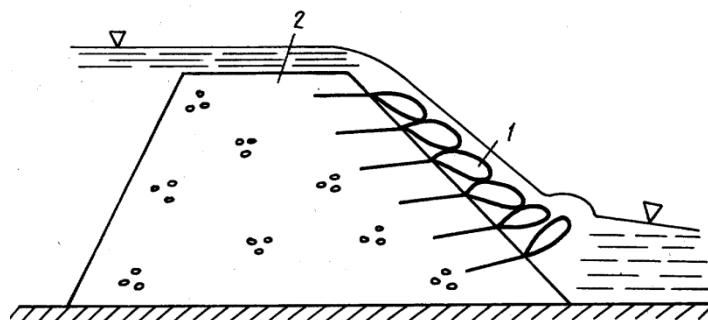
1 – водосливная грунтовая плотина; 2 – водопроницаемая одежда; 3 – камни;
4 – плиты клиновидной формы; 5 – гребень водосливной плотины

Рисунок 6.12 – Водосливная грунтовая плотина с плитами клиновидной формы на низовом откосе

Недостатком данного технического решения является возможное оползание железобетонной конструкции вследствие просадки и пучения грунта, малая деформативность, сложность конструкции и высокая стоимость водосброса в целом.

6.3.12 Водосливная грунтовая плотина с надувными водонепроницаемыми оболочками на низовом откосе

Гидротехническое сооружение служит для повышения надежности работы за счет снижения динамического воздействия на откос сооружения от переливающегося потока, состоящее из поярусно расположенных полос пленочного покрытия, образующего замкнутые надувные непроницаемые оболочки, разделенные на отсеки (рисунок 6.13) [139].



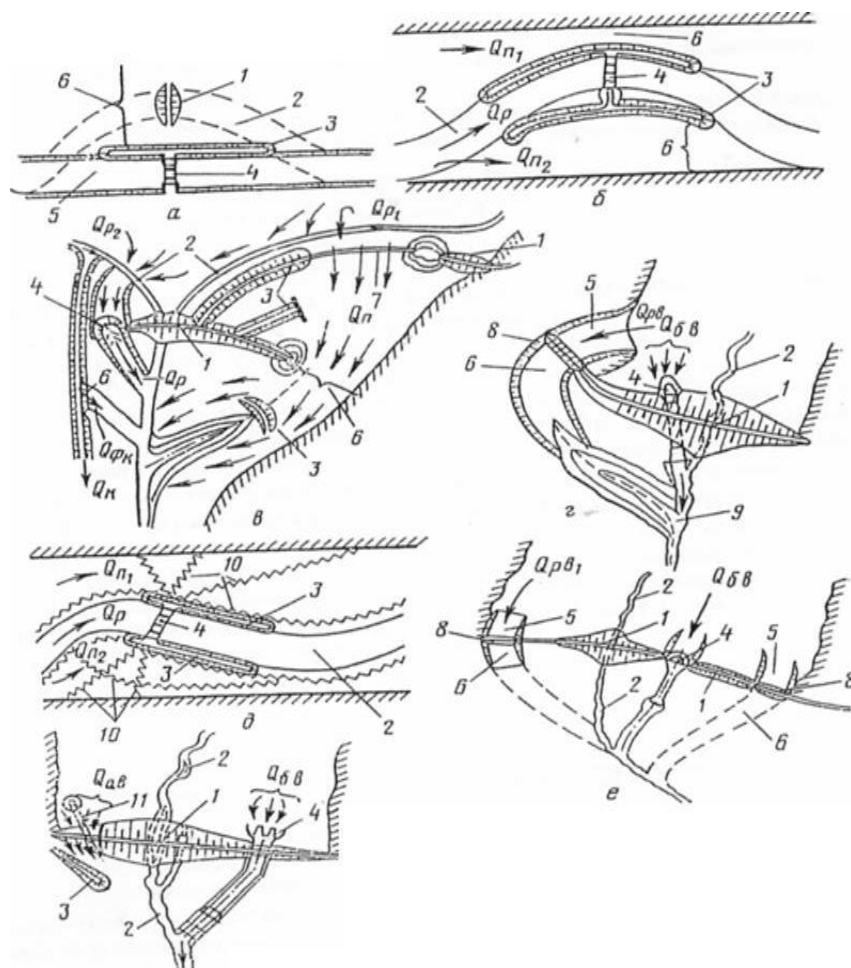
1 – надувные водонепроницаемые оболочки; 2 – плотина

Рисунок 6.13 – Водосливная грунтовая плотина с надувными водонепроницаемыми оболочками на низовом откосе

Недостатком данного решения является то, что при чрезвычайных паводках, превышающих расчетный расход, полосы пленочного покрытия могут быть вымыты открытым потоком воды или под действием фильтрационного потока через тело плотины. При длительной эксплуатации надувные непроницаемые оболочки могут сдуться при повреждении или износе под действием собственного трения друг о друга, что снизит безопасность конструкции. Другим недостатком конструкции является то, что сам гребень плотины остается незащищенным, вследствие чего при переливе потока будет происходить его размыв и разрушение всей плотины.

6.4 Компоновка речных гидроузлов с резервными водосбросами

При расположении резервного водосброса в русле или в спрямляющем излучину канале его устраивают по типу низкопороговой водосливной плотины с широким порогом и поверхностными водосливными отверстиями, перекрываемыми плоскими затворами. Основные схемы компоновки гидроузлов с различными типами резервных водосбросов приведены на рисунке 6.14.



а – с односторонней поймой-водосбросом и русловым бетонным водосбросом;
 б – с двухсторонним пойменным резервным водосбросом и русловым бетонным водосбросом;
 в – с глухой грунтовой плотиной на участке слияния двух рек, береговым бетонным и пойменным резервным водосбросами;
 г – с глухой грунтовой плотиной, трубчатый водосброс в ее теле и резервным береговым водосбросом с размываемой перемычкой;
 д – с одно-, двухсторонним пойменным резервным водосбросом, имеющим регуляционные лесопосадки, и русловым бетонным водосбросом;
 е – с глухой русловой грунтовой плотиной, бетонным и двумя резервными водосбросами с размываемыми перемычками;
 1 – глухая плотина; 2 – основное русло реки; 3 – регуляционные дамбы; 4 – основной бетонный водосброс; 5 – подводящий канал; 6 – резервный водосброс; 7 – дорога-порог резервного водосброса; 8 – размываемая перемычка резервного водосброса; 9 – магистральный канал; 10 – лесополосы; 11 – устройство для ускорения размыва перемычки; Q_p , Q_{bv} , Q_{pv} , Q_n – расходы соответственно реки, основного бетонного водосброса, резервного водосброса и пропускаемый по пойме

Рисунок 6.14 – Компоновка речных гидроузлов с резервными водосбросами

На крупных гидроузлах с грунтовыми плотинами для пропуска паводковых расходов обычно применяют водосбросы большой пропускной способности, которые рассчитывают в зависимости от класса сооружения на максимальные расходы редкой повторяемости с ежегодной вероятностью превышения 1,0–0,01 % [1]. Так, для грунтовых плотин IV класса повторяемость паводковых расходов составляет один раз в 100 лет, а для плотин I класса – один раз в 10000 лет.

В связи с этим стоимость таких водосбросов будет весьма высокой, при этом за весь период существования водосброс ни разу не будет работать на полную мощность [127, 140].

6.5 Применение резервных водосбросов в грунтовых плотинах для пропуска паводковых расходов

Как известно, на грунтовых плотинах, которые относятся к глухим, т. е. не пропускающим перелива через гребень, для пропуска паводковых вод предусматриваются открытые или закрытые водосбросные сооружения в виде открытого обводного тракта с сопрягающим сооружением (трубчатые, туннельные, шахтные, сифонные и другие).

Однако применение одного водосбросного сооружения в составе гидроузла в ряде случаев оказывается недостаточным, а следовательно, целесообразно, использовать дополнительные или резервные водосбросы.

Для снижения стоимости гидроузла основной водосброс проектируют на меньшие расчетные максимальные расходы, чем это соответствует действующим нормам в зависимости от класса плотины [2]. Например, для грунтовых плотин II класса вместо поверочного максимального расхода 0,1 % обеспеченности учитывают расход основного расчетного случая 1,0 % обеспеченности, а для сооружений III класса – расход 3,0 % обеспеченности, для сооружений IV класса – расход 5,0 % обеспеченности.

В результате снижения величины расчетного максимального паводкового расхода существенно уменьшаются размеры основного водосброса, а следовательно, уменьшается его стоимость.

В тоже время резервные водосбросы гидроузла проектируют на большие расходы, чем основной водосброс, которые должны соответствовать классу плотины (для II класса – 0,1 %, для III класса – 0,5 % и для IV класса – 1,0 % обеспеченности).

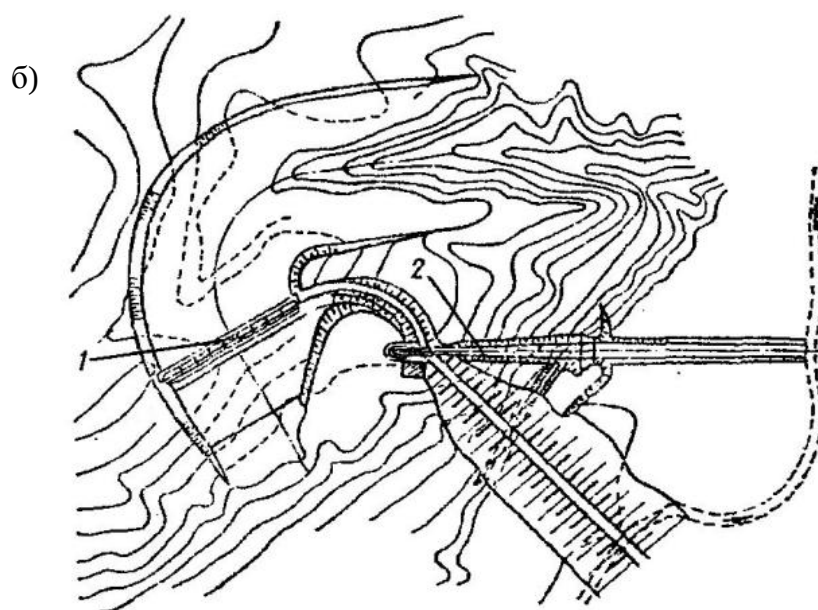
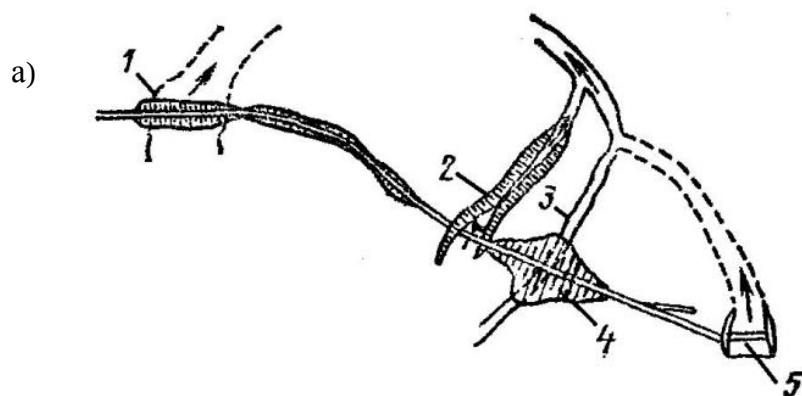
Резервные водосбросы стремятся делать простыми и дешевыми. При их работе допускаются повреждения самого водосброса и размывы русла и берегов, что, тем не менее, не должно снизить надежность основных сооружений [81].

Часто в дополнение к водосбросу обычной конструкции используют возможности пропуска части максимального расхода по естественному береговому склону с устройством облегченного крепления или без него [81].

В состав резервного водосброса может быть включена размываемая вставка [81], которая представляет собой отсыпанную на бетонный порог часть грунтовой плотины, размываемую при подъеме уровня верхнего бьефа до некоторой критической отметки (например, отметки ФПУ или несколько ниже).

Рассмотрим теперь применение резервных водосбросов на примере гидроузлов Эппалак в Австралии и Бокс бьют в США (рисунок 6.15) [140].

Основной водосброс гидроузла Эппалак выполнен в виде открытого берегового быстотока с водобойным колодцем, который рассчитан на расход повторяемостью 1 раз в 100 лет (рисунок 6.15а).



а – гидроузел Эппалок (Австралия); б – гидроузел Бокс Бьют (США);
1, 5 – резервные водосбросы (второй с размываемой дамбой («плавающая вставка»)
и (первый) с выемкой в скале; 2 – основной водосброс; 3 – река;
4 – башенный водоспуск

Рисунок 6.15 – Гидроузлы и вспомогательные водосбросы

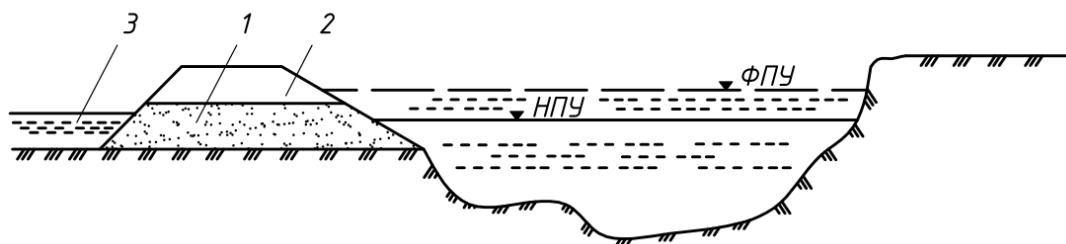
На этом гидроузле применены два резервных водосброса. Первый водосброс имеет отметку гребня, на 1,8 м превышающую отметку НПУ, что соответствует прохождению паводкового расхода повторяемостью 1 раз в 1000 лет ($P = 0,1 \%$). Длина водосливного фронта водосброса составляет 198 м, что обеспечивает наибольшие удельные расходы и позволяет отказаться от крепления отводящего канала. Второй водосброс имеет водосливной фронт длиной 366 м и представляет собой каменную дамбу с гребнем на отметке, превышающей отметку НПУ на 3,7 м, что соответствует условиям прохождения паводкового расхода повторяемостью 1 раз в 10000 лет ($P = 0,01 \%$). Применение такого технического решения позволило вдвое снизить стоимость водосбросных сооружений.

Компоновка основных сооружений гидроузла Бокс Бьют включает также основной и резервный водосбросы (рисунок 6.15б). Основной бетонный водосброс вы-

полнен ковшовым. Резервный водосброс представляет смываемую перемычку на наклонном бетонном флютбете. Длина перемычки – 135 м, она состоит из 9 секций шириной по 15 м. Каждая секция ограничена с двух сторон бетонными стенками, которые на 1,5 м выше размываемых перемычек.

Гребни перемычек расположены на различной высоте для последовательного их смыва по мере нарастания расхода. Отметки перемычек нарастают от центра к бортам канала с шагом 0,5 м.

На низконапорных гидроузлах пропуск паводка редкой повторяемости может частично осуществляться в обход плотины по естественной пойме (рисунок 6.16) [81].



1 – водосброс с низким порогом; 2 – сопрягающая дамба; 3 – пойма

Рисунок 6.16 – Гидроузел с пропуском части расхода в паводок через пойму

Основные принципы такого технического решения:

- пропускная способность основного (чаще всего бетонного) водосброса должна обеспечивать к моменту выхода паводковых вод на пойму наполнение нижнего бьефа гидроузла до отметок, создающих возможность их прохождения по пойме без существенного перепада;

- зона сопряжения бьефов в месте слияния пойменного и руслового расходов должны быть тщательно рассчитана на размыв и в случае необходимости закреплена (например, каменной наброской). Прогноз размыва выполняют и по наиболее размывоопасным направлениям на пойме. По результатам этого расчета назначают местоположение регуляционных сооружений и устраивают необходимое крепление;

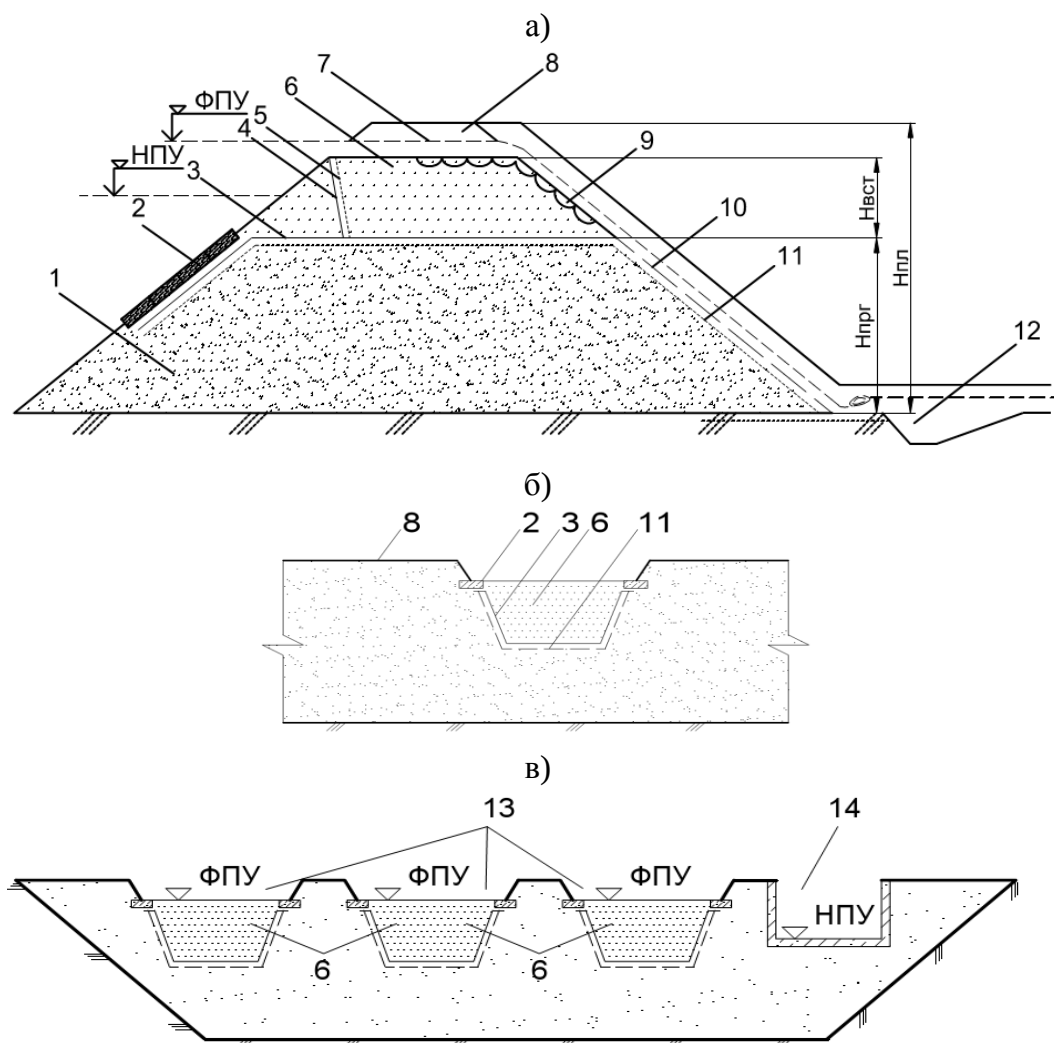
- окончательную компоновку гидроузла принимают по результатам исследований на размываемых моделях, в том числе воздушно-напорных.

Особое внимание при таком техническом решении уделяется зоне сопряжения бьефов в месте слияния пойменного и руслового потоков. Для исключения больших размывов эта зона и часть поймы укрепляется каменной наброской. Для защиты плотины от подмыва может устраиваться продольная дамба.

Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайловым и К. В. Мороговым дается обоснование для применения быстровозводимого резервного водосброса и резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой на гидроузлах мелиоративного назначения (см. рисунок 6.1) [96, 97].

Отметка порога искусственного прорана устанавливается выше отметки НПУ в водохранилище, но ниже максимальной расчетной отметки ФПУ.

Ю. М. Косиченко и Е. Д. Михайловым разработана новая конструкция резервного водосброса с размываемой вставкой (рисунок 6.17а) [105], которая включает водосливной порог с защитным покрытием из полимерной геомембраны [99, 100], закрепленным на откосе со стороны верхнего бьефа железобетонными плитами, сверху которого устроена грунтовая вставка с водосливным экраном из геомембраны. С бортов грунтовой вставки защитное покрытие также закрепляется поверху бетонными блоками или специальными анкерами.



- а – продольное сечение резервного водосброса; б – поперечное сечение резервного водосброса с одной секцией; в – поперечное сечение грунтовой плотины с тремя секциями резервного водосброса и основным береговым водосбросом;
- 1 – порог грунтовой плотины под размываемой вставкой; 2 – крепление железобетонными плитами защитного покрытия; 3 – защитное покрытие из полимерной геомембраны; 4 – водосливной экран из геомембраны;
- 5 – сильнофильтрующий элемент из двух или трех слоев геотекстиля; 6 – размываемая грунтовая вставка; 7 – водопроводящая часть (тракт) резервного водосброса;
- 8 – гребень грунтового подпорного сооружения; 9 – области размыва на низовой грани размываемой вставки; 10 – перфорированная часть защитного покрытия из геомембраны; 11 – геотекстиль («Дорнит») в два или три слоя по типу обратного фильтра; 12 – ковш с каменной наброской; 13 – секции резервного водосброса;
- 14 – основной водосброс (береговой)

Рисунок 6.17 – Расчетная схема резервного водосброса в период нормальной работы

Для пропуска паводкового расхода может использоваться одна секция резервного водосброса (рисунок 6.17б) или в случае необходимости при пропуске значительных расходов целесообразно применять несколько секций (рисунок 6.17в).

Работает резервный водосброс с размываемой вставкой следующим образом: при подъеме уровня воды в верхнем бьефе водоема и достижении ФПУ поток переливается через верх водосливного экрана из геомембраны и грунтовой вставки и посту-

пает по сильнофильтрующему элементу из двух или трех слоев геотекстиля («Дорнита») в нижнюю часть грунтовой вставки. После размыва вставки из местного грунта [141, 142] водосливной экран под действием гидродинамической силы потока укладывается на защитное покрытие из полимерной геомембраны в ложе водопроводящей части, полностью освобождая все сечение грунтовой призмы. Геомембрана укладывается по всему поперечному сечению резервного водосброса, а также со стороны верхнего и нижнего бьефа, после чего все части полотна защитного покрытия соединяют между собой с помощью сварки. Со стороны верхнего бьефа укладка геомембраны начинается от подошвы подпорного сооружения и до порога резервного водосброса, а со стороны нижнего бьефа от порога и до начала отводящего канала. Применение покрытия из геомембраны для защиты водосливного порога и водопроводящей части полностью исключает их размыв, а следовательно, и грунтовой плотины. Фильтрационный поток отводится через перфорированную часть защитного покрытия из геомембраны, расположенную со стороны нижнего бьефа у подошвы плотины.

Такие резервные водосбросы наиболее целесообразно применять в дополнение к основным при эксплуатации малых водохранилищ, если по прогнозу предполагается паводок, превышающий расчетную обеспеченность.

Многие исследования во всем мире [47] свидетельствуют о том, что надежность и безопасность грунтовых плотин и гидроузлов в целом в значительной степени зависят от работы водосбросных сооружений.

Наибольшее число повреждений грунтовых плотин (около 44 %) связано с водосбросами, а наиболее распространенной причиной их аварий (около 35 % случаев) является недостаточная пропускная способность [88].

На основании обобщения данных об отказах (разрушениях) грунтовых плотин малых водохранилищ нами было установлено [68], что их аварии происходят по причине водосбросного сооружения в 30 % случаев с риском вероятности аварий $2,3 \cdot 10^{-3}$ раз в год.

Таким образом, применение резервных водосбросов в составе речных гидроузлов комплексного и мелиоративного назначения позволит повысить их эксплуатационную надежность и безопасность. Использование одного или двух резервных водосбросов в дополнение к основному водосбросу с точки зрения теории надежности можно рассматривать как систему с резервированием, замещением с ненагруженным резервом. При этом система с ненагруженным резервом дает наибольшую надежность по сравнению с нагруженным и облегченным резервным элементом.

В связи с этим представляет значительный интерес исследования таких систем резервирования применительно к комплексу «основной водосброс – резервные водосбросы».

Следует отметить, что вопросы обеспечения безопасности ГТС мелиоративного назначения были рассмотрены в публикациях В. Н. Щедрина, Ю. М. Косиченко, А. В. Каманова [143].

Приведем некоторые общие требования и рекомендации по применению резервных водосбросов в составе гидроузлов с грунтовыми плотинами:

- резервные водосбросы в составе гидроузлов должны применяться в дополнение к основным водосбросам;
- при проектировании резервных водосбросов в составе гидроузлов основные водосбросы целесообразно рассчитывать на максимальные паводочные расходы более частой повторяемости, как для основного расчетного случая этого же класса сооружений;
- резервные водосбросы должны удовлетворять таким основным требованиям, как простота конструкции и невысокая стоимость;
- расчетные расходы резервных водосбросов в составе проектов гидроузлов

должны приниматься как для паводков редкой повторяемости, соответствующей паводочному случаю данного класса грунтовой плотины;

- для повышения эффективности работы резервных водосбросов в их составе могут устраиваться грунтовые размываемые вставки с отметкой гребня на отметке ФПУ или несколько ниже;

- для низконапорных гидроузлов в качестве резервных водосбросов могут использоваться пойменные участки русел рек;

- при эксплуатации низконапорных гидроузлов для пропуска паводочных расходов, превышающих расчетный заданной обеспеченности должны применяться быстровозводимые резервные водосбросы с непродолжительным временем установки;

- для аварийных водосбросов могут применяться мобильные быстровозводимые водосбросы из готовых сборных элементов с наикратчайшим временем их монтажа.

6.6 Методика гидравлических расчетов новых конструкций резервных водосбросов

6.6.1 Методика расчета резервного водосброса с размываемой вставкой

В составе гидроузлов обычно предусматривают водопропускные сооружения, подразделяемые на водосбросы и водовыпуски.

Водосбросы предназначены для пропуска в нижний бьеф паводковых расходов при заданных расчетных уровнях воды в верхнем бьефе, а также для пропуска льда и транзита влекомых наносов в НБ.

Резервный водосброс устраивают непосредственно в теле грунтовой плотины, расчетная схема которого приведена выше на рисунке 6.17а.

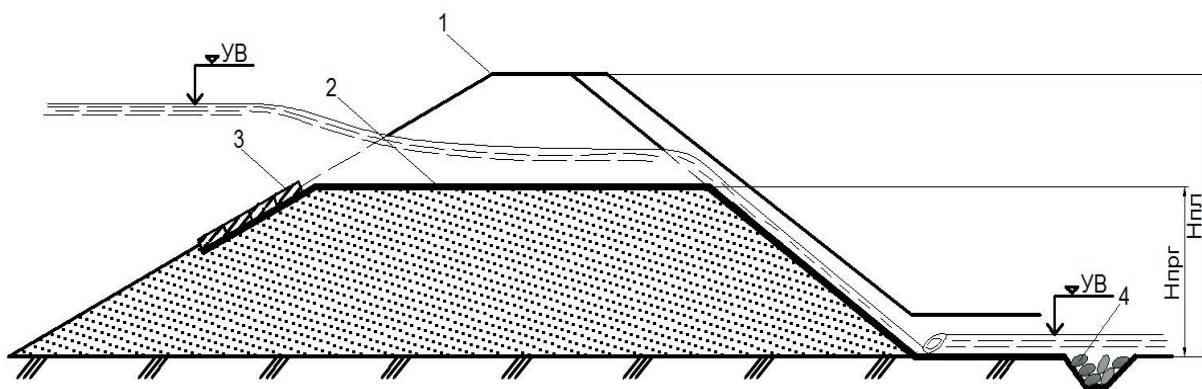
Водопроводящая часть водосброса, представленная на рисунке 6.17б, в, может состоять из одной или нескольких секций. По периметру сечения водопроводящего тракта раскладывается заранее изготовленное защитное покрытие – полимерная геомембрана [96].

Геомембрану укладывают вручную, соединяя отдельные части между собой с помощью сварки и закрепляя со стороны верхнего бьефа, на бровках одной или нескольких секций и в нижнем бьефе железобетонными плитами, а в начале отводящего канала выполняют крепление в виде каменной наброски [97]. На защитном покрытии в пределах водопроводящей части выполняется размываемая грунтовая вставка из грунта аналогично телу плотины, в которой размещается водосливной экран из геомембраны, прикрепленный к защитному покрытию путем сварки.

Большая часть паводка пропускается через основной водосброс (например, береговой), расположенный на отметке НПУ, а оставшаяся часть – через одну или несколько секций резервного водосброса при достижении отметки ФПУ в верхнем бьефе или ниже на 0,3–0,5 м.

В период прохождения максимального расхода с уровнем воды в верхнем бьефе на отметке ФПУ или ниже происходит перелив воды через гребень размываемой грунтовой вставки, ее интенсивный размыв до порога с защитной мембраной и постепенное снижение расхода и уровня воды до отметки порога, после чего размываемая вставка полностью восстанавливается.

Схема резервного водосброса в период пропуска максимального расхода представлена на рисунке 6.18.



1 – грунтовая плотина; 2 – защитное покрытие из полимерной геомембраны;
3 – крепление железобетонными плитами защитного покрытия; 4 – каменная наброска

Рисунок 6.18 – Схема резервного водосброса в период пропуска максимального расхода (после размыва вставки)

Резервные водосбросы стремятся делать простыми и дешевыми. При их работе допускаются повреждения самого водосброса, защитной облицовки из геомембраны [144] и размывы русла и берегов, что, тем не менее, не должно снизить надежность основных сооружений.

Эффективность сработки грунтовой вставки была убедительно доказана экспериментальными исследованиями в гидравлическом лотке с моделью грунтовой плотины А. М. Прудовским и К. Р. Пономарчук [126].

Для данной конструкции разработан метод расчета основных параметров резервного водосброса, включающий определение высоты размываемой вставки и высоты порога резервного водосброса на основе формулы расхода для водосливов, полученной из уравнения Д. Бернулли [104].

Высота размываемой вставки определяется гидравлическим расчетом [104] исходя из формулы пропускной способности водопропускной части резервного водосброса трапецеидального сечения после размыва грунтовой вставки, работающей по схеме водослива с широким порогом, с использованием следующего уравнения для N -го количества секций водосброса:

$$Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}} = m(b + m_0 H_{\text{вст}}) \sqrt{2g} H_{\text{вст}}^{3/2} N, \quad (6.1)$$

где $Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}}$ – расчетный расход (расход, пропускаемый через все секции резервного водосброса, равный разности максимального паводкового расхода редкой повторяемости ($Q_{0,5-1,0\%}$, м³/с) и расчетного расхода основного водосброса ($Q_{\text{осн.в}}$, м³/с), м³/с, определяемого по формуле (5.17) [128]:

$$Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}} = Q_{0,5-1,0\%} - Q_{\text{осн.в}}, \quad (6.2)$$

где m – коэффициент расхода для водослива с широким порогом;

b – ширина водопропускной части по дну трапецеидального сечения секции резервного водосброса, м;

m_0 – коэффициент заложения откосов трапецеидального сечения водопропускной части;

$H_{\text{вст}}$ – напор на пороге водопропускной части после размыва грунтовой вставки, принимаемый равным высоте размываемой вставки, м;

N – количество секций водосброса, шт.

Из вышеприведенного уравнения (6.1) авторами получена формула для расчета

высоты размываемой вставки:

$$H_{\text{вст}} = \left(\frac{Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}}}{m \cdot (b + m_0 \cdot H_{\text{вст}}) \cdot \sqrt{2g} \cdot N} \right)^{2/3}, \quad (6.3)$$

которая решается методом подбора в несколько приближений, где предварительно задаются шириной каждой секции, равной $b = 3 - 5$ м, и количеством секций N .

Высота порога резервного водосброса $H_{\text{прг}}$ рассчитывается как [104]:

$$H_{\text{прг}} = H_{\text{пл}} - H_{\text{вст}} - d, \quad (6.4)$$

где $H_{\text{прг}}$ – высота порога, м;

$H_{\text{пл}}$ – высота плотины до гребня, м;

d – превышение гребня плотины над верхом размываемой вставки или отметкой ФПУ, м.

С другой стороны, высота порога резервного водосброса определяется расчетом исходя из необходимого минимального объема воды в водохранилище, необходимого для водопользователей за период восстановления размываемой вставки, по уравнению [104]:

$$W_{\text{в}}^{\min} = \frac{1}{2} \cdot F_{\text{в}}^{\min} \cdot H_{\text{прг}}, \quad (6.5)$$

откуда:

$$H_{\text{прг}} = \frac{2 \cdot W_{\text{в}}^{\min}}{F_{\text{в}}^{\min}}, \quad (6.6)$$

где $W_{\text{в}}^{\min}$ – минимальный объем воды в водохранилище, м^3 , рассчитываемый как:

$$W_{\text{в}}^{\min} = W_{\text{вл}} + W_{\text{мо}}, \quad (6.7)$$

где $W_{\text{вл}}$ – объем воды в водохранилище, необходимый для водопользователей за период восстановления размываемой вставки, м^3 ;

$W_{\text{мо}}$ – мертвый объем водохранилища, м^3 ;

$F_{\text{в}}^{\min}$ – площадь водохранилища м^2 .

За окончательную высоту порога водосброса принимается наибольшее значение, полученное по гидравлическому расчету и с учетом требований водопользователей. При необходимости увеличивают количество секций и пересчитывают высоту вставки по гидравлическому расчету с тем, чтобы получить $H_{\text{прг}}$ близким между собой.

Рассмотрим пример расчета резервного водосброса с размываемой вставкой в теле плотины по разработанной нами методике с исходными данными: $Q_{\text{рез.в}}^{\text{общ}} = 700 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 0,35$; $b = 3,0 \text{ м}$; $m_0 = 2$; $H_{\text{пл}} = 15,0 \text{ м}$; $d = 2,0 \text{ м}$; $W_{\text{в}}^{\min} = 1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$; $F_{\text{в}}^{\min} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$. Требуется определить высоту размываемой вставки $H_{\text{вст}}$, количество секций резервного водосброса N и высоту порога резервного водосброса $H_{\text{прг}}$.

Определяем высоту размываемой вставки по формуле (6.1), предварительно задавая $b = 3,0 \text{ м}$ и количеством секций $N = 1$.

Расчет высоты размываемой вставки выполняем методом приближений. Предварительно задаемся $H_{\text{вст}}$ как $H_{\text{вст}} = (H_{\text{пл}} - d) / 2 = (15 - 2) / 2 = 6,5 \text{ м}$.

Определяем $H_{\text{вст}}$ в первом приближении по формуле (6.3):

$$H_{\text{вст.1}} = \left(\frac{700}{0,35 \cdot (3,0 + 2 \cdot 6,5) \cdot 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{2/3} = 9,37 \text{ м}.$$

Так как $H_{\text{вст.г}} = 9,37$ м значительно отличается от заданного значения $H_{\text{вст}} = 6,5$ м, то проводим расчет во втором приближении, задавая $H_{\text{вст}} = 7,5$ м и так далее.

Так как после трех приближений задаваемая и расчетная величина вставки близки между собой, то за искомое значение принимаем среднее между ними $H_{\text{вст}} = 8,18$ м.

Тогда высота порога по формуле (6.4) составит:

$$H_{\text{прг}} = H_{\text{пл}} - H_{\text{вст}} - d = 15 - 8,18 - 2,0 = 4,82 \text{ м.}$$

С другой стороны, высота порога резервного водосброса по условиям водопользования при $W_{\text{в}}^{\text{мин}} = 1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ и $F_{\text{в}}^{\text{мин}} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ по формуле (6.6) составит:

$$H_{\text{прг}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^5} = 4,76 \text{ м.}$$

Учитывая, что полученное значение высоты порога по гидравлическим условиям составило 4,82 м, а по условиям водопользования 4,76 м, т. е. являются близкими, то расчетные параметры резервного водосброса могут быть приняты равными: $H_{\text{вст}} = 8,18$ м, $H_{\text{прг}} = 4,82$ м, количество секций $N = 1$.

В случае если высота порога резервного водосброса по условиям водопользования по расчету будет значительно больше, чем по гидравлическим условиям, то тогда следует увеличивать количество секций и повторять расчет высоты размываемой вставки.

Например, при $W_{\text{в}}^{\text{мин}} = 2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ и $F_{\text{в}}^{\text{мин}} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ высота порога по формуле (6.6) равна $H_{\text{прг}} = 6,67$ м, а высота размываемой вставки по формуле (6.3) составит 6,08 м.

Исходя из вышеизложенного, следует увеличить количество секций резервного водосброса до $N = 2$.

Таким образом, высота размываемой вставки после трех приближений равна среднему значению между величинами $H_{\text{вст}}$ и $H_{\text{вст.г}}$ и составит 6,08 м.

Тогда высота порога по формуле (6.6) составит 6,92 м.

Полученная высота порога по гидравлическим условиям ($H_{\text{прг}} = 6,67$ м) несколько превышает значение по условиям водопользования ($H_{\text{прг}} = 6,92$ м), и поэтому в целях запаса водных ресурсов принимаем высоту порога 6,92 м.

Результаты расчетов параметров резервного водосброса с одной и двумя секциями приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Результаты расчетов параметров резервного водосброса с одной и двумя секциями

Количество секций	Приближение	Задаваемое значение $H_{\text{вст}}$, м	Расчетное значение высоты вставки $H_{\text{вст.г}}$, м	Высота порога водосброса $H_{\text{прг}}$, м
1	Первое	6,5	9,37	—
	Второе	7,5	8,66	—
	Третье	8,0	8,35	4,82
2	Первое	5,0	6,77	—
	Второе	5,5	6,44	—
	Третье	6,0	6,15	6,92

На основании рассмотренного примера авторами предлагается следующая последовательность расчета:

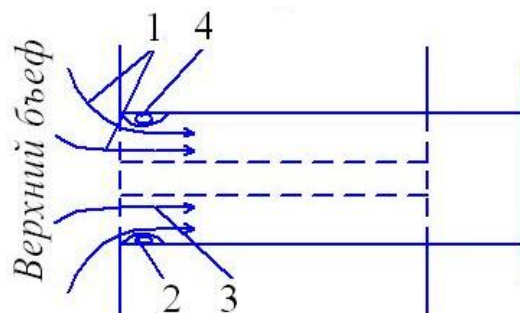
- предварительно задаемся шириной размываемой вставки по низу в пределах $b = 3\text{--}5$ м и количеством секций резервного водосброса равным $N = 1$;
- по формуле (6.3) методом последовательных приближений вычисляется высота размываемой вставки;
- за искомую величину высоты вставки по гидравлическим условиям применяют такое значение соответствующего приближения, при котором расчетное значение $H_{\text{вст.}}$ близко совпадает с заданным (с расхождением не более 5 %);
- вычисляется высота порога резервного водосброса из гидравлических условий по формуле (6.4);
- рассчитывается по формуле (6.7) высота порога водосброса из условий водопользования;
- при близких полученных значениях порога водосброса по гидравлическим условиям и условиям водопользования его принимают за окончательное;
- в случае, если высота порога водосброса по условиям водопользования значительно больше, чем по гидравлическим условиям, то увеличивают количество секций до $N = 2\text{--}3$ и все расчеты по определению высоты вставки $H_{\text{вст}}$ и высоты порога водосброса $H_{\text{прг}}$ повторяют путем последовательных приближений до получения близких значений $H_{\text{прг}}$ по гидравлическим условиям и условиям водопользования.

Таким образом, за окончательную высоту порога водосброса принимается наибольшее значение, полученное по гидравлическому расчету и с учетом требований водопользователей. В случае если высота порога водосброса по условиям водопользования значительно больше, чем по гидравлическим условиям, то увеличивают количество секций до $N_i = (N_{i+1} + 1) \dots (N_{i+1} + n)$ и все расчеты по определению высоты вставки $H_{\text{вст}}$ и высоты порога водосброса $H_{\text{прг}}$ повторяют путем последовательных приближений до получения близких значений $H_{\text{прг}}$ по гидравлическим условиям и условиям водопользования.

6.6.2 Методика расчета быстровозводимого резервного водосброса

Поскольку предлагается новая конструкция водосброса, важным вопросом является обоснование основных параметров входной части в виде искусственного прорана трапецидального сечения, расчет которого отличается от прямоугольного сечения [104]. Рассмотрим метод определения следующих параметров входной части: расход пропускаемый через проран, его ширину для условий работы по типу водослива с широким порогом или короткого канала. Остальные элементы водосброса – водопроводящий лоток и водобойная часть – рассчитываются по общеизвестным рекомендациям [104].

Прежде всего опишем физику явления истечения через входную часть водосброса в виде искусственного прорана трапецидального сечения. Так как ширина входной части по дну будет значительно меньше длины плотины по гребню ($b \ll B$), то при истечении наблюдается горизонтальное сжатие потока в плане, а затем расширение потока, что обуславливает потери на вход (рисунок 6.19) [145]. Одновременно с боковым сжатием потока на входе будет происходить также вертикальное сжатие.



1 – направление движения струй; 2 – сжатие потока; 3 – расширение потока;
4 – области водоворота

Рисунок 6.19 – Картина течения потока на входном участке водосброса (искусственном проране)

Размеры искусственного прорана определяются исходя из обеспечения пропуска максимального расчетного расхода паводья или паводка, превышающего расчетную обеспеченность для поверочного случая 0,5–1 % вероятности. Гидравлический расчет искусственного прорана (рисунок 6.20) выполняется по формулам для водослива с широким порогом [36] с целью определения необходимых размеров прорана в зависимости от ожидаемого паводкового расхода.

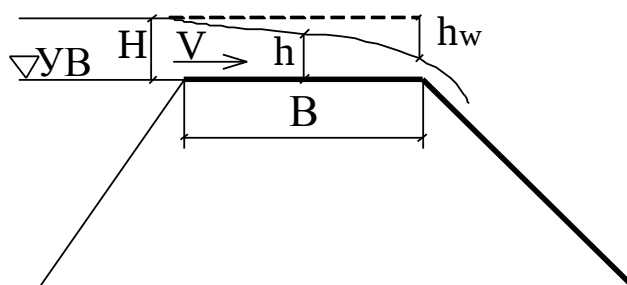


Рисунок 6.20 – Схема к гидравлическому расчету искусственного прорана водосброса

Расчет параметров искусственного прорана, работающего по типу водослива с широким порогом, следующий.

Для определения расхода водослива используем известную формулу гидравлики [104]:

$$\Delta Q = \omega \cdot v, \quad (6.8)$$

где ΔQ – расчетный расход прорана, определяемый из условия превышения максимального паводочного расхода над проектным расходом обеспеченностью $P = 0,5 - 1 \%$ [104], $\text{м}^3/\text{с}$:

$$\Delta Q = Q_{\text{Рmax}} - Q_{\text{Р}}, \quad (6.9)$$

где $Q_{\text{Рmax}}$ – максимальный паводочный расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{Р}}$ – проектный расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – площадь живого сечения трапециевидальной формы, м^2 ;

v – средняя скорость истечения через проран, $\text{м}/\text{с}$.

Скорость истечения через водослив найдем по формуле [145]:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (6.10)$$

где φ – коэффициент скорости;
 g – скорость свободного падения, м/с;
 H – напор на входе, м.

Коэффициент скорости, входящий в формулу (6.10), вычисляется с учетом всех сопротивлений в искусственном проране [146]:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi}}, \quad (6.11)$$

где $\sum \xi$ – суммарный коэффициент сопротивлений, учитывающий сопротивления на входе и по длине [146]:

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}}, \quad (6.12)$$

где $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент сопротивления устоев, принимаемый по рекомендациям [145];
 $\xi_{\text{дл}}$ – коэффициент сопротивления по длине, определяемый по формуле [104]:

$$\xi_{\text{дл}} = \lambda \frac{B}{4R}, \quad (6.13)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;
 B – длина прорана, м;
 R – гидравлический радиус, мм.

Коэффициент Шези C для русла прорана целесообразно определять по формуле А. Д. Альтшуля [147], учитывающей шероховатость защитного покрытия прорана:

$$C = 25 \left[\frac{R}{k_s + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot i}}} \right]^{1/6}, \quad (6.14)$$

где R – гидравлический радиус, мм:

$$R = \frac{(\varphi + m_0 H) H}{\varphi + 2H \sqrt{1 + m_0^2}}, \quad (6.15)$$

где φ – ширина по дну, м;

m_0 – заложение откосов;

H – глубина воды в проране, м;

k_s – эквивалентная шероховатость защитного покрытия в виде геомембраны, принимаемая ориентировочно по справочным данным $k_s = 0,75$ мм [147].

Коэффициент гидравлического трения λ с учетом микрошероховатости поверхности защитного покрытия рассчитывается по формуле [104]:

$$\lambda = 8g / C^2. \quad (6.16)$$

Подставляя вышеприведенные формулы в формулу (6.13) и учитывая пространственность течения потока и боковое сжатие, получим следующую зависимость для определения расчетного расхода прорана, работающего как водослив с широким порогом:

$$\Delta Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot K \sqrt{2g \cdot H^{3/2}} (\varphi + m_0 H), \quad (6.17)$$

где ε – коэффициент бокового сжатия, зависящий от условий входа;

K – коэффициент, учитывающий пространственность истечения потока через проран трапецеидального сечения;

m_0 – коэффициент заложения откосов прорана.

Коэффициент сжатия ε определим по Френсису – Кригеру [146]:

$$\varepsilon = 1 - 0,1n\xi \frac{H}{e}, \quad (6.18)$$

где n – число боковых сжатий;

ξ – коэффициент формы береговых устоев водосброса при входе.

Коэффициент, учитывающий пространственность потока, найдем согласно исследований А. Р. Березинского [145] по формуле:

$$K = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{p}{H}}} \sqrt[4]{\frac{l}{B} \left(1 - \frac{l}{B}\right)}, \quad (6.19)$$

где a – коэффициент Кориолиса;

l – длина порога, м;

B – ширина потока в верхнем бьефе, м;

p – высота порога, м.

С использованием зависимости (6.17) авторами получена следующая расчетная формула для определения необходимой ширины искусственного прорана трапециевидального сечения по дну:

$$e = \frac{\Delta Q}{\varepsilon \cdot \varphi \cdot K \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_0 H, \quad (6.20)$$

где $H = Z_{\max \text{ УВ}} - Z_{\text{УПВ}}$ – напор в проране, равный разности максимально возможного уровня воды в водоеме и отметки порога прорана, соответствующего уровню перелива, м.

В случае, когда длина искусственного прорана превышает $B > 10 H$, гидравлический расчет его проводят как для короткого канала с учетом потерь напора [104].

Потери напора в искусственном проране h_w , м, будут складываться из потерь по длине и местных потерь (см. рисунок 6.20) [104]:

$$h_w = h_e + h_M, \quad (6.21)$$

где h_e – потери по длине, м;

h_M – местные потери, м.

Указанные потери вычисляются по формулам [104]:

$$h_e = \lambda \frac{B}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6.22)$$

$$h_M = \xi_M \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6.23)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, определяемый по формуле (6.16);

ξ_M – коэффициент местных сопротивлений, равный сопротивлению на вход $\xi_{\text{вх}}$, назначаемый по рекомендациям [145].

Расчет параметров сечения искусственного прорана в этом случае выполняется для условий неравномерного установившегося движения по формуле [104]:

$$\omega = \frac{\Delta Q}{C \sqrt{RJ}}, \quad (6.24)$$

где ω – площадь живого сечения прорана;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус, мм;

$J = \frac{h_w}{B}$ – гидравлический уклон в проране, равный отношению потерь напора к его длине.

Тогда ширина искусственного прорана трапецеидального сечения определяется по формуле [104]:

$$b = \frac{\omega}{h} - m_0 h, \quad (6.25)$$

где h – средняя глубина, которая устанавливается в проране, м, (см. рисунок 6.20).

Метод гидравлического расчета входной части водосброса по определению ширины входа b , работающей по типу водослива с широким порогом, с использованием вышеприведенных зависимостей будет заключаться в использовании метода последовательных приближений ввиду включения ширины по дну трапецеидального русла прорана в промежуточные формулы (6.18) и (6.19) в качестве известного параметра. Исходными данными для расчета принимаются параметры ΔQ и H .

Последовательность расчетов состоит в следующем:

- вначале задается предварительная ширина по дну русла прорана b ;
- затем определяются коэффициенты скорости φ по формуле (6.11) и сжатия ε по формуле (6.18);
- вычисляется коэффициент K , учитывающий пространственность потока, по формуле (6.19);
- подставляя найденные значения коэффициентов φ , ε и K и исходные данные ΔQ и H в формулу (6.20), находится ширина русла прорана в первом приближении b_I ;
- далее, подставляя ширину b_I в формулы (6.11), (6.18) и (6.19), находится ширина русла прорана во втором приближении b_{II} ;
- дальнейшие расчеты повторяются до тех пор, пока значение ширины последнего приближения будет отличаться от предыдущего не более, чем на 5–10 %. Полученное таким образом значение b считается окончательным;
- ширину резервного водосброса, работающего как короткий канал определяем по формуле (6.25).

Для иллюстрации применения изложенного метода расчета параметров резервного водосброса, работающего по типу водослива с широким порогом. Рассмотрим пример расчета при следующих исходных данных: $\Delta Q = 15 \text{ м}^3/\text{с}$; $H_0 = 1 \text{ м}$; $B = 30 \text{ м}$; $L = 15 \text{ м}$; $i = 0,0004$; $m_0 = 2$; $k_3 = 0,75 \text{ мм}$; $p = 2 \text{ м}$; $\xi = 1$; $\xi_{\text{вх}} = 1,0$.

При расчете используются вышеприведенные формулы.

Примем $b = 4 \text{ м}$, тогда:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(b + m_0 H) H}{b + 2H\sqrt{1 + m_0^2}} = \frac{(4 + 2 \cdot 1)1}{4 + 2 \cdot 1\sqrt{1 + 2^2}} = 0,708 \text{ м},$$

$$C = 25 \left[\frac{R}{k_3 + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot i}}} \right]^{1/6} = 25 \cdot \left[\frac{0,708}{0,75 + \frac{0,025}{\sqrt{0,708 \cdot 0,0004}}} \right]^{1/6} = 77,508 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}} = \xi_{\text{вх}} + \frac{8g}{C^2} \cdot \frac{B}{4R} = 1 + \frac{8 \cdot 9,81}{77,508^2} \cdot \frac{30}{4 \cdot 0,708} = 1,138,$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,138}} = 0,608,$$

$$\varepsilon = 1 - 0,1n\xi \frac{H}{e} = 1 - 0,1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{4} = 0,975,$$

$$K = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{p}{H}}} \sqrt[4]{\frac{l}{B} \left(1 - \frac{l}{B}\right)} = 1 - \frac{0,1}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{2}{1}}} \sqrt[4]{\frac{15}{30} \left(1 - \frac{15}{30}\right)} = 0,973.$$

Подставив полученные значения коэффициентов в общую формулу (6.19), получим ширину прорана в первом приближении:

$$e_I = \frac{\Delta Q}{\varepsilon \cdot \varphi \cdot K \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_0 H = \frac{15}{0,975 \cdot 0,608 \cdot 0,973 \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 1^{3/2}} - 2 \cdot 1 = 3,87 \text{ м.}$$

Так как найденная ширина $e_I = 3,87$ м отличается от предварительно принятой $e = 4$ м незначительно (на 3,25 %), то ее и принимаем за окончательную.

Таким образом, на основании проведенных расчетов ширина прорана по дну будет равна $e = 4$ м, это обеспечит пропуск расчетного расхода $\Delta Q = 15 \text{ м}^3/\text{с}$ при напоре на входе $H = 1$ м.

Для иллюстрации применения изложенного метода расчета параметров резервного водосброса, работающего как короткий канал. Рассмотрим пример расчета при следующих исходных данных: $\Delta Q = 25 \text{ м}^3/\text{с}$; $H = 1$ м; $L = 15$ м; $B = 20$ м; $i = 0,0004$; $m_0 = 2$; $k_3 = 0,75$ мм; $\xi_{\text{вх}} = 1,0$.

При расчете используются выше приведенные формулы.

Примем $e = 4$ м, тогда:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(e + m_0 H) H}{e + 2H \sqrt{1 + m_0^2}} = \frac{(4 + 2 \cdot 1) 1}{4 + 2 \cdot 1 \sqrt{1 + 2^2}} = 0,708 \text{ м,}$$

$$C = 25 \left[\frac{R}{k_3 + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot i}}} \right]^{1/6} = 25 \cdot \left[\frac{0,708}{0,75 + \frac{0,025}{\sqrt{0,708 \cdot 0,0004}}} \right]^{1/6} = 77,508 \text{ м}^{0,5}/\text{с,}$$

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}} = \xi_{\text{вх}} + \frac{8g}{C^2} \cdot \frac{B}{4R} = 1 + \frac{8 \cdot 9,81}{77,508^2} \cdot \frac{20}{4 \cdot 0,708} = 1,092,$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,092}} = 0,691,$$

$$\nu = \varphi \sqrt{2gH} = 0,691 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1} = 3,06 \text{ м/с,}$$

$$h_w = h_e + h_M = 0,044 + 0,4772 = 0,5212 \text{ м,}$$

$$h_e = \lambda \frac{B}{4R} \cdot \frac{\nu^2}{2g} = 0,01306 \cdot \frac{20}{4 \cdot 0,708} \cdot \frac{3,06^2}{2 \cdot 9,81} = 0,044 \text{ м,}$$

$$h_M = \xi_M \cdot \frac{\nu^2}{2g} = 1 \cdot \frac{3,06^2}{2 \cdot 9,81} = 0,4772 \text{ м,}$$

$$\lambda = 8g / C^2 = 8 \cdot 9,81 / 77,606^2 = 0,01306,$$

$$\omega = \frac{\Delta Q}{C\sqrt{RJ}} = \frac{25}{77,508 \cdot \sqrt{0,708 \cdot 0,026}} = 2,374,$$

$$J = \frac{h_w}{B} = \frac{0,5212}{20} = 0,026,$$

$$h = H - h_w = 1 - 0,5212 = 0,4788 \text{ м},$$

$$e = \frac{\omega}{h} - m_0 h = \frac{2,374}{0,4788} - 2 \cdot 0,4788 = 4,001 \text{ м}.$$

Так как найденная ширина $e_t = 4,001$ м отличается от предварительно принятой $e = 4$ м незначительно (на 0,025 %), то ее и принимаем за окончательную.

Таким образом, на основании проведенных расчетов ширина прорана по дну будет равна $e = 4$ м, то обеспечит пропуск расчетного расхода $\Delta Q = 25 \text{ м}^3/\text{с}$ при напоре на входе $H = 1$ м.

В заключение отметим, что использование покрытия из геомембраны с трапецеидальным сечением искусственного прорана позволит повысить пропускную способность водосброса и обеспечит неразмываемость грунта плотины.

7 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАНАЛОВ

7.1 Понятия безопасности и риска аварии при эксплуатации каналов

Как известно, под безопасностью ГТС понимают свойство данных сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов [1].

Техногенная безопасность ГТС – свойство ГТС, определяющее его отказоустойчивость и живучесть при отказах и авариях, а также способность не допускать в установленных режимах эксплуатации возникновения опасных событий и состояний, которые могут нанести вред людям, их собственности, хозяйственным объектам и окружающей среде.

Под безопасностью эксплуатации каналов будем принимать выполнение ими заданных функций по подаче воды потребителям без аварий и длительных остановок в течение всего срока службы, составляющего для каналов III–IV класса – 50 лет, а I–II класса – 100 лет.

К характеристикам безопасности эксплуатации каналов относятся критерии безопасности, показатели состояния каналов и ГТС на них, характеризующие пределы и уровень безопасности объекта.

Под критериями безопасности каналов понимают предельные значения количественных и качественных показателей состояния канала и комплекса ГТС на них и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии ГТС и утвержденные федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государственный надзор за безопасностью ГТС [148].

К показателям безопасности каналов относят количественные показатели, характеризующие вероятности реализации либо нарушения установленных критериев безопасности ГТС.

Уровень безопасности каналов – степень соответствия состояний ГТС и окружающей среды установленным критериям безопасности, принятым с соблюдением действующих норм проектирования, а квалификации эксплуатационного персонала и действий собственника (эксплуатирующей организации) – требованиям правил технической эксплуатации и действующего законодательства по техногенной и экологической безопасности.

Риском аварии любого ГТС, а том числе канала, считают вероятную меру опасности, характеризующуюся возможностью возникновения аварии на ГТС определенной уязвимости и тяжестью ее последствий в виде возможных потерь [149].

7.2 Сценарии аварийных ситуаций и основные факторы, влияющие на возникновение отказов и аварий на крупных каналах

Гидротехническое сооружение в виде искусственного русла правильной формы, предназначенное для транспортирования воды в различных целях (орошения, осушения, обводнения, гидроэнергетики, судоходства, лесосплава и т. д.), называется каналом [150].

Классификация каналов в наиболее полном виде дана А. А. Королевым [151] и А. А. Угинчусом [152]. Кроме того, расширенная классификация каналов приведена в ряде работ Н. П. Розанова [140], Ю. А. Ибад-Заде [153, 154], В. С. Лапшенкова [155], Е. К. Рабковой [156–158], Ю. М. Косиченко [159] и др. [160].

Каналы бывают открытые, когда устраиваются в грунте в выемке, насыпи или

полувыемке-полунасыпи, и закрытые, когда используются трубопроводы, уложенные открыто на поверхности земли или в выемке с последующей засыпкой ее грунтом.

По назначению каналы подразделяют на следующие виды:

- оросительные;
- осушительные;
- обводнительные;
- энергетические;
- судоходные;
- подводящие или отводящие;
- лесосплавные;
- водопроводные;
- рыбоходные;
- водосбросные;
- комплексные.

В зависимости от способа подачи воды в каналы их подразделяют на самотечные (вода в канал поступает из водного источника самотеком и движется под влиянием силы тяжести) и машинные (вода из источника поступает в канал путем подъема воды с помощью насосных станций).

По топографическим условиям трассирования каналы проходят в выемке, насыпи, полувыемке-полунасыпи.

По роду материала, из которого выполнены дно и откосы открытых каналов, их подразделяют на:

- земляные;
- бетонные;
- железобетонные;
- с использованием полимерных или геосинтетических материалов.

Каналы в зависимости от формы поперечного сечения подразделяются на полигональные, прямоугольные, трапецеидальные, параболические, ложбинообразные. При проектировании каналов форма поперечного сечения принимается в зависимости от грунтовых и геологических условий, а также размеров поперечного сечения канала, чем обуславливается способ производства земляных работ.

В зависимости от характеров уклона дна каналы бывают с прямым уклоном, с обратным уклоном и с горизонтальным дном.

Необлицованные каналы – это каналы без одежд (без защитных покрытий). Такие каналы проходят в земляных руслах, поэтому их для краткости называют земляными каналами.

Облицованные каналы – это каналы, имеющие защитные покрытия. Облицовка канала уменьшает или устраняет полностью фильтрацию воды из канала, исключает размывы канала и защищает его откосы от воздействия судовых волн. Облицованные каналы отличаются большей пропускной способностью по сравнению с земляными (при одинаковых поперечных сечениях), так как защитные покрытия, если они поддерживаются в хорошем состоянии, создают меньшие гидравлические сопротивления [161].

По результатам проведенных исследований [65, 162–168] установлено, что основными факторами, влияющими на возникновение отказов и аварий на крупных каналах, являются:

- оползание откосов дамб каналов;
- значительная фильтрация через дамбы каналов (появление свободных ходов фильтрации, продольных трещин в дамбах, суффозии или выпора);
- повышенная фильтрация, приводящая к подъему уровня грунтовых вод, подтоплению, заболачиванию территорий, вторичному засолению орошаемых земель;

- подмывы бортов каналов течением и действием ветровых волн;
- зарастание русла канала водной и древесной растительностью, ведущее к снижению пропускной способности;
- перелив через гребень дамбы;
- скорость течения, которая может быть выше допустимой и приводить к размыву русла или ниже незаиляющей – и приводить к отложению наносов;
- несвоевременный уход и ремонт за земляными руслами каналов.

Наибольшую угрозу для нормальной эксплуатации крупных каналов создают оползни, опасные деформации русла канала при размывах, а также деформации, вызванные развитием фильтрационных процессов, при которых происходят суффозионные процессы в теле дамб каналов и в их основании. Таким образом, можно выделить основные сценарии развития аварийных ситуаций на каналах, разделив их на два уровня (рисунок 7.1) [169].



Рисунок 7.1 – Сценарии аварийных ситуаций на каналах

На первом уровне можно выделить три группы сценариев, основанных на воздействии гидравлических, фильтрационных и оползневых процессов. На втором уровне – конкретные сценарии разрушения каналов, относящихся к трем выделенным группам.

7.3 Опыт эксплуатации крупных каналов

Начиная с 1930 г. до 60-х годов XX века в России и за рубежом было распространено строительство крупных каналов в земляном русле. Исследования, проведенные на ряде крупных каналов, показывают, что в процессе их эксплуатации на протяжении 30–50 лет наблюдаются различные негативные процессы, связанные с интенсивным зарас-

танием и заилением их русла водной растительностью, значительной фильтрацией, подъемом уровня грунтовых вод, подтоплением и засолением прилегающих к каналам территорий, размывами, оползанием и обрушением откосов, подмывами берегов.

Наиболее густо крупные магистральные каналы расположены в на юге России, где имеется дефицит водных ресурсов и необходимо их рациональное использование с целью улучшения водообеспечения населения, промышленности и сельского хозяйства (таблица 7.1) [170].

Таблица 7.1 – Сводные данные по крупным магистральным каналам юга России, находящихся в ведении Минсельхоза России

Наименование канала	Год ввода в эксплуатацию	Длина, км	Пропускная способность, м ³ /с	Отрасль использования
Большой Ставропольский	1970/1983 ¹	288/480 ²	180	О, В, Э, Р
Донской МК	1952	120	250	О, СХВ, Р
Терско-Кумский	1961	146	100	О, В
Невиномысский МК	1948	48	75	О, Э, В
Кумо-Манычский	1964	96	60	П, О
Право-Егорлыкский	1953	123	45	О, В, П
Пролетарский МК	1960	83,4	54	О
Азовский МК	1953	84,95	20	О
Нижне-Донской МК	1953	73,9	25,6	О
Багаевский МК	1954	36,45	30	О
Верхне-Сальский МК	1975	98,90	30	О
МК Кубанской оросительной системы	1940	113	80	О
Канал им. Октябрьской революции (КОР)	1971	91,50	50	О
Старотеречный	1930	68	50	О
¹ Числитель – год ввода БСК-1; знаменатель – год ввода БСК-3. ² Числитель – длина построенного участка; знаменатель – длина по проекту. Обозначения: О – орошение; СХВ – сельскохозяйственное водоснабжение; В – водоснабжение; Э – энергетика; Р – рыбное хозяйство.				

На юге страны наибольшие площади орошаемых земель находятся в Краснодарском, Ставропольском краях, Республике Дагестан, в Ростовской и Астраханской областях. Только на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов расположено 98,9 тыс. км оросительной сети, что составляет 53 % от всей оросительной сети, находящейся на территории Российской Федерации. Протяженность оросительной сети на территории Краснодарского края составляет 23,7 тыс. км, в Ставропольском крае, Астраханской и Ростовской областях составляет 11,3–11,5 тыс. км.

Сводные данные по МК Краснодарского и Ставропольского краев, Ростовской и Астраханской областей и их техническому состоянию приведены в разделе 1.

Для орошения, водоснабжения населенных пунктов и пополнения водных ресурсов р. Егорлык в 1948 г. был построен Невинномысский канал.

Исследования, проводимые персоналом эксплуатирующей организации, позволили выявить характерные деформации после длительного срока эксплуатации канала. К ним относятся: оползание вовнутрь мокрых откосов, подмывы берегов, зарастание канала водной растительностью, заиливание выпуклых участков. Похожие деформации наблюдались на Терско-Кумском магистральном канале, который берет начало на

р. Терек. Однако помимо прочего проводимые исследования выявили подтопление фильтрационными водами полосы отчуждения канала и прилегающих сельскохозяйственных угодий в некоторых местах [166].

Для обводнения и орошения центральных и северо-восточных районов Ставрополя во второй половине XX века построено четыре очереди Большого Ставропольского канала (БСК).

Водохозяйственная система БСК является одной из крупнейших в России, включает магистральный канал, межхозяйственные распределители, восемь регулирующих водохранилищ, в том числе очень крупное Кубанское водохранилище площадью зеркала 50,2 км² и полным объемом 620 млн м³, каскад из четырех ГЭС общей мощностью 384 тыс. кВт, групповые водопроводы общей длиной 627 км. Система используется для орошения 54 тыс. га, обводнения – 700 тыс. га, хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения г. Усть-Джегуты, Черкесска, городов-курортов Кавказских Минеральных вод, Невинномысской ГРЭС, Буденовского завода пластмасс и для выработки электроэнергии на ГЭС.

Обследования канала выявили основные деформации на Головном участке БСК-1 [164]. На неукрепленных откосах правого берега в результате ливневой деятельности образовались промоины (щели) шириной 0,2–0,4 м и глубиной 0,3–0,5 м, на вогнутом левом откосе на 40,5 км обнаружена крупная оползневая подвижка (срыв), на противоположном правом берегу – такой же по величине срыв (подвижка) с отвалившимся, но еще не размытым грунтом. Подсечки наблюдались на 22,5 км, основной причиной образования которых являлись ветровые волны.

При первоначальной замочке первой очереди Большого Ставропольского канала (БСК-1) на первых 8 км после начала замачивания на внешних откосах появились выходы фильтрационных вод [164], данные процессы свидетельствовали о наличии в дамбе канала или в его основании свободных ходов фильтрации, кроме того, неоднократно возникала угроза прорыва высоких однобортных дамб канала, вызванная карстово-суффозионными процессами с наличием воронок, отверстий и просадок на откосах канала [149, 164, 171].

В настоящее время все каналы оросительной системы БСК имеют удовлетворительное техническое состояние, а их КПД находится в пределах 0,80–0,90.

Правоегорлыкский канал (ПЕК) с расходом 45,0 м³/с и длиной 127 км проходит по сильно пересеченной местности и является составной частью Право-Егорлыкской обводнительно-оросительной системы. Система вступила в эксплуатацию в 1960 г. Она охватывает северо-восточную часть Ставропольского края, два района Ростовской области и западные районы Калмыкии [172].

Для перехода балок и речек на канале впервые в практике ирригационного строительства на Северном Кавказе были использованы высокие (до 25–35 м) земляные насыпи и уникальные дюкера. В процессе эксплуатации на канале наблюдались деформации русла, связанные с размывами откосов и отложением наносов в виде кос.

Все магистральные каналы Право-Егорлыкской обводнительно-оросительной системы в настоящее время характеризуются удовлетворительным техническим состоянием и КПД равным 0,75 [173].

Донской магистральный канал (ДМК) введен в эксплуатацию в 1952 г. с головным расходом 160 м³/с, частично расширен в 1975 г. Канал используется комплексно для оросительно-обводнительных целей, подпитки р. Сал и переброски стока в бассейн р. Западный Маныч. Проведенные в НИМИ им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО «ДонГАУ» натурные исследования на ПК 408 и ПК 107 позволили выявить, что после 20-летней эксплуатации русло канала подвергалось интенсивным обрушениям и оползням, при этом нередко возникала угроза перелива воды через гребень дамбы с

образованием прорана [163, 166].

Продолжением ДМК является Пролетарский магистральный канал (ПМК), введенный в эксплуатацию в 1960 году, протяженностью 83,4 км и расходом в голове 54 м³/с. Канал проложен в земляном русле полигонального поперечного сечения. На канале имеется 55 ГТС. В результате проведенных обследований были выявлены следующие дефекты магистрального канала:

- зарастание русла канал водной растительностью;
- размывы и интенсивное заиливание канала у ст. Буденовская (ПК 1622–1634);
- деформация поперечного сечения;
- фильтрационные процессы, связанные с наличием карстовых пород (н. п. Наумовка ПК 1549–1520).

В целом техническое состояние каналов Ростовской области может характеризоваться как удовлетворительное, хотя на некоторых участках Азовского, Нижне-Донского магистральных каналов – неудовлетворительное. Верхне-Сальский и Большой магистральные каналы имеют неудовлетворительное техническое состояние, что связано со значительными деформациями их русел, заиливанием, большими потерями на фильтрацию, что обуславливает снижение КПД до 0,70–0,73, что на 15 % ниже проектных значений.

Размывами откосов и отложения наносов, оползневые явления, в виде внезапно-го перекрытия русла канала оползнем наблюдались также на Саратовском канале и на канале Иртыш-Караганда [163, 174].

Зарубежом также наблюдались аварийные ситуации на каналах. Так, в Армении на Малом Октеберянском магистральном канале происходили переливы воды через бровки канала [175]. Кроме того, на Самгорской оросительной системе (в Грузии) неоднократно возникала угроза прорыва дамб, вызванная карстово-суффозионными процессами.

В целом на основе анализа эксплуатации крупных каналов Юга России и ближнего зарубежья установлены основные виды деформаций, в результате воздействия которых могут возникать аварийные ситуации, отказы в работе каналов, ухудшается их техническое состояние и уменьшается срок службы.

Представленная на рисунке 7.1 схема возможных сценариев аварийных ситуаций на каналах основана на опыте эксплуатации крупных каналов, аварии и деформации которых систематизированы в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Аварии и деформации на каналах России и зарубежья

Канал, оросительная система	Авария	Деформация
1	2	3
Азовский МК	–	интенсивное заиливание и зарастание водной растительностью
БСК	- аварии, вызванные переливом воды через бровки канала на косогорных участках; - угроза прорыва дамбы, вызванная карстово-суффозионными процессами	- образование подсечек и размывов, выход фильтрационного потока на низовой откос; - деформации ложа канала; - интенсивные обрушения и оползни в русле канала
Донской МК	–	- значительное оползание откосов на двух участках; - интенсивное зарастание русла канала в береговой зоне

Продолжение таблицы 7.2

1	2	3
Невинномысский канал	—	- размыв откосов и отложение наносов в виде кос; - зарастание русла канала растительностью; - оползневые процессы; - подсечки бортов канала
Право-Егорлыкский канал	—	размыв откосов и отложение наносов
Пролетарский МК	—	- интенсивное зарастание водной растительностью; - размывы и заиление канала; - деформации поперечного профиля канала; - фильтрационные процессы, связанные с наличием карстовых пород
Терско-Кумский канал	—	- размывы вогнутых и заиление выпуклых берегов канала; - выход фильтрационного потока на приканальную территорию; - заиление начального участка канала; - зарастание сорной растительностью
Канал Иртыш-Караганда	—	- размыв откосов и отложение наносов в виде кос; - интенсивные обрушения и оползни в русле канала
Каракумский канал	—	- переработка берегов, связанная с воздействием судовых и ветровых волн; - зарастание сечения канала водорослями
МК Кубанской оросительной системы	—	- деформации откосов в результате воздействия ветровых волн
Сартовский канал	—	- деформации откосов канала, из-за влияния ветровых волн
Нижне-Донской МК	—	- зарастание русла канала водной растительностью
Малый Октябрьский МК	перелив воды через бровки канала	—
Северо-Крымский канал	прорывы дамб	- продольные и поперечные просадки, трещины и интенсивная фильтрация; - оползание откосов, связанное с их оттаиванием; - запотевание внешних откосов
Самгорская ОС	угроза прорыва дамбы, вызванная карстово-суффозионными процессами	—

7.4 Обзор существующих работ в области оценки безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений

В настоящее время средний возраст ГТС в России составляет 40–50 и более лет, в связи с этим многие ГТС, в том числе и каналы, требуют ремонта и модернизации.

Вопросы безопасности эксплуатации ГТС рассматривались в работах В. С. Алтунина [162, 163], К. Н. Анахаева [176, 177], Е. Н. Белендира [47], В. А. Белова [75], В. А. Волосухина [178], Л. А. Золотова, И. Н. Иващенко [179], А. В. Ищенко [165, 180], Ю. М. Косиченко [159, 166, 167, 181–186], Ц. Е. Мирцхулавы и В. П. Недриги [147], Н. Н. Павловского [187, 188], А. М. Прудовского [126], Н. Н. Розанова [189], Н. С. Розанова [50], И. С. Румянцева [190], С. В. Сольского, Д. В. Стефанишина [80, 191], Г. М. Каганова, Р. Р. Чугаева и других [192–195]. Из зарубежных исследователей в этом направлении известны работы: R. Fell [48], D. Harford [196], Allen Hugh [197], R. Laffite [198].

Главными причинами аварий на ГТС являются потеря прочности и устойчивости, осадки, воздействие фильтрационных вод, суффозия, кольматация и т. д. [50]. Анализ опыта эксплуатации крупных каналов показывает, что аварийные ситуации, связанные с разрушениями их дамб, могут наступить по тем же причинам, что и разрушения плотин, т. к. дамбы каналов представляют собой такой же напорный фронт, как и плотины водохранилищ. За долгие годы эксплуатации техническое состояние каналов и сооружений на них значительно ухудшилось, что может привести к увеличению вероятности аварий на них, поэтому необходимо получение обоснованных критериев безопасности таких объектов с учетом последствий возможных аварий, а также разработка новых методик по предупреждению и оценке риска возникновения аварийных ситуаций на каналах с учетом всех особенностей режима работы именно этих сооружений.

Наиболее опасным последствием аварии на грунтовом сооружении является возникновение прорана и затопление прилегающей территории. Это может привести к большим экономическим, экологическим и социальным последствиям. В 1997 году вступил в силу Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», в соответствии с которым все ГТС, представляющие потенциальную опасность, обязаны предоставить декларации безопасности с прогнозом развития и оценкой представлений в случаях аварий на сооружениях [1].

В материалах Комитета по разрушениям и авариям плотин отмечается, что при их эксплуатации наибольшим разрушениям подвергаются плотины и дамбы из грунтовых материалов (до 77 %), причем большая часть аварий происходила на плотинах высотой до 30 м [149].

Главными причинами этих повреждений и разрушений являются:

- переливы воды через гребень дамбы;
- неблагоприятные воздействия фильтрационных потоков, при которых происходят суффозионные процессы в теле дамб и их основаниях.

По экспертным оценкам отечественных специалистов, аварийность ГТС в России в 2,5 раза превышает среднемировые показатели. Установлено, что основными причинами аварий являются: неудовлетворительное техническое состояние сооружений, дефекты при строительстве и ошибки при проектировании. В связи с этим в нормативных документах повышены требования к безопасности ГТС. За рубежом некоторые аспекты проектирования ГТС с учетом риска аварий рассмотрены в «Еврокоде 7» [199].

В настоящее время для оценки риска аварий ГТС существует несколько методик: R. Fell [48], Д. В. Стефанишина [80, 191], Л. А. Золотова, И. Н. Иващенко [179],

ГНЦ РФ ОАО «НИИ ВОДГЕО» [200], ОАО «НИИЭС» [35], ФГУП «РосНИИВХ», ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [201], ФГБОУ ВПО МГУП [175, 202, 203] и др.

Методика анализа риска аварий ГТС ОАО «НИИЭС» и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [201] устанавливает методические принципы, термины и определения анализа риска, основные требования к процедуре и оформлению результатов, а также представляет основные методы анализа риска аварий ГТС различных типов и классов.

В Методике основная задача анализа риска аварий гидротехнических сооружений заключается в использовании всей доступной информации о сооружениях для оценки риска для отдельных людей, групп населения, имущества и окружающей природной среды от опасностей, свойственных авариям ГТС.

Процесс анализа риска аварий ГТС выполняется по схеме:

- организация и планирование работ;
- идентификация опасностей;
- вычисление и оценка риска, определение его значимости;
- разработка рекомендаций по уменьшению риска (при необходимости);
- оформление результатов анализа рисков.

Идентификация опасностей для конкретного ГТС должна включать в себя следующее: предварительный анализ опасностей ГТС, разработку перечня возможных нежелательных процессов и событий, приводящих к аварии ГТС, формирование перечня основных сценариев возникновения и развития аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ГТС, ранжирование основных сценариев возникновения и развития аварий и ЧС на ГТС по уровню опасности для персонала объекта, населения, имущества и окружающей природной среды, выбор дальнейших направлений деятельности по анализу риска ГТС.

Рекомендации по уменьшению риска аварий ГТС разрабатываются на заключительном этапе анализа риска при необходимости – в случае, если вычисленные или качественно определенные риски опасных событий и процессов, приводящих к аварии ГТС, признаны неприемлемыми и значимыми по своим последствиям для основных групп реципиентов риска.

На этапе вычисления и оценки риска, определения его значимости, выявленные опасности должны быть оценены с точки зрения их соответствия критериям приемлемого риска аварий ГТС данного типа, класса и назначения.

Ввиду уникальности каждого ГТС и сложностей в формализации процедуры анализа риска, а также отсутствия нормативно закрепленных методик анализа риска аварий ГТС и значений критериев приемлемого риска результаты оценки риска и критерии приемлемого риска могут быть выражены количественно или качественно.

Согласно Методике, разработанной ГНЦ РФ ОАО «НИИ ВОДГЕО» [200], оценка риска аварии производится на основании экспертного анализа степени опасности аварии и степени уязвимости ГТС.

При этом под опасностью при оценке возможности аварий ГТС понимаются процессы, протекающие в ГТС и зоне их влияния и представляющие угрозу для жизни или условий жизнедеятельности людей, объектов хозяйства или окружающей природной среды; под уязвимостью ГТС – свойство ГТС терять способность к выполнению естественных или заданных функций в результате негативных воздействий.

Интегральную оценку опасности аварий ГТС рекомендуется определять по следующим показателям: опасность превышения принятых при обследовании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий; обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям; соответствие проекту

конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания; возможные последствия и ущерб при аварии ГТС.

Степень опасности по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок, каждый из которых имеет свой код. Интегральная количественная оценка опасности ГТС напорного фронта характеризуется коэффициентом опасности λ , который представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной обстановки (сочетания показателей опасности) на объекте.

Численные значения коэффициента опасности λ в зависимости от установленного интегрального кода показателей опасности были получены на основе экспертной оценки коэффициентов значимости или «удельного веса» каждого из показателей опасности, а также оценки относительной роли (весовых коэффициентов) каждой из степеней опасности по тому или иному показателю.

Степень уязвимости ГТС определяется их восприимчивостью к воздействию факторов опасности и оценивается аналогично на основании экспертных оценок по следующим показателям: состояние сооружения (по данным инструментальных наблюдений и визуального контроля); организация эксплуатации ГТС (соблюдение требований безопасной эксплуатации); готовность объекта к локализации и ликвидации ЧС.

Интегральная оценка уязвимости ГТС характеризуется коэффициентом уязвимости v_y , который так же, как коэффициент опасности λ , представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной обстановки на объекте по сочетанию показателей уязвимости.

Степень риска аварии количественно выражается коэффициентом риска аварии R_a :

$$R_a = \lambda \cdot v_y, \quad (7.1)$$

где λ – коэффициент опасности аварии;

v_y – коэффициент уязвимости аварии ГТС.

Упрощенная методика расчета параметров волны прорыва грунтовых плотин низконапорных гидроузлов разработана ФГОУ ВПО «МГУП» и имеет целью оперативно и с приемлемой точностью получать параметры волны прорыва и в первую очередь максимальную глубину затопления в нижнем бьефе [202]. Полученная в результате использования основных принципов метода планирования эксперимента эмпирическая зависимость имеет вид:

$$h_{\max} = 2,51 \frac{H_0^{0,98} \cdot n_0^{0,02} \cdot Q_0^{0,05}}{W_{\text{вод}}^{0,05} \cdot x^{0,33}}, \quad (7.2)$$

где $h_{\max}$ – максимальная глубина затопления в нижнем бьефе, м;

H_0 – глубина у плотины до начала аварии, м;

n_0 – шероховатость русла верхнего бьефа;

Q_0 – расход воды в нижнем бьефе гидроузла до начала аварии, м³/с;

$W_{\text{вод}}$ – объем водохранилища до начала аварии, м³;

x – расстояние от створа плотины до створа наблюдения, м.

Данная Методика имеет целью оперативно и с приемлемой точностью получать параметры волны прорыва и в первую очередь максимальную глубину затопления в нижнем бьефе.

Однако указанная Методика применима лишь к низконапорным узлам водохранилищ при отсутствии подпора нижерасположенных ГТС.

Методика оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема разработана ФГУП «РосНИИВХ» и главной причиной крупных аварий на плотинах всех типов называет перелив через гребень с образованием прорана, являющийся следствием как природных, так и техногенных воздействий.

Значение риска перелива через гребень за счет высокого паводка $\lambda_{1.1}$ определяется следующим образом:

$$\lambda_{1.1} = \frac{P}{100 \cdot K_{1.1}^{zap}}, \quad (7.3)$$

где P – расчетная обеспеченность, %;

$K_{1.1}^{zap}$ – гарантированный коэффициент надежности плотины.

Гарантированный коэффициент надежности плотины по защите ее от перелива через гребень при пропуске паводка $K_{1.1}^{zap}$ с учетом погрешностей будет равен [73]:

$$\left. \begin{aligned} K_{1.1}^{zap} &= \frac{Q_{сум} - m_{Q_{сум}}}{Q_{max,p\%} + m_{Q_{p\%}}} = \frac{Q_{сум}^{zap}}{Q_{max,p\%}^{zap}} \\ &\left. \begin{aligned} m_{Q_{p\%}} &= t_{\alpha} \cdot \sigma_Q \\ \text{или} \\ m_{Q_{p\%}} &= \frac{t_{\alpha} \cdot \sigma_Q}{r - t_{\alpha} \cdot \sigma_r} \end{aligned} \right\}, \end{aligned} \quad (7.4)$$

где $Q_{сум}$ – суммарный расход водопропускных сооружений гидроузла, м³/с;

$m_{Q_{сум}}$ – суммарное максимальное отклонение расхода водопропусков от проектного значения при превышении ФПУ в водохранилище (неполное раскрытие затворов, подпор в нижнем бьефе, проектные просчеты и т. п.), м³/с;

$Q_{max,p\%}$ – максимальный расход воды заданной обеспеченности по соответствующему закону распределения (трехпараметрических, гамма-распределения, Пирсона III и др.), м³/с;

$m_{Q_{p\%}}$ – суммарное отклонение максимального расхода воды заданной обеспеченности, м³/с;

$Q_{сум}^{zap}$ – гарантированное значение суммарного расхода водопропускных сооружений гидроузла, м³/с;

$Q_{max,p\%}^{zap}$ – гарантированное значение максимального расхода расчетной обеспеченности, м³/с;

t_{α} – коэффициент Стьюдента;

α – уровень значимости;

σ_Q – среднеквадратическое отклонение;

r – коэффициент корреляции;

σ_r – погрешность определения коэффициента корреляции.

Указанная Методика оценивает только риск перелива через гребень плотины, что недостаточно для обеспечения безопасной работы сооружения.

Основополагающими исследованиями в области надежности и безопасности работы каналов являются исследования Ц. Е. Мирцхулавы, который учел множество факторов, влияющих на надежность работы канала, и представил их в виде многопараметрической функции [65]:

$$\omega(\tau) = f[\omega_{\Gamma}(\tau), \omega_{\text{рз}}(\tau), \omega_{\text{кн}}(\tau), \omega_{\text{гт}}(\tau), \omega_{\text{кл}}(\tau), \omega_{\text{э}}(\tau), \omega_{\text{н}}(\tau)], \quad (7.5)$$

где $\omega(\tau)$ – обобщенный параметр надежности;

$\omega_{\Gamma}(\tau)$ – обобщенный параметр гидравлических условий канала;

$\omega_{\text{рз}}(\tau)$ – обобщенный параметр условий размыва и заиления;

$\omega_{\text{кн}}(\tau)$ – обобщенный параметр конструктивной надежности;

$\omega_{\text{гт}}(\tau)$ – обобщенный параметр геологических и геотехнических условий;

$\omega_{\text{кл}}(\tau)$ – обобщенный параметр климатических условий;

$\omega_{\text{э}}(\tau)$ – обобщенный параметр условий эксплуатации канала;

$\omega_{\text{н}}(\tau)$ – обобщенный параметр неучтенных факторов.

Каждый обобщенный параметр может быть расчленен на отдельные параметры, характеризующие например конструктивную надежность – совершенство расчетов, схемы и технологии.

Наиболее часто дамбы каналов разрушаются при переливе воды через гребень с образованием прорана или при развитии фильтрационных и просадочных процессов.

Часто прорывы дамб каналов происходят на участках в насыпи, при прохождении канала через долины, ложбины и понижения рельефа, а также на косогорных участках со стороны низовой дамбы. В условиях косогорного рельефа, широко развитого в предгорных зонах нашей страны, просадочные и другие инженерно-геологические процессы и явления имеют свои специфические особенности, об этом говорит практика строительства каналов в Средней Азии, Кавказе, Предкавказье и других районах [204].

В настоящее время имеются различные методы расчета интегральных характеристик прорана – суммарного объема выноса грунта, конечной ширины прорана, максимального расхода излива, полного времени стабилизации процесса, однако, несмотря на необходимость точного прогнозирования возникновения и развития данного процесса, надежных методов расчета в настоящее время не существует [205]. Предложенные модели развития прорана обычно состоят из зависимости для определения его пропускной способности, уравнения неразрывности потока, зависимости интенсивности выноса грунта из тела плотины от гидравлических и геометрических параметров.

В научно-технической литературе имеется ряд попыток получить зависимости для интегральных характеристик проранов на основании статистической обработки данных о произошедших прорывах дамб. Ряд исследователей ставят эти характеристики в зависимости от «фактора формирования прорана» – комплекса, $W_{\text{изл}} \cdot h_0$, где $W_{\text{изл}}$ – объем излившейся воды, м³, h_0 – начальный перепад уровней воды, м.

Выполненная К. Р. Пономарчук [205] статистическая обработка данных привела к следующим зависимостям:

$$Q_{\text{max}} = 1,29 \cdot (W_{\text{изл}} \cdot h_0)^{0,43}, \quad (7.6)$$

$$W_{\text{вын}} = 0,05 \cdot (W_{\text{изл}} \cdot h_0)^{0,72}, \quad (7.7)$$

$$T_{\text{max}} = 6,8 \cdot (W_{\text{изл}} \cdot h_0)^{0,36}, \quad (7.8)$$

где Q_{max} – максимальный расход в процессе излива, м/с;

$W_{\text{вын}}$ – суммарный объем вынесенного грунта, м³;

T_{max} – полное время развития прорана, с.

К сожалению, расчеты по интегральным зависимостям не дают представления о механизме развития проранов во времени, что является их главным недостатком.

Математическая модель, предложенная А. М. Прудовским, основана на анализе

систематического экспериментального исследования. Эмпирическая зависимость, полученная при относительно небольшом диапазоне изменения величины h_t , имеет следующий вид:

$$\left(\frac{dB_{\text{пр}}}{dt} \right)_t \cong \frac{A \cdot \sqrt{g}}{w_{\text{уд}}} \cdot h_t^{5/2}, \quad (7.9)$$

где $B_{\text{пр}}$ – ширина прорана, м;

t – текущее время формирования прорана, с;

A – эмпирический коэффициент, $A = 0,02$;

$w_{\text{уд}}$ – площадь поперечного сечения дамбы между ее гребнем и дном прорана, м²;

h_t – разность между уровнем воды в ВБ и отметкой дна прорана, м.

Тот факт, что данная зависимость получена для весьма ограниченного диапазона изменения факторов, требует ее уточнения.

Проблемой фильтрации воды из каналов занимались такие известные отечественные ученые, как профессор Н. Е. Жуковский и академик Н. Н. Павловский, однако наиболее точное теоретическое решение для случая фильтрации из канала дал профессор В. В. Ведерников [206–208], который получил общеизвестную зависимость для фильтрационного расхода, приходящегося на 1 погонный метр канала трапециевидного сечения q , м³/с:

$$q = k \left(B + 2h \frac{K}{K_1} \right), \quad (7.10)$$

где k – коэффициент фильтрации грунта, в котором проходит канал, м/с;

B – ширина канала поверху, м;

h – глубина наполнения канала, м;

K и K_1 – эллиптические интегралы первого рода.

Однако в формуле (7.10) значения величин $2 \frac{K}{K_1}$ необходимо определять из графиков и таблиц в зависимости от значения отношения $\frac{B}{h}$, для трех коэффициентов заложения откосов $m = 1$, $m = 1,5$ и $m = 2$, что достаточно проблематично, кроме того большинство крупных магистральных каналов имеют полигональное поперечное сечение, где коэффициент заложения откосов меняется по всей глубине и не всегда принимают заданные значения.

Вопросами свободной фильтрации, а также фильтрацией через земляные плотины занимались К. Н. Анахаев, Б. Х. Амшоков, Ж. Х. Шогенова [176, 177], которые предложили Методику фильтрационного расчета земляных плотин на проницаемом основании разной мощности:

$$\frac{q}{k} = \frac{H^2}{2L_1} + \frac{H \cdot T_2}{L_1 + 0,44T_2}, \quad (7.11)$$

где q – удельный фильтрационный расход через земляную плотину на проницаемом основании разной мощности, м²/сут;

k – коэффициент фильтрации грунтов тела и основания плотины, м/сут;

H – действующий напор, м;

L_1 – ширина плотины от верховой грани эквивалентного прямоугольника в верхнем бьефе до дренажа, м;

T_2 – мощность проницаемого основания в нижнем бьефе, м.

Из выше изложенного следует, что большинство исследователей занимались разработкой математических моделей развития прорана и фильтрационных деформаций на основе статистических и экспериментальных данных. Кроме того, основная часть исследований проводилась для плотин низконапорных гидроузлов малых водохранилищ, дамб золошлакоотвалов. Однако в настоящее время требуется разработка и обоснование новых расчетно-теоретических исследований и математических моделей по безопасной эксплуатации магистральных каналов, которые учитывали бы все особенности режима работы именно этих сооружений. В связи с этим, для изучения процесса возникновения и развития фильтрационных деформаций необходима разработка новой Методики расчета фильтрации и оценки риска аварии, которая будет учитывать суффозию, особенности основания каналов, размыв грунта и т. д.

8 РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ КРУПНЫХ КАНАЛОВ

8.1 Потенциально опасные участки крупных каналов

К потенциально опасным участкам крупных каналов можно отнести участки в насыпи, на косогоре и в неустойчивых грунтах (просадочных, карстово-суффозионных), так как при эксплуатации крупных каналов на таких участках часто возникают различные негативные процессы, связанные с прорывом дамб, значительными размывами их русел, оползнями [65, 163, 166, 168]. Эти нежелательные явления приводят к нарушению безопасности работы каналов и к невозможности их дальнейшей эксплуатации.

На участках каналов в насыпи и на косогоре уровень воды в канале значительно превышает отметки прилегающей территории, в результате чего в дамбе канала могут образовываться опасные фильтрационные деформации в виде сосредоточенных ходов фильтрации, суффозии или выпора в зоне выхода потока на низовой откос или основание дамбы.

В качестве примеров разрушений опасных участков крупных каналов от фильтрационных воздействий можно выделить участки в насыпи первой очереди Большого Ставропольского канала (БСК-I), общей протяженностью около 5000 м [164, 166], где неоднократно наблюдались разрушения внутренних бортов канала с образованием подсечек и размывов размером до 1,5 м, появлялись выходы фильтрационных вод на внешних откосах дамб.

На рисунках 8.1 и 8.2 приведены конструкции насыпей через р. Джегонас и р. Абразинка.

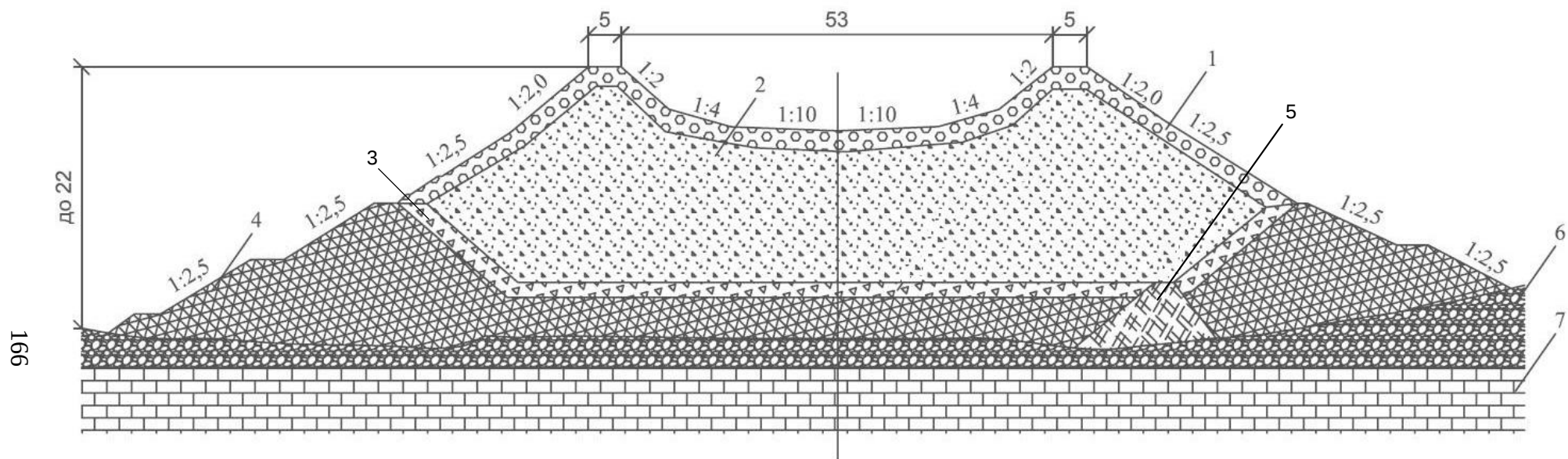
На первых 3,5 км БСК-1 проходит по косогору, где на 1,1–2,2 км в нижней однобортной дамбе (рисунок 8.3) появлялись выходы фильтрационных вод, трещины до 0,15 м, воронки до 1,3 м, что потребовало ее укрепления.

На Право-Егорлыкском канале, который проходит через многочисленные балки, имеются участки в насыпи и на косогоре, протяженность которых приведена в таблице 8.1.

На канале Иртыш-Караганда на участке, проходящем по косогору, имели место оползни. Аварийные ситуации складывались на отдельных участках Северо-Крымского канала, проходящих в насыпи, где наблюдались продольные и поперечные просадки, трещины и интенсивная фильтрация через дамбы, вызвавшая их прорывы [183].

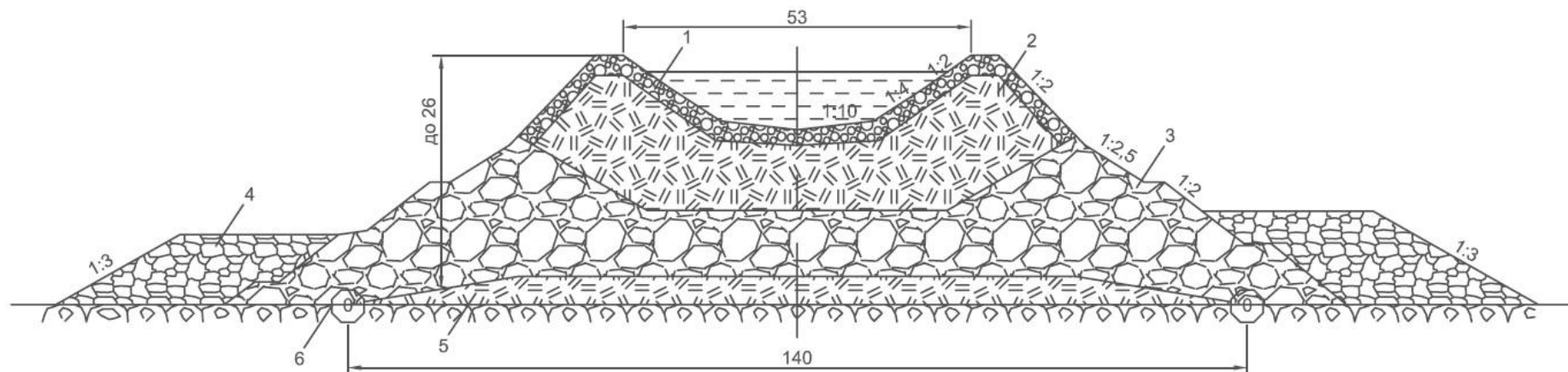
По-существу, дамбы каналов, особенно на участках в насыпи и на косогоре, представляют собой напорный фронт такой же, как и для грунтовых плотин. Поэтому каналы на этих участках необходимо считать потенциально опасными объектами и, следовательно, для них должны быть разработаны методы расчета риска возможной аварии [169, 209, 210].

В настоящей работе рассматриваются расчеты фильтрации для каналов в насыпи и на косогоре, и дается оценка риска их аварии вследствие фильтрационных процессов.



1 – защитное покрытие из гравийно-галечниковой смеси; 2 – насыпь, преимущественно из суглинков со щебенкой; 3 – слой из щебенки известняка ($h = 1$ м); 4 – рваный камень (известняк); 5 – призма из суглинков и супесей; 6 – грубоокатанные гравийно-галечниковые отложения из осадочных пород с заполнителем из песков, супесей, суглинков; 7 – мелоподобные тонко- и толсто плитчатые известняки

Рисунок 8.1 – Конструкция насыпи через р. Джегонас



1 – крепление гравийно-галечниковым материалом; 2 – глина и суглинок делювиальные; 3 – гравийно-галечниково-песчаная смесь; 4 – пригрузочная призма из полускальных пород (аргиллит, алевролит); 5 – подсыпка из делювиальных глин и суглинков; 6 – дренаж

Рисунок 8.2 – Конструкция насыпи через р. Абазинка

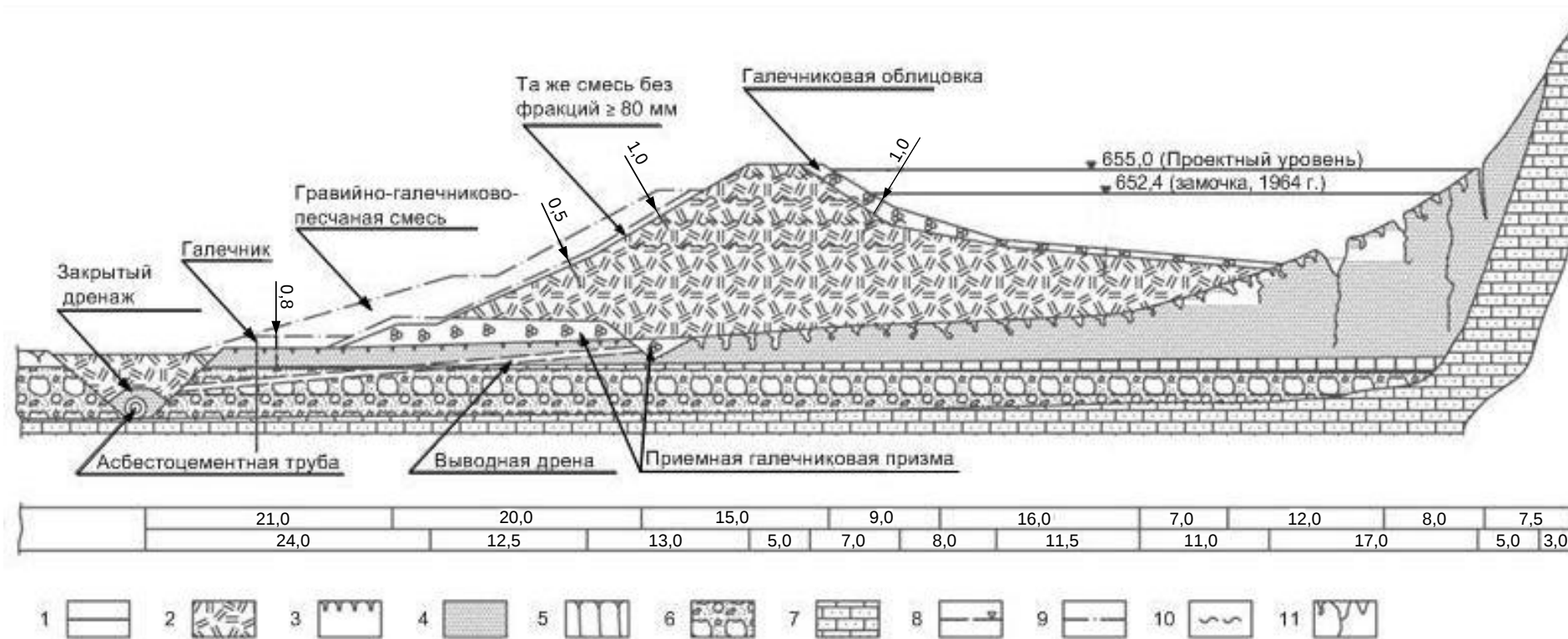


Рисунок 8.3 – Конструкция однобортной дамбы и геологический разрез по характерному поперечнику на БСК-1

Таблица 8.1 – Техническая характеристика Право-Егорлыкского магистрального канала

Наименование участков и номер пикетав	Максималь- ный расход в начале участка, м ³ /с	Размер канала				Канал проходит в				Грунт
		Длина участка, км	Ширина по дну, м	Глубина наполнения при макси- мальном расходе, м	Заложе- ние откосов	выемке, км	насыпи, км	полувыемке- полунасыпи, км	косо- горье, км	
ПК0-ПК100	32,0	10,0	18	3,6	1:1	0,7	2,5	6,8	–	суглинки
ПК0-ПК100	32,0	10,0	18	3,6	1:1	0,7	2,5	6,8	–	суглинки
ПК0-ПК100	32,0	10,0	18	3,6	1:1	0,7	2,5	6,8	–	суглинки
ПК100-ПК280	31,5	18,0	26	3,4	1:1	2,6	1,9	13,5	–	суглинки
ПК100-ПК280	31,5	18,0	26	3,4	1:1	2,6	1,9	13,5	–	суглинки
ПК280-ПК420	30,5	14,0	26	3,3	1:1	0,3	0,6	13,1	–	суглинки
ПК280-ПК420	30,5	14,0	26	3,3	1:1	0,3	0,6	13,1	–	суглинки
ПК420-ПК533	30,0	11,3	15	4,2	1:1	0,4	–	10,9	–	тяж. суглинки
ПК420-ПК533	30,0	11,3	15	4,2	1:1	0,4	–	10,9	–	тяж. суглинки
ПК533-ПК950	24,0	41,7	18	3,3	1:1	13,6	5,4	20,3	2,4	кам. отм.
ПК533-ПК950	24,0	41,7	18	3,3	1:1	13,6	5,4	20,3	2,4	кам. отм.
ПК950-ПК1100	23,5	15,0	16	3,0	1:1	10,4	1,2	13,4	–	лег. суглинки
ПК950-ПК1100	23,5	15,0	16	3,0	1:1	10,4	1,2	13,4	–	лег. суглинки
ПК1100-ПК1262	22,0	14,5	15	3,2	1:1	0,9	0,7	8,8	–	лег. суглинки
ПК1100-ПК1262	22,0	14,5	15	3,2	1:1	0,9	0,7	8,8	–	лег. суглинки
ПК1100-ПК1262	22,0	14,5	15	3,2	1:1	0,9	0,7	8,8	–	суглинки
ПК1100-ПК1262	22,0	14,5	15	3,2	1:1	0,9	0,7	8,8	–	суглинки

8.2 Допущения и предпосылки, принятые при расчетах риска аварий на каналах

При гидравлических расчетах перелива воды через гребень дамбы и образование прорана принимались допущения:

- неустановившееся и неравномерное движение для малого слоя приращения глубины заменялось установившимся равномерным движением;
- переливающийся поток в пределах принятого приращения глубины и ширины прорана за промежуток времени Δt считался постоянным;
- размыв тела дамбы в пределах промежутка времени Δt принимался неизменным.

При фильтрационных расчетах земляных дамб ввиду сложности учета всех факторов, влияющих на движение фильтрационного потока, принимались следующие допущения:

- грунт тела дамбы канала принимался однородным и изотропным, т. е. когда значение коэффициента фильтрации во всех направлениях является постоянным;
- вся область фильтрации была разделена на область фильтрации через тело дамбы канала с коэффициентом фильтрации K_T и область фильтрации через дно и основание дамбы с коэффициентом фильтрации K_O ;
- водоупор во всех случаях принимался водонепроницаемым и горизонтальным;
- положение депрессионной кривой в однородных дамбах каналов не зависит от качества грунта, а определяется только геометрическими размерами их профиля;
- фильтрация рассматривается в одной плоскости и считается установившейся;
- дно канала принималось водопроницаемым для всех расчетных схем.

8.3 Расчет риска аварий на потенциально опасных участках канала при переливе через гребень с образованием прорана в дамбе

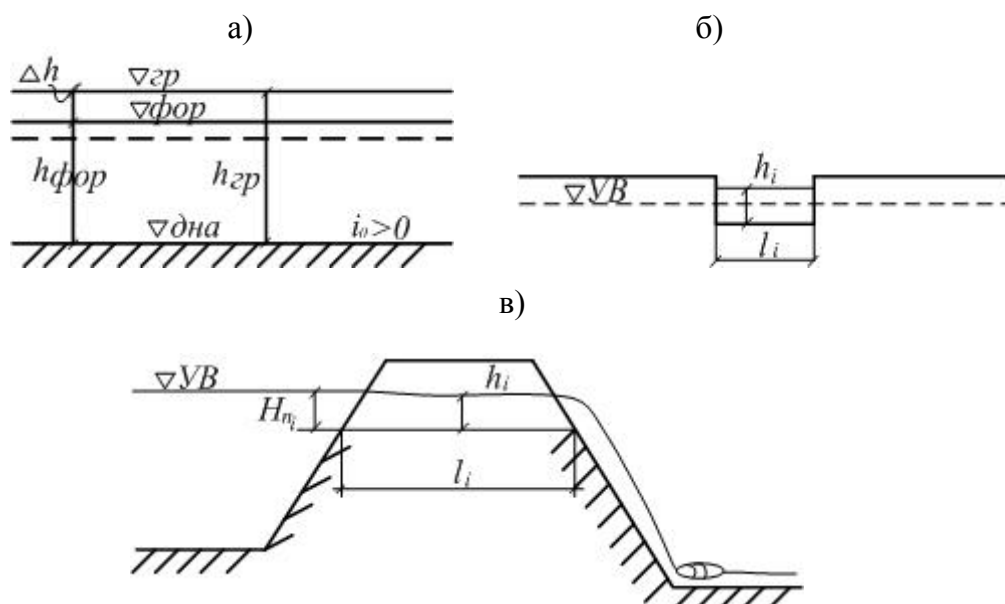
Процесс аварии на потенциально опасных участках канала в насыпи или на косогоре может быть вызван переливом воды через гребень дамбы.

При этом будет образовываться проран в дамбе канала аналогично как в грунтовой плотине [126, 205].

Явление перелива через гребень с последующим образованием прорана в дамбе открытым гидравлическим потоком представим в следующем виде. Перелив открытого потока через гребень дамбы происходит при максимальном уровне воды в канале, соответствующем форсированному расходу. Наиболее опасными участками канала являются участки в насыпи и на косогоре, где часто наблюдаются просадки гребня ниже проектных отметок и имеются размывы бороздки от ливневых потоков. В начале процесс перелива происходит отдельными струйками, которые постепенно, размывая грунт, углубляют бороздки. Затем с увеличением переливающего расхода происходит образование прорана с размывом значительных масс грунта, что приводит к его углублению и расширению. На следующей стадии процесс образования прорана достигает дна канала и подошвы дамбы. В дальнейшем проран размывается только в ширину и постепенно стабилизируется.

В задачу расчета входит разработка методики определения риска аварии при переливе через гребень дамбы и образования прорана в дамбе.

На рисунке 8.4 приведена схема к расчету риска перелива через гребень и образования прорана в дамбе канала.



а – продольное сечение канала; б – образование прорана в дамбе канала;
в – поперечное сечение дамбы канала с прораном

Рисунок 8.4 – Схема к расчету риска перелива через гребень и образования прорана в дамбе канала

Методика расчета риска перелива через гребень дамбы заключается в следующем:

1 Вычисляется форсированный расход в канале $Q_{\text{форс}}$, м³/с:

$$Q_{\text{форс}} = k_{\text{форс}} \cdot Q_{\text{max}}, \quad (8.1)$$

где $k_{\text{форс}}$ – коэффициент форсировки, принимаемый в пределах 1,05–1,15;

Q_{max} – максимальный расход в канале при нормальной его работе, м³/с.

2 Определяется форсированная глубина в канале $h_{\text{форс}}$, м, методом подбора по коэффициенту форсировки $k_{\text{форс}}$ и графику $k = f(h)$:

$$h_{\text{форс}} = \frac{Q_{\text{форс}}}{\sqrt{i_0}}, \quad (8.2)$$

где i_0 – уклон дна канала.

3 Находится глубина канала до гребня дамбы $h_{\text{гр}}$, м:

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{форс}} + \Delta h, \quad (8.3)$$

где Δh – превышение гребня дамбы в канале над форсированным уровнем, принимаемое в пределах 0,3–0,6 м.

4 Рассчитывается гарантированный коэффициент надежности $K_{h_{\text{форс}}}^{\text{гар}}$ по формуле:

$$K_{h_{\text{форс}}}^{\text{гар}} = \frac{h_{\text{гр}} - m_{h_{\text{гр}}}}{h_{\text{форс}} + m_{h_{\text{форс}}}}, \quad (8.4)$$

где $m_{h_{\text{гр}}}$, $m_{h_{\text{форс}}}$ – суммарные максимальные отклонения соответственно глубины канала до гребня дамбы и форсированной глубины в канале, м³/с:

$$m_{h_{\text{гр}}} = \sigma_{h_{\text{гр}}} \cdot t_{\alpha}, \quad (8.5)$$

$$m_{h_{\text{форс}}} = \sigma_{h_{\text{форс}}} \cdot t_{\alpha}, \quad (8.6)$$

где $\sigma_{h_{гр}}$, $\sigma_{h_{форс}}$ – среднеквадратические отклонения соответственно глубины канала до гребня и форсированной глубины;

t_α – коэффициент Стьюдента.

5 Определяются среднеквадратические отклонения глубины канала до гребня $\sigma_{h_{гр}}$ и форсированной глубины $\sigma_{h_{форс}}$ при отсутствии статистических данных наблюдений [211]:

$$\sigma_{h_{гр}} = \frac{1}{6} \Delta h_{гр}, \quad (8.7)$$

$$\sigma_{h_{форс}} = \frac{1}{6} \Delta h_{форс}, \quad (8.8)$$

где $\Delta h_{гр}$, $\Delta h_{форс}$ – допуски глубины до гребня дамбы и форсированной глубины, м, принимаемой как:

$$\Delta h_{гр} \cong 0,1 h_{гр}; \Delta h_{форс} \cong 0,1 h_{форс}. \quad (8.9)$$

6 Устанавливается риск аварии при переливе через гребень [58]:

$$\lambda = \frac{\gamma_n}{K_{h_{форс}}^{гар}} \cdot \lambda_n, \quad (8.10)$$

где γ_n – коэффициент надежности, принимаемый для ГТС IV–III класса 1,10–1,15;

λ_n – нормативный допускаемый риск аварии, принимаемый по СП 58.13330.2012 [2], 1/год.

Далее рассмотрим методику расчета образования прорана при переливе через гребень дамбы. При этом наблюдается неустановившееся движение потока воды через проран с размывами грунта тела дамбы. В дальнейшем неустановившийся процесс движения потока и размыва прорана заменяем на ряд установившихся (стационарных) процессов в пределах малого приращения глубины прорана Δh за момент времени Δt . Таким образом, расчет по изложенной ниже методике ведется методом итераций.

За основу примем методику по РД 03-607-03 для жидких промышленных отходов [212].

Схема для расчета приведена на рисунке 8.4б, в.

1 Принимаем за начальные условия размыва при образовании прорана в дамбе следующие параметры: $h_0 = e_0 = 0,25$ м, где h_0 – начальная глубина воды в проране, м, e_0 – начальная ширина прорана, м.

2 Задавая приращение глубины прорана постоянным и равным $\Delta h \leq h_0$, определяется приращение ширины прорана Δe , м:

$$\Delta e = \Delta h \frac{e_0}{h_0 + \Delta h}, \quad (8.11)$$

где Δh – приращение глубины прорана, м.

3 Далее, задавая приращение размеров прорана (Δh и Δe), определяем глубину вытекающего потока через гребень дамбы h_i . Дальнейший расчет проводится путем последовательного задания новых параметров прорана и переливающего потока.

4 Производится определение параметров размыва прорана и потока за i -й расчетный промежуток времени:

- глубины прорана h_i , м:

$$h_i = h_{i-1} + \Delta h, \quad (8.12)$$

где h_{i-1} – глубина прорана в $i-1$ промежуток времени, м;

- ширины прорана ϵ_i , м:

$$\epsilon_i = \epsilon_{i-1} + \Delta\epsilon, \quad (8.13)$$

где ϵ_{i-1} – ширина прорана в $i-1$ промежутке времени, м;

- длины прорана l_i , м:

$$l_i = h_i(m_1 + m_2) + l_0, \quad (8.14)$$

где m_1, m_2 – коэффициенты заложения верхового и низового откосов;

l_0 – ширина гребня дамбы, м;

- глубины потока в проране y_i , м:

$$y_i = \frac{2}{3} H_{\Pi i}, \quad (8.15)$$

где $H_{\Pi i}$ – напор на водосливе (проране), м;

- напора на водосливе (проране):

$$H_{\Pi i} = H_{i-1} + \Delta h - \Delta H_{i-1}, \quad (8.16)$$

где H_{i-1} – уровень воды в канале, м;

ΔH_{i-1} – понижение уровня воды в канале, м.

5 Расход потока в проране Q_i , м³/с, определяется по формуле водослива с широким порогом [205]:

$$Q_i = m \cdot \epsilon_i \cdot \sigma_n \cdot \epsilon_i \sqrt{2g} H_i^{3/2}, \quad (8.17)$$

где m – коэффициент расхода водослива, принимаемый 0,30–0,34;

ϵ_i – коэффициент бокового сжатия, вычисляемый по формуле А. Р. Березинского [213]:

$$\epsilon_i = 1 - \frac{\alpha}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{P_i}{H_i}}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_i}{L} \left(1 - \frac{\epsilon_i}{L}\right)}, \quad (8.18)$$

где α – коэффициент, принимаемый равным $\alpha = 0,10$ – при плавном очертании прорана;

P_i – высота порога водослива (прорана) в i -й промежуток времени, м;

H_i – напор на пороге водослива (прорана) в i -й промежуток времени, м;

L – длина участка канала, принимаемая равной не менее 100 м;

σ_n – коэффициент подтопления водослива, принимаемый $\sigma_n = 1$ в виду отсутствия подтопления.

6 Определяется удельный расход потока в проране q_i , м²/с:

$$q_i = \frac{Q_i}{\epsilon_i} = m \cdot \epsilon_i \cdot \sqrt{2g} H_i^{3/2}. \quad (8.19)$$

7 Вычисляется скорость потока в проране U_i , м/с:

$$U_i = \frac{q_i}{H_i} = m \cdot \epsilon_i \cdot \sqrt{2g} H_i^{1/2}. \quad (8.20)$$

8 Неразрываемая скорость потока в проране для несвязного грунта определяется по формуле В. С. Кнороза (при $0,05 < d < 0,25$ мм) [212]:

$$U_{0i} = 0,71 \frac{\nu^{0,3} (g \cdot \rho_0)^{0,35} \cdot d^{0,05}}{\sqrt{0,0008 + (0,006 \cdot R_i^{-0,25})}}, \quad (8.21)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_0 – плотность воды, $\text{т}/\text{м}^3$;

d – средневзвешенный размер частиц грунта, м ;

R_i – гидравлический радиус прорана, м , который вычисляется за i -й промежуток времени для прямоугольного сечения:

$$R_i = \frac{e_i \cdot h_i}{e_i + 2h_i}. \quad (8.22)$$

9 Неразмывающая придонная скорость для связных грунтов U_{0i} , $\text{м}/\text{с}$, определяется по формуле Ц. Е. Мирцхулавы [214]:

$$U_{0i} = 1,25 \sqrt{\left(\frac{2m}{2,6\rho_0 n} [g(\rho_{\text{гр}} - \rho_0)d + 1,26 \cdot C_y^H K] \right)}, \quad (8.23)$$

где m – коэффициент условий работы, принимаем равным 1,0;

n – коэффициент перегрузки:

$$n = 1 + \frac{d}{(0,00005 + 0,3d)}, \quad (8.24)$$

где g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

$\rho_{\text{гр}}$ – плотность частиц грунта, $\text{т}/\text{м}^3$;

d – средний диаметр агрегатов (отрывающихся отдельностей) связного грунта (для супесей $d = 3$ мм, для суглинков $d = 4$ мм, для глины $d = 5$ мм);

C_y^H – нормативная усталостная прочность связного грунта на разрыв, Па ;

K – коэффициент однородности, принимаемый равным 0,5.

10 Гидравлическая крупность для размываемых грунтов в проране определяется в зависимости от диаметра частиц грунта по формулам:

- при $d \leq 0,1$ мм:

$$\omega_0 = \frac{gd^2\rho_0}{18 \cdot \nu}; \quad (8.25)$$

- при $0,1 \text{ мм} < d < 0,6 \text{ мм}$:

$$\omega_0 = d \left[\frac{g \cdot \rho_0}{11,2\sqrt{\nu}} \right]^{1/1,5}; \quad (8.26)$$

- при $0,6 \text{ мм} < d < 2,0 \text{ мм}$:

$$\omega_0 = \left[\frac{g \cdot d^{1,2} \rho_0}{4,4\nu^{0,2}} \right]^{1/1,8}; \quad (8.27)$$

- при $d \geq 2,0$ мм:

$$\omega_0 = 1,2\sqrt{g \cdot d \cdot \rho_0}. \quad (8.28)$$

11 Время размыва элементарного объема прорана Δt_i , с , определяется по формуле [212]:

$$\Delta t_i = \frac{2\rho_{\text{грс}} \cdot \Delta W_i}{\mu_i \cdot Q_i}, \quad (8.29)$$

где $\rho_{\text{грс}}$ – средняя плотность сухого грунта тела дамбы, $\text{т}/\text{м}^3$;

ΔW_i – увеличение объема размываемого грунта, м^3 :

$$\Delta W_i = 0,5(e_i \cdot h_i \cdot l_i - e_{i-1} \cdot h_{i-1} \cdot l_{i-1}), \quad (8.30)$$

где l_{i-1} – ширина гребня дамбы в $i-1$ промежутков времени, м;

μ_i – транспортирующая (размывающая) способность потока.

В зависимости от гидравлических параметров потока и диаметра частиц размываемого грунта они могут переноситься либо во взвешенном, либо в донном состоянии.

12 Определение транспортирующей способности потока (по РД 03-607-03):

- при скорости $U_i \geq 2,7 U_{0i}$ все частицы $d \leq 0,15$ мм переносятся во взвешенном состоянии, а величина μ_i находится по формуле:

$$\mu_i = \left(\frac{U_{KPi} - U_{0i}}{3\omega_0} \right)^4 \cdot \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} \cdot 0,01, \quad (8.31)$$

где U_{KPi} – критическая скорость потока, м/с, которая определяется по формулам:

1) при $h_i < H_{max}$

$$U_{KP} = 2,36 \cdot h_i^{0,15}; \quad (8.32)$$

2) при $h_i = H_{max}$

$$U_{KP} = 3,77 \cdot h_i^{0,2}, \quad (8.33)$$

где H_{max} – максимальная разница между отметкой гребня дамбы и отметкой дна прорана, до которой может вытекать вода из канала, м;

- при скорости $U_i < 2,7 U_{0i}$ все частицы грунта перемещаются по дну, величина μ_i определяется по формуле:

$$\mu_i = 0,002 \frac{U_i^3}{\sqrt{gd}} \left(1 - \frac{U_{0i}}{h_i} \right) \cdot \left(\frac{d}{h_i} \right)^{1,25}. \quad (8.34)$$

13 Объем воды, вытекающий из канала ΔV_i , м³, за время Δt_i , с, находим по зависимости:

$$\Delta V_i = Q_i \cdot \Delta t_i = \frac{2\rho_0 \Delta W_i}{\mu_i}. \quad (8.35)$$

14 Общий объем V_0 , м³, вытекающий за время $T = \sum \Delta t_i$, будет равен:

$$V_0 = \sum \Delta V_i. \quad (8.36)$$

15 Понижение уровня воды ΔH_i , м, на участке канала при отсутствии поступления с выше и ниже расположенных участков канала находим по формуле:

$$\Delta H_i = \frac{\Delta V_i}{F}, \quad (8.37)$$

где F – площадь водной поверхности на участке канала, м².

Расчет по данной методике ведется до того момента, когда V_i достигнет V_{max} , или величина транспортирующей способности становится меньше значения 0,003, т. е.

$$V_i = \sum \Delta V_i = V_{max} \quad (8.38)$$

или

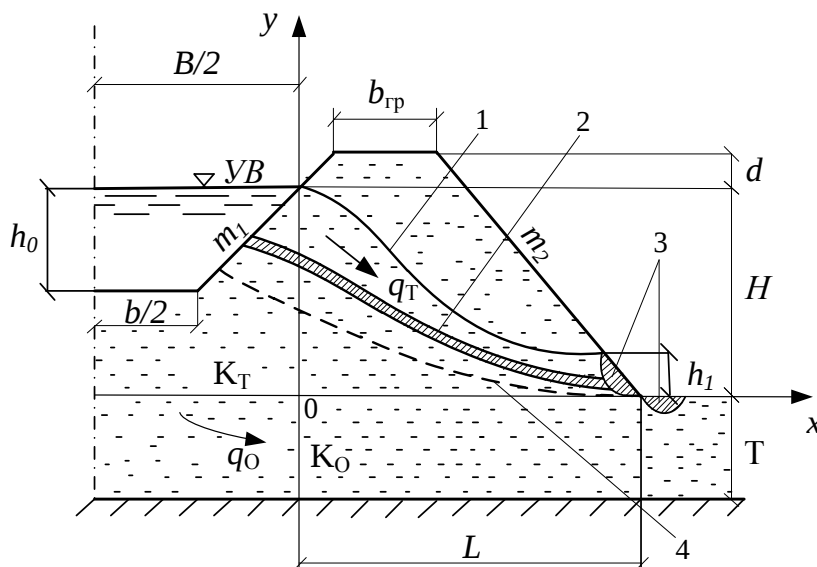
$$\mu_i < 0,003. \quad (8.39)$$

8.4 Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи и оценка риска возникновения аварийной ситуации

Механизм разрушения грунта дамбы непосредственно связан с увеличением действующего напора на участках канала в насыпи, вследствие чего повышаются градиенты напора фильтрационного потока на частицы грунта дамбы, и в случае их превышения допустимых (критических) значений происходит нарушение устойчивости сначала отдельных частиц грунта, а затем и их групп. В результате чего образуются ходы фильтрации, с постепенно перемещающимися потоком частицами грунта, обычно свойственных для несвязных (песчаных) грунтов или с разрушением массивов грунта, что характерно для связных (глинистых) грунтов.

В связи с этим расчет фильтрации через дамбу канала и оценка риска аварии вследствие фильтрационных деформаций представляет важную задачу при проектировании и эксплуатации каналов.

Для определения вероятного риска аварии крупного канала рассмотрим расчетную схему для наиболее опасного участка в насыпи (рисунок 8.5) [209, 210].



- 1 – кривая депрессии; 2 – вероятный сосредоточенный ход фильтрации в дамбе канала;
3 – вероятные зоны местных фильтрационных деформаций; 4 – линия разделения
фильтрационного потока

Рисунок 8.5 – Расчетная схема крупного канала в насыпи

Ввиду симметричности фильтрации из канала в расчетах учтем половину области фильтрации. Всю область фильтрации разделим на область фильтрации через тело дамбы канала с удельным фильтрационным расходом q_T и область фильтрации через дно и основание дамбы с удельным расходом q_0 .

Подобная задача ставилась К. Н. Анахаевым и др. [176, 177] для расчета фильтрации через тело и основание грунтовых плотин с разными отметками дна верхнего и нижнего бьефа с одинаковым грунтом.

При решении данной задачи воспользуемся известными решениями для однородных грунтовых плотин, полученных для случая водонепроницаемости основания [147, 149].

В отличие от этих решений применительно к каналам в насыпи найдены также необходимые расчетные формулы для водопроницаемого основания дамбы канала.

При этом будем учитывать дополнительное фильтрационное сопротивление под дном канала, что обусловлено значительной мощностью грунта между дном канала и основанием дамбы высотой $(H - h_0)$, приводя его к проницаемости основания [209].

Удельный расход фильтрационного потока через тело дамбы канала q_T , $\text{м}^3/\text{с}$, определяется по формуле, дополненной фильтрационным сопротивлением под дном канала в насыпи, ΔL_K :

$$q_T = K_T \frac{H^2 - h_1^2}{2(L_p - m_2 h_1) + \Delta L_K}, \quad (8.40)$$

$$\Delta L_K = (H - h_0) \cdot \Phi_1, \quad (8.41)$$

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{4(H - h_0)}{\pi \cdot b / 2} \text{ при } \frac{b}{2(H - h_0)} < 0,5, \quad (8.42)$$

где K_T – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала, $\text{м}/\text{сут}$;

H – действующий напор, м ;

h_1 – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос, м ;

L_p – ширина эквивалентного профиля дамбы канала по основанию, м :

$$L_p = \beta \cdot h_0 + L, \quad (8.43)$$

где β – коэффициент, зависящий от величины коэффициента заложения верхового откоса:

$$\beta = \frac{m_1}{2m_1 + 1}, \quad (8.44)$$

где m_1 , m_2 – коэффициенты заложения верхового и низового откосов;

h_0 – глубина воды в канале, м ;

L – длина участка дамбы от уреза воды до сопряжения низового откоса с ниже-расположенной территорией, м :

$$L = m_1 \cdot d + b_{\text{гр}} + m_2 (H + d), \quad (8.45)$$

где d – превышение гребня дамбы над уровнем воды в канале, м ;

$b_{\text{гр}}$ – ширина дамбы по гребню, м ;

ΔL_K – дополнительное фильтрационное сопротивление под дном канала, м ;

Φ_1 – фильтрационное сопротивление в безразмерной форме [215];

b – ширина канала по дну, м .

Учет дополнительного фильтрационного сопротивления под дном канала в насыпи ΔL_K позволит более точно найти фильтрационный расход через тело и основание дамбы, что подтверждено сопоставлением результатов расчета для дамбы канала в насыпи с данными, полученными по методике Е. А. Замарина [216, 217] в п. 8.8.

Высота выхода депрессионной кривой на низовой откос h_1 , м :

$$h_1 = \frac{L_p}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{m_2}\right)^2 - H^2}. \quad (8.46)$$

Расчетные ординаты кривой депрессии вычисляются по уравнению:

$$h_x = \sqrt{H^2 - \frac{2q_T}{K_T} \cdot x_i}, \quad (8.47)$$

где x_i – расстояние от начала координат до i -ой точки оси абсцисс, м .

Условие образования общих фильтрационных деформаций грунта тела дамбы

канала (например, в виде сосредоточенных фильтрационных ходов) согласно СП 39.13330.2012 [22] и СП 23.13330.2011 [218] запишем следующим образом:

$$J_{est,m}^T > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m}^T, \quad (8.48)$$

где $J_{est,m}^T$ – действующий средний градиент напора в теле дамбы канала;

$J_{cr,m}^T$ – критический средний градиент напора в теле дамбы канала;

γ_n – коэффициент надежности, принимаемый в зависимости от класса.

Действующий средний градиент напора по Р. Р. Чугаеву [74] будет равен:

$$J_{est,m}^T = \frac{H}{L + 0,4H}. \quad (8.49)$$

Критический средний градиент напора $J_{cr,m}^T$ принимается для песчаных грунтов равным 0,75–1, для супесей и суглинков – 1–4.

Удельный фильтрационный расход в основании дамбы канала с учетом дополнительного фильтрационного сопротивления под дном канала слоя мощностью $(H - h_0)_{np}$ q_0 , м³/с, составит:

$$q_0 = K_0 \cdot T \frac{H}{(H - h_0) \frac{K_0}{K_T} \cdot \Phi_1' + 0,88T + L_0}, \quad (8.50)$$

$$\Phi_1' = \frac{2}{\pi} \ln \left[\frac{4(H - h_0)}{\pi \cdot \sigma / 2} \cdot \frac{K_0}{K_T} \right], \quad (8.51)$$

$$L_0 = b_{гр} + (H + d) \cdot (m_1 + m_2), \quad (8.52)$$

где K_0 – коэффициент фильтрации грунта основания дамбы канала, м/сут;

T – мощность водопроницаемого основания, м;

Φ_1' – дополнительное фильтрационное сопротивление под дном канала;

L_0 – условная ширина дамбы по основанию, м.

Приведенную мощность слоя грунта под дном канала $(H - h_0)_{np}$, м, найдем из соотношения:

$$(H - h_0)_{np} = (H - h_0) \frac{K_0}{K_T}. \quad (8.53)$$

Общий удельный фильтрационный расход из канала в насыпи, q , м³/с, составит:

$$q = 2(q_T + q_0). \quad (8.54)$$

Условие образования общих фильтрационных деформаций основания представим в виде [22]:

$$J_{est,m}^O > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m}^O, \quad (8.55)$$

где $J_{est,m}^O$ – действующий средний градиент напора в основании дамбы канала;

$J_{cr,m}^O$ – критический средний градиент напора в основании дамбы канала.

Действующий средний градиент напора в основании находим по формуле:

$$J_{est,m}^O = \frac{H}{(H - h_0) \cdot \frac{K_0}{K_T} \cdot \Phi_1' + 0,88T + L_0}. \quad (8.56)$$

Условие образования местных фильтрационных деформаций грунта тела дамбы при выходе потока на низовой откос (например, в виде суффозии и выпора) $J_{est\max}^T$ запишем как [22]:

$$J_{est\max}^T > \frac{J_{cr}^T}{\gamma_n}, \quad (8.57)$$

где J_{cr}^T – критический средний градиент напора на выходе фильтрационного потока на низовой откос.

Значения местного критического градиента напора для песчаных грунтов равно 0,30, для глинистых грунтов – 1,0.

Максимальный местный градиент напора $J_{est\max}^T$ при выходе потока на низовой откос можно определить по следующей формуле:

$$J_{est\max}^T = \frac{\sqrt{H^2 - \frac{2q_T}{K_T}(L - m_2 \cdot h_1 - \Delta x_{\text{вых}})}}{\Delta x_{\text{вых}}}, \quad (8.58)$$

где $\Delta x_{\text{вых}}$ – расстояние по оси ОХ при выходе фильтрационного потока на низовой откос, принимаемое равным $(0,05 - 0,10)L$.

Риска разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов определяется по формуле:

$$\lambda_T = \frac{\gamma_n}{K_{H_{J_{est,m}^T}}^{\text{гар}}} \cdot \lambda_n, \quad (8.59)$$

где $K_{H_{J_{est,m}^T}}^{\text{гар}}$ – гарантированный коэффициент надежности тела дамбы;

$$K_{H_{J_{est,m}^T}}^{\text{гар}} = \frac{J_{cr,m}^T - m_{J_{cr,m}^T}}{J_{est,m}^T + m_{J_{est,m}^T}}, \quad (8.60)$$

$$m_{J_{cr,m}^T} = \sigma_{J_{cr,m}} \cdot t_\alpha, \quad m_{J_{est,m}^T} = \sigma_{J_{est,m}} \cdot t_\alpha, \quad (8.61)$$

где $m_{J_{cr,m}^T}$ – суммарное максимальное отклонение критического среднего градиента напора в теле дамбы;

$m_{J_{est,m}^T}$ – суммарное максимальное отклонение действующего среднего градиента напора в теле дамбы;

$\sigma_{J_{cr,m}}$, $\sigma_{J_{est,m}}$ – среднеквадратическое отклонение соответственно критического и среднего градиентов;

t_α – коэффициент Стьюдента;

λ_n – нормативный риск, определяемый в зависимости от класса сооружения для основного вида нагрузок [2].

Оценка риска разрушения основания дамбы канала вследствие общих фильтрационных деформаций определяется по формулам:

$$\lambda_o = \frac{\gamma_n}{K_{H_{J_{est,m}^o}}^{\text{гар}}} \lambda_n, \quad (8.62)$$

где $K_{H_{J_{est,m}^o}}^{\text{гар}}$ – гарантированный коэффициент надежности основания дамбы;

$$K_{H_{J_{est,m}^o}}^{гар} = \frac{J_{cr,m}^o - m_{J_{cr,m}^o}}{J_{est,m}^o + m_{J_{est,m}^o}}, \quad (8.63)$$

где $m_{J_{cr,m}^o}$ – суммарное максимальное отклонение критического среднего градиента напора в основании дамбы;

$m_{J_{est,m}^o}$ – суммарное максимальное отклонение действующего среднего градиента напора в основании дамбы.

Общий риск разрушения дамбы канала составит сумму рисков разрушения тела и основания дамбы канала:

$$\lambda = \lambda_T + \lambda_O. \quad (8.64)$$

Если значение общего риска разрушения дамбы канала превысит значение нормативного риска, то это свидетельствует о большой вероятности возникновения аварийной ситуации.

Приведем примеры расчета риска разрушения дамбы канала, проложенного в насыпи, по предложенной выше методике и полученным формулам. Исходные данные и результаты расчетов приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты расчета фильтрационных характеристик и риска разрушения дамбы крупного канала на участке в насыпи

Исходные данные и определяемые величины	Результат расчета		
1	2		
1 Исходные данные к расчетному случаю	$H = 20$ м, $m_1 = 3$, $m_2 = 2$, м, $d = 1$ м, $b_{гр} = 8$ м, $T = 10$ м, $K_T = 1$ м/сут, $K_O = 0,3$ м/сут, $h_0 = 5$ м, $b = 6$ м, $\gamma_n = 1,1$		
Удельные фильтрационные расходы, м ² /сут	q_T	q_O	q
	3,620	0,485	7,930
Высота выхода кривой депрессии на низовой откос h_1 , м	9,08		
Критические средние градиенты	$J_{cr,m}^T$	$J_{cr,m}^O$	—
	1,0	1,0	—
Действующие средние градиенты	$J_{est,m}^T$	$J_{est,m}^O$	—
	0,328	0,162	—
Максимальный местный градиент напора $J_{est,max}^T$	1,670		
Риск разрушения тела и основания дамбы канала, $\times 10^{-3}$ 1/год	λ_T	λ_O	λ
	1,87	0,89	2,76
Нормативный риск для IV класса сооружений, λ_n , $\times 10^{-3}$ 1/год	5,0		
2 Исходные данные к расчетному случаю	$H = 30$ м, $m_1 = 2$, $m_2 = 1$, м, $d = 0,5$ м, $b_{гр} = 4$ м, $T = 20$ м, $K_T = 1$ м/сут, $K_O = 0,6$ м/сут, $h_0 = 6$ м, $b = 10$ м, $\gamma_n = 1,2$		

Продолжение таблицы 8.2

1	2		
Удельные фильтрационные расходы, $\text{м}^2/\text{сут}$	q_T	q_o	q
	9,23	2,88	24,2
Высота выхода кривой депрессии на низовой откос h_1 , м	14,7		
Критические средние градиенты	$J_{cr,m}^T$	$J_{cr,m}^O$	—
	0,75	1,0	—
Действующие средние градиенты	$J_{est,m}^T$	$J_{est,m}^O$	—
	0,632	0,240	—
Максимальный местный градиент напора $J_{est,max}^T$	2,65		
Риск разрушения тела и основания дамбы канала, $\times 10^{-4}$ 1/год	λ_T	λ_o	λ
	5,23	1,49	6,72
Нормативный риск λ_n для II класса сооружений, $\times 10^{-4}$ 1/год	5,0		

На основании анализа результатов расчета для первого расчетного случая можно заключить следующее: риск разрушения дамбы канала по средним градиентам не превышает нормативный.

Однако не выполняется условие местной фильтрационной прочности грунта при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию, что свидетельствует о возможности локальных разрушений грунта основания за дамбой.

Анализ результатов для второго расчетного случая свидетельствует о том, что здесь будут образовываться общие фильтрационные деформации в виде сосредоточенных ходов фильтрации.

Возможны также локальные разрушения грунта основания за дамбой при выходе фильтрационного потока. Риск разрушения дамбы канала превышает нормативный, что свидетельствует о большой вероятности возникновения аварийной ситуации.

Отметим, что изложенная выше методика позволяет оценить риск разрушения дамб крупного канала вследствие фильтрационных деформаций для наиболее опасных его участков, проходящих в насыпи.

На основании проведенных расчетов могут быть заблаговременно разработаны предупредительные мероприятия по исключению вероятности аварии крупного канала.

8.5 Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи с горизонтальным трубчатым дренажем и оценка риска возникновения аварийной ситуации

Для обеспечения устойчивости откосов дамб каналов из грунтовых материалов применяется горизонтальный дренаж, который обеспечивает прием и отвод профильтровавшейся через тело или основание грунтовой дамбы воды, то есть задачей дренажа является понижение отметок кривой депрессии и недопущение выхода фильтрационного потока на низовой откос.

Расчет фильтрации из канала в насыпи с горизонтальным трубчатым дренажем со стороны низового откоса у основания (рисунок 8.6) несколько отличается от пре-

дыдущей схемы, так как кривая депрессии имеет другой вид и не выходит на низовой откос [209, 210]. Соответственно удельный фильтрационный расход через тело дамбы канала с горизонтальным трубчатым дренажем q_T , м³/с, будет рассчитываться по следующей зависимости:

$$q_T = K_T \frac{H^2}{2L_p + \Delta L_K}, \quad (8.65)$$

где L_p – ширина эквивалентного профиля дамбы по основанию, м:

$$L_p = L_d + \Delta L, \quad (8.66)$$

где L_d – расстояние от уреза воды в канале до оси трубчатого дренажа, м;

ΔL – ширина эквивалентного профиля верхового откоса канала от дна до уреза воды, м:

$$\Delta L = \beta \cdot h_0, \quad (8.67)$$

где β – коэффициент, зависящий от величины коэффициента заложения верхового откоса;

h_0 – глубина воды в канале, м.

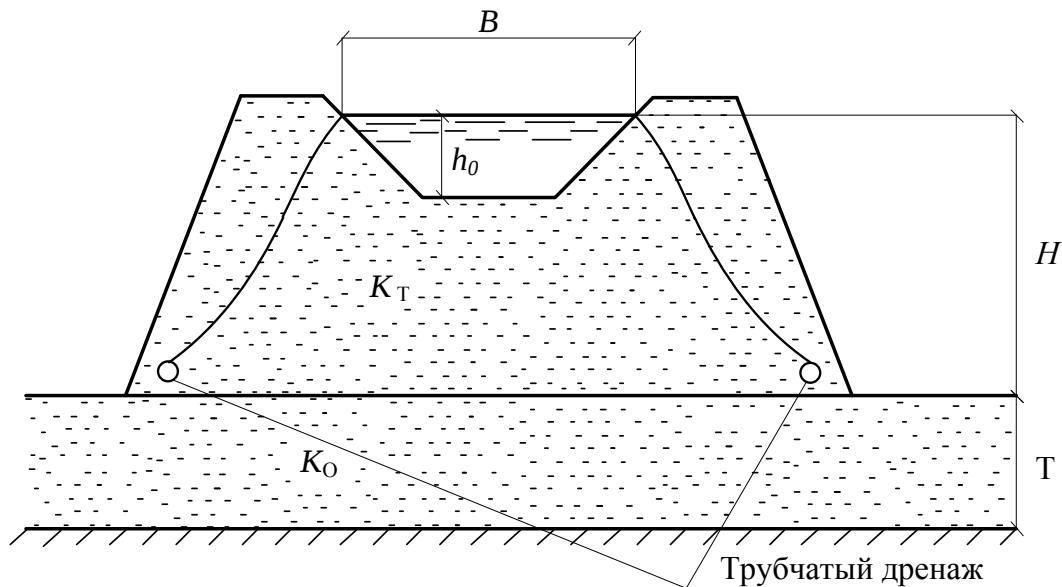


Рисунок 8.6 – Схема фильтрации из канала в насыпи с горизонтальным трубчатым дренажем

Уравнение кривой депрессии имеет вид:

$$h_{x_i} = \sqrt{\frac{2q_T}{K_T} \cdot (L_d - x_i)}, \quad i = 1-10, \quad (8.68)$$

где x_i – расчетная абсцисса кривой депрессии.

Удельный фильтрационный расход в основании дамбы канала, q_o , м³/с, равен:

$$q_o = K_O \cdot T \frac{H}{(H - h_0) \frac{K_O}{K_T} \cdot \Phi'_1 + 0,88T + L'_O}, \quad (8.69)$$

$$L'_O = m_1(h_0 + d) + b_{гр} + l_{др}, \quad (8.70)$$

где L'_0 – ширина дамбы по основанию, м;

$l_{др}$ – расстояние от гребня плотины до начала дренажа, м.

Суммарный удельный фильтрационный расход из канала в насыпи с горизонтальным трубчатым дренажем определяется по приведенной выше формуле (8.54).

Расчет фильтрационной прочности выполняется аналогично каналу в насыпи без дренажа по соотношениям (8.49) и (8.56).

Риск разрушения тела дамбы и основания вычисляется по формулам (8.59) и (8.62).

8.6 Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи с облицовкой и оценка риска возникновения аварийной ситуации

В настоящее время значительная часть магистральных каналов на некоторых участках выполнена в облицовке, поэтому возникает необходимость оценки надежности работы таких участков с точки зрения фильтрации.

Как известно, применение противофильтрационных облицовок рекомендуется в том случае, если ожидаемые фильтрационные потери будут больше допустимых потерь, и если фильтрация из канала будет сопровождается подъемом уровня грунтовых вод, вызывающих подтопление и засоление орошаемых земель.

В случае фильтрации из канала с облицовкой при отсутствии дренажа и условии залегания уровня грунтовых вод на поверхности прилегающей территории (рисунок 8.7), фильтрационный расход для всего сечения канала q , м³/с, определяется с учетом фильтрационного сопротивления на гидродинамическое несовершенство канала и дополнительного сопротивления, обусловленного применением противофильтрационной облицовки по следующей формуле [166]:

$$q = \frac{2H \cdot T'}{\Phi_K + \Phi_{obl} + \sqrt{\frac{T' \cdot Z_0}{\epsilon_n}}}, \quad (8.71)$$

где H – действующий напор, м;

T' – средняя проводимость водоносной толщи, м²/сут:

$$T' = K_T \left(\frac{H}{2} \right) + K_O \cdot T; \quad (8.72)$$

Φ_K – фильтрационное сопротивление на гидродинамическое несовершенство канала:

$$\Phi_K = \Phi'_K + 2\Phi''_K, \quad (8.73)$$

где T – мощность основания, м;

Φ'_K , Φ''_K – дополнительные сопротивления на несовершенство канала:

$$\Phi'_K = \alpha \frac{K_O}{K_T} (H + T) \cdot f'_K - \frac{K_T - K_O}{K_T} H \cdot f'_{KT}, \quad (8.74)$$

$$\Phi''_K = \beta \frac{K_O}{K_T} (H + T) \cdot f''_K - \frac{K_T - K_O}{K_T} H \cdot f''_{KT}, \quad (8.75)$$

где α , β – поправочные коэффициенты, определяемые из графиков А. Я. Олейника [219];

f'_K , f''_K , f'_{KT} , f''_{KT} – параметры, определяемые по графикам А. Я. Олейника [219];

Φ_{obl} – фильтрационное сопротивление, обусловленное применением противо-

фильтрационной облицовки;

Z_0 – критическая глубина залегания уровня грунтовых вод при отсутствии испарения с поверхности грунтовых вод;

ε_n – интенсивность испарения с поверхности почвы.

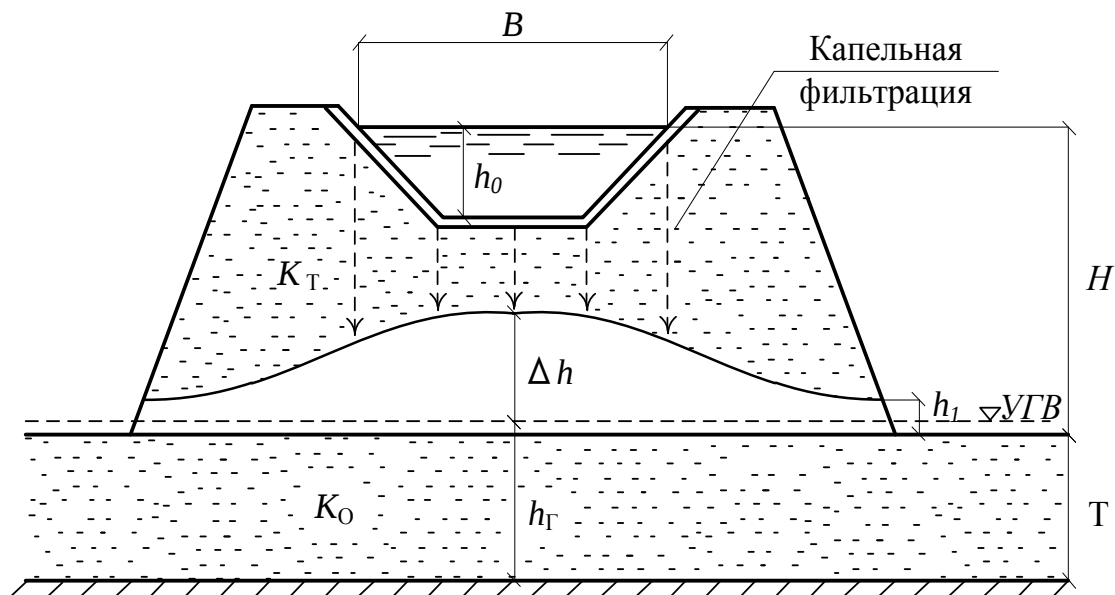


Рисунок 8.7 – Схема фильтрации из канала с облицовкой при отсутствии дренажа и условия залегания уровня грунтовых вод на поверхности прилегающей территории

Оценка фильтрационной прочности грунта тела и основания дамбы облицованного канала производится аналогично расчетной схеме канала в насыпи без дренажа, рассмотренной выше.

8.7 Расчет фильтрации через дамбу канала на косогоре и оценка риска возникновения аварийной ситуации

Участки каналов на косогоре встречаются реже, чем участки в насыпи, однако они не менее опасны, так как уровень воды в канале значительно превышает отметки прилегающей территории и фильтрация, в таком случае, будет происходить в основном через однобортную дамбу и ее основание.

Примером таких участков может служить головной участок БСК, который практически весь (27 км) проходит по косогору.

Фильтрация из канала на косогоре с водопроницаемым основанием мощностью T (рисунок 8.8) будет происходить, как уже говорилось, через нижнюю однобортную дамбу и ее основание, имеющее наклон поверхности под углом α . Величиной фильтрации через верхнюю дамбу, как правило, малой высоты, из-за наклона поверхности косогора можно пренебречь [169].

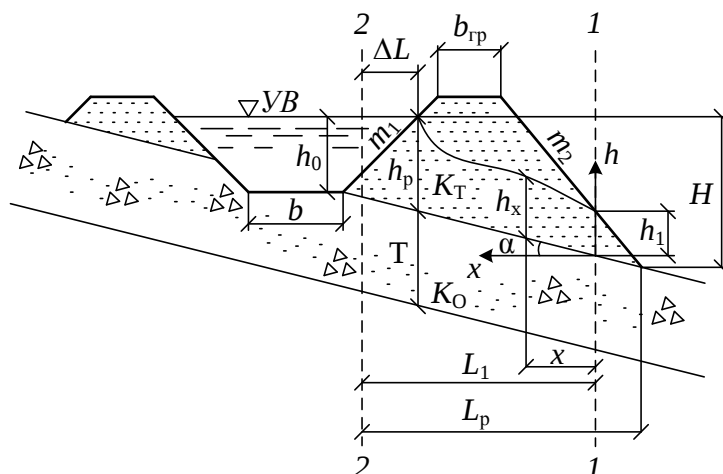


Рисунок 8.8 – Расчетная схема канала на косогоре

Для расчета фильтрации в теле и основании дамбы используем приближенное решение В. П. Недриги [147] для двух фрагментов, разделенных сечением 1–1. Сечение 2–2 принимается на расстоянии ΔL от уреза воды.

Суммарный удельный фильтрационный расход через тело q_T , м³/с, и основание q_O , м³/с, дамбы канала на косогоре определяем по формулам:

$$q_T = K_T \left(\frac{h_p^2 - h_1^2}{2L_1} + i \frac{h_p + h_1}{2} + T \frac{K_O}{K_T} \cdot \frac{h_p + i \cdot L_1 - h_1}{L_1 + \Delta L_K} \right) \cos \alpha, \quad (8.76)$$

$$q_O = A \cdot h_1 + K_O \cdot T \left(i + \frac{h_1}{B \cdot h_1 + D} \right), \quad (8.77)$$

где K_T – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала, м/сут;

h_p – расстояние от уреза воды до подошвы дамбы, м;

h_1 – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос, м;

L_1 – ширина эквивалентного профиля основания дамбы от сечения 2–2 до выхода кривой депрессии на низовой откос, м, определяемая по формуле:

$$L_1 = L_p - \frac{m_2}{1 - i \cdot m_2} h_p, \quad (8.78)$$

где L_p – ширина эквивалентного профиля дамбы канала от сечения 2–2 до сопряжения низового откоса с нижерасположенной территорией, м;

m_2 – заложение низового откоса дамбы;

i – уклон основания насыпной дамбы, $i = \tan \alpha$;

T – мощность водопроницаемого основания дамбы, м;

K_O – коэффициент фильтрации грунта основания дамбы канала, м/сут;

ΔL_K – дополнительное фильтрационное сопротивление под дном канала, м, определяемое по формуле:

$$\Delta L_K = h_0 \cdot \Phi_1; \quad \Phi_1 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{4 \cdot h_0}{\pi \cdot b}, \quad (8.79)$$

где h_0 – глубина воды в канале, м;

Φ_1 – фильтрационное сопротивление в безразмерной форме;

b – ширина канала по дну, м;

A, B, D – расчетные параметры основания дамбы, определяемые по формулам:

$$A = K_T(i + \operatorname{tg}\beta), \quad B = \frac{m_2}{(1 - i \cdot m_2) \cdot \cos\alpha} + \sin\alpha, \quad D = T(0,5 - \operatorname{tg}\alpha), \quad \beta = \arctg\left(\frac{1}{m_2}\right) - \alpha, \quad (8.80)$$

где α – угол наклона основания насыпной дамбы.

Решение двух уравнений (8.77) и (8.78) находим путем подбора или графически путем пересечения двух кривых, вычисляемых при различных значениях h_1 .

Отличием данных формул от известного решения В. П. Недриги является то, что в уравнении (8.77) учитывается дополнительное фильтрационное сопротивление ΔL_K .

В случае водонепроницаемого основания под дамбой канала, когда грунты основания представляют маловодонепроницаемые глинистые грунты или скальные нетрещиноватые породы, расчетная формула будет иметь вид:

$$q_T = K_T \cdot \left(\frac{h_p^2 - h_1^2}{2L_1} + i \frac{h_p + h_1}{2} \right) \cos\alpha. \quad (8.81)$$

Действующий средний градиент напора в теле дамбы $J_{\text{est},m}^T$ для оценки возможности образования общих фильтрационных деформаций в виде сосредоточенных ходов фильтрации найдем по формуле Р. Р. Чугаева [74]:

$$J_{\text{est},m}^T = \frac{H}{L_p - \Delta L + 0,4H}, \quad (8.82)$$

где H – действующий напор, м:

$$H = h_p + i(L_p - \Delta L), \quad (8.83)$$

где ΔL – ширина эквивалентного верхового откоса дамбы канала от сечения 2–2 до уреза воды, м.

Действующий средний градиент напора в основании дамбы канала $J_{\text{est},m}^O$ можно найти по формуле с учетом дополнительных фильтрационных сопротивлений канала ограниченной ширины b :

$$J_{\text{est},m}^O = \frac{H}{h_0 \cdot \Phi_1' + 0,88 \cdot T + L_0}, \quad (8.84)$$

где L_0 – условная ширина дамбы по основанию, м:

$$L_0 = b_{\text{гр}} + (h_0 + d) \cdot m_1 + (H + d) \cdot m_2. \quad (8.85)$$

Максимальный выходной градиент напора при выходе потока на низовой откос дамбы $J_{\text{est,max}}^T$ определим по формуле, полученной Ю. М. Косиченко и Д. В. Баклановой [169]:

$$J_{\text{est,max}}^T = \frac{\left[\sqrt{\left(h_1 + T \frac{K_0}{K_T} - i \frac{0,1(L_1 - \Delta L)}{2} \right)^2 + \frac{0,2(L_1 - \Delta L)}{\cos\alpha} \cdot \frac{q}{K_T} - T \frac{K_0}{K_T} + i \frac{0,1(L_1 - \Delta L)}{2}} \right]}{0,1(L_1 - \Delta L)}. \quad (8.86)$$

Максимальный выходной градиент напора в основании при выходе потока за дамбой $J_{\text{est,max}}^O$ вычислим по зависимости:

$$J_{\text{est,max}}^{\text{O}} = \frac{H}{0,05\pi L_{\text{O}}} . \quad (8.87)$$

Оценка риска разрушения нижней дамбы канала вследствие фильтрационных воздействий на косогоре проводится также как и для канала в насыпи.

Пример расчета риска разрушения дамбы крупного канала на косогоре приведен в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Результаты расчета риска разрушения потенциально опасных участков канала на косогоре

Исходные данные	Результат расчета						
	q м ² /сут	$J_{\text{est,m}}^{\text{T}}$	$J_{\text{est,m}}^{\text{O}}$	$J_{\text{est,max}}^{\text{T}}$	$J_{\text{est,max}}^{\text{O}}$	λ	$\lambda_{\text{н}}$
$H = 20$ м, $m_1 = 2$, $m_2 = 3$, $d = 1$ м, $b_{\text{гр}} = 7$ м, $T = 15$ м, $\alpha = 20^\circ$, $h_0 = 5$ м, $K_{\text{T}} = 1$ м/сут, $K_{\text{O}} = 0,3$ м/сут, $\gamma_n = 1,1$	4,46	0,37	0,24	0,59	1,72	3,37	5,0

Для участка канала на косогоре с водопроницаемым основанием расчеты показали возможность появления локальных разрушений грунта основания дамбы при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию.

8.8 Сопоставление результатов расчета для дамбы канала в насыпи с известными методами

Для оценки достоверности результатов по методике авторов были проведены экспериментальные исследования методом электро моделирования, а также выполнены расчеты по известному методу эквивалентного профиля Е. А. Замарина [216, 217].

8.8.1 Моделирование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи методом электро моделирования

Для сравнения результатов теоретических исследований с экспериментальными данными проводились исследования методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) для различных значений высоты насыпи.

Исследования проводились на установке ЭГДА-9/60 в лаборатории фильтрационных исследований кафедры гидравлики и инженерной гидрологии НИМИ им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» по методике изучения безнапорного движения фильтрационного потока [117].

Для выполнения моделирования методом ЭГДА было изготовлено четыре (по числу опытов) электрические модели на электропроводной бумаге с сопротивлением $R = 4000$ Ом (рисунок 8.9).



Рисунок 8.9 – Электрическая модель канала в насыпи, выполненная на электропроводной бумаге

Применение метода ЭГДА позволяет построить гидродинамическую сетку движения и определить удельный фильтрационный расход [208].

Исследования проводились в следующей последовательности:

- исследование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи при $H = 1$ усл. ед., $h_0 = 0,25$ усл. ед. с определением положения кривой депрессии и построением гидродинамической сетки;

- исследование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи при $H = 1$ усл. ед., $h_0 = 0,5$ усл. ед. с определением положения кривой депрессии и построением гидродинамической сетки;

- исследование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи при $H = 1$ усл. ед., $h_0 = 0,75$ усл. ед. с определением положения кривой депрессии и построением гидродинамической сетки;

- исследование задачи безнапорной фильтрации из канала в насыпи при $H = 1$ усл. ед., $h_0 = 1$ усл. ед. с определением положения кривой депрессии и построением гидродинамической сетки.

После проведения исследований по гидродинамической сетке определялся удельный фильтрационный расход $\frac{q}{k}$, м²/сут (для расчета принимался пояс равного напора):

$$\frac{q}{k} = \Delta h \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l}{\Delta S}, \quad (8.88)$$

где Δh – напор, который гасится в пределах каждого пояса давления, м:

$$\Delta h = 0,1 \cdot H, \quad (8.89)$$

где H – действующий напор, м;

Δl – расстояние между смежными линиями тока, м;

ΔS – расстояние между смежными эквипотенциалами, м.

Результаты экспериментальных исследований по методу ЭГДА, а также по методу автора в относительных величинах приведены в таблице 8.4.

Таблица 8.4 – Сравнение расчетных значений приведенного фильтрационного расхода с базовыми данными гидродинамических сеток

Параметр земляной дамбы при $H = 1$ усл. ед.	Приведенный фильтрационный расход q/k		Отклонение результатов δ , %
	методом электромоделирования	методом авторов	
$H = 1, h_0 = 0,25, m_1 = 2, m_2 = 1, d = 0,1, b_{гр} = 0,8, T = 1, K_T = K_O = 1, b/2 = 0,3$	0,403	0,393	2,48
$H = 1, h_0 = 0,5, m_1 = 2, m_2 = 1, d = 0,1, b_{гр} = 0,8, T = 1, K_T = K_O = 1, b/2 = 0,3$	0,430	0,408	5,12
$H = 1, h_0 = 0,75, m_1 = 2, m_2 = 1, d = 0,1, b_{гр} = 0,8, T = 1, K_T = K_O = 1, b/2 = 0,3$	0,438	0,418	4,46
$H = 1, h_0 = 1, m_1 = 2, m_2 = 1, d = 0,1, b_{гр} = 0,8, T = 1, K_T = K_O = 1, b/2 = 0,3$	0,398	0,410	3,02

Сопоставление результатов расчета по методике автора с результатами полученными по методу ЭГДА (при одинаковых коэффициентах фильтрации в теле и основании дамбы канала) показало близкие значения с расхождением в пределах 2,48–5,12 %, что свидетельствует о их достоверности и возможности применения предлагаемой методики на практике.

Однако при увеличении высоты дамбы более 5 м и соотношения коэффициентов фильтрации грунта тела и основания расхождение результатов будет возрастать до 20–40 %. Ввиду этого авторы считают возможным применение методов расчета фильтрации плотин для каналов в невысоких насыпях до 5 м, а в насыпях свыше 5 м – методику авторов по уточненным формулам, изложенным выше.

8.8.2 Сопоставление результатов расчета для дамбы канала в насыпи с методом Е. А. Замарина

В методе Е. А. Замарина используются приближенные фильтрационные уравнения для основных типов земляных плотин. Эти уравнения имеют простой математический вид, легко решаются и не требуют трудоемких вычислительных операций. В то же время достоверность результатов подтверждается многочисленными лабораторными опытами на моделях в фильтрационных лотках.

В методе Е. А. Замарина реальный профиль земляной плотины заменяется расчетным, эквивалентным в фильтрационном отношении профилем с вертикальным верховым откосом, и фильтрационный расход через тело плотины определяется по формуле [216, 217]:

$$\frac{q_T}{K_T} = \frac{H_1^2 - h_1^2}{2(L - m_2 h_1)}, \quad (8.90)$$

где q_T – расход фильтрационного потока через тело плотины, м³/с;

K_T – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала, м/сут;

H_1 – действующий напор, м;

h_1 – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос, м;

L – длина участка дамбы от уреза воды до сопряжения низового откоса с ниже-расположенной территорией, м;

m_2 – коэффициент заложения низового откоса.

Высота выхода депрессионной кривой рассчитывалась по формуле (8.43), приведенной в п. 8.4.

Депрессионная кривая строится по зависимости:

$$y = \sqrt{H^2 - \frac{2q_T}{K_T} \cdot x}, \quad (8.91)$$

где y , x – текущие координаты кривой депрессии;

H – действующий напор, м;

q_T – расход фильтрационного потока через тело плотины, м³/с;

K_T – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала, м/сут.

Для расчета фильтрационного расхода через тело дамбы канала по методике авторов использована формула (8.41), для расчета высоты выхода депрессионной кривой использовалась вышеприведенная формула (8.47).

Максимальный местный градиент напора при выходе потока на низовой откос $J_{\text{est,max}}^T$ рассчитывался по формуле (8.88).

Исходные данные для расчета приняты аналогично, как и в первом примере п. 8.4 (таблица 8.2).

Сводные результаты расчетов по предложенной авторами методике и по методу эквивалентного профиля Е. А. Замарина приведены в таблице 8.5.

Таблица 8.5 – Сводные результаты расчетов

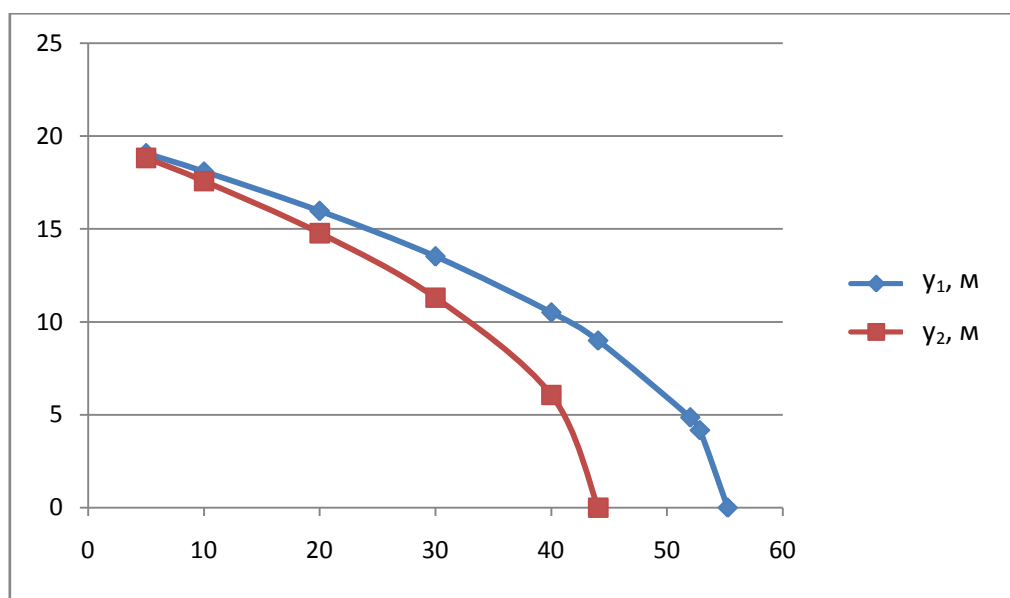
Определяемая величина	Результат расчета по предложенной методике автора	Результат расчета по методу эквивалентного профиля Е. А. Замарина	Расхождение данных, полученных по методу авторов и методу Е. А. Замарина δ , %
Исходные данные к расчетному случаю: $H = 20$ м, $m_1 = 3$, $m_2 = 2$, $b_{\text{гр}} = 8$ м, $T = 10$ м, $K_T = 1$ м/сут, $K_O = 0,3$ м/сут, $h_0 = 5$ м, $b = 6$ м, $\gamma_n = 1,1$			
q_T , м ² /сут	3,62	4,54	–25,4
q_O , м ² /сут	0,48	0,48	–
q , м ² /сут	4,10	5,02	–22,4
h_1 , м	9,08	9,08	0
$J_{\text{est,max}}^T$	2,574	1,125	56,29

Рассчитанные по приведенным формулам координаты кривых депрессий приведены в таблице 8.6, где y_1 – ордината кривой депрессии, полученная по методу авторов, y_2 – ордината кривой депрессии, полученная по методу Е. А. Замарина.

Таблица 8.6 – Координаты кривых депрессии

x , м	5	10	20	30	40	44,052	52	52,85	55,248
y_1 , м	19,07	18,1	15,97	13,52	10,51	9	4,85	4,17	0
y_2 , м	18,83	17,58	14,78	11,3	6,07	0	–	–	–

По полученным координатам построены кривые депрессии, которые представлены на рисунке 8.10.



y_1 – по методу авторов; y_2 – по методу Е. А. Замарина

Рисунок 8.10 – Кривые депрессии, полученные по методикам Ю. М. Косиченко и Е. А. Замарина

Несмотря на полученные достаточно сходимые результаты расчетов по методам авторов и Е. А. Замарина, имеются существенные расхождения между значениями удельного фильтрационного расхода через тело канала в насыпи по методу авторов с результатами расчета по методу Е. А. Замарина.

Так по предложенной методике $q_T = 3,62 \text{ м}^2/\text{сут}$, а по методу Е. А. Замарина – $q_T = 4,54 \text{ м}^2/\text{сут}$, т. е. удельные расходы отличаются на 25,4 %, что объясняется учетом в первом случае дополнительного фильтрационного сопротивления под дном канала мощность $(H - h_0) = 10 \text{ м}$.

Удельные фильтрационные расходы в основании q_0 по этим методам получены практически одинаковыми, а общие расходы через тело и основание отличаются на 22,4 %.

Таким образом, представленный анализ расчета по двум разным методикам свидетельствует о том, что использование для расчета дамб каналов в насыпи известных методик расчета фильтрации в грунтовых плотинах при высоте насыпи больше 5 м дает значительное отклонение, достигающее 22,4–25,4 %.

9 РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА КАНАЛЕ

9.1 Применение теории подобия и размерностей для решения фильтрационных задач

Теория подобия – это учение об условиях подобия различных объектов (физических явлений, процессов, аппаратов, систем), отличающихся масштабами, геометрией или физической природой. Теория подобия опирается на учение о размерностях физических величин и служит основой физического моделирования. В основные задачи теории подобия и размерностей входит установление критериев подобия разных объектов, изучение их свойств с помощью этих критериев, определение возможности обобщения результатов решения конкретных задач при отсутствии способов нахождения их полных решений [220, 221].

Успехи в развитии теории подобия и размерностей связаны с именами И. Ньютона, Р. Бэкингема, Ж. Фурье, Дж. Рэлея, Т. Афанасьевой-Эренфест, П. Бриджмена, М. В. Кирпичева, М. Рябушинского, А. А. Гухмана [222], Л. И. Седова [223, 224] и др.

Теории подобия и размерностей в последнее время получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Общий вывод теории размерностей, известный под названием π -теоремы, широко освещен в трудах [222–226]. Основное правило, которое должно соблюдаться при использовании данной теории – факторы должны быть не коррелируемыми, то есть независимыми, но допускается их зависимость, если она не линейна.

Методы теории подобия и размерностей часто применяются в подземной гидравлике и гидромеханике, в частности при решении задач установившейся фильтрации, они оказались полезными еще при выводе основного закона фильтрации – закона Дарси [227].

9.2 Постановка задачи

В России вопросами фильтрации через земляные дамбы занимались такие видные ученые, как А. Н. Костяков [228], В. П. Недрига [147], К. Н. Анахаев [176, 177], Н. Н. Веригин [220], С. Ф. Аверьянов [229], П. Я. Полубаринова-Кочина [230] и др.

Фильтрация воды через земляные плотины играет весьма важную роль. Статистика показывает, что более половины аварий земляных плотин произошло вследствие появившихся фильтрационных деформаций. Поэтому при проектировании и эксплуатации земляных плотин необходимо выполнять фильтрационные расчеты, определять величину градиента фильтрационного потока, фильтрационный расход через тело плотины и ее основание и следить за положением кривой депрессии в теле плотины.

В связи с этим, объектом исследований выбран участок магистрального канала, проходящий в насыпи, из грунта с удельным весом от 16 до 26 кН/м³ и с площадью живого сечения потока ω от 15 до 150 м².

Целью исследований являлось определение зависимостей для длины сосредоточенного хода фильтрации и градиента напора в теле дамбы канала в насыпи.

Как известно, водонасыщение грунтов и фильтрация из канала зависит от структуры грунтов (пористости, трещиноватости, удельного веса грунта). В связи с этим, расчет фильтрации из канала следует выполнять с учетом физико-механических свойств грунтов, слагающих тело дамбы и основание канала в насыпи.

На характер фильтрации будут также влиять конструктивные особенности канала (заложение откосов, площадь поперечного сечения и т. д.), действующий напор, а также такие параметры, как вязкость воды и ее удельный вес.

Проведенный анализ факторов, влияющих на образование фильтрационных деформаций в дамбе канала, проходящего в насыпи, позволил выявить основные переменные, от которых зависит градиент напора в дамбе канала и длина сосредоточенного хода фильтрации.

9.3 Описание модели аварийной ситуации на канале

При определении зависимостей для градиента напора J и длины сосредоточенного хода фильтрации $l_{с.х.}$ от исследуемых факторов была рассмотрена модель аварийной ситуации на участке дамбы канала в насыпи, где с увеличением действующего напора повышается градиент напора фильтрационного потока на частицы грунта тела и основания дамбы, и в случае превышения градиента напора критического значения происходит нарушение устойчивости грунта дамбы с образованием ходов сосредоточенной фильтрации (рисунок 9.1).

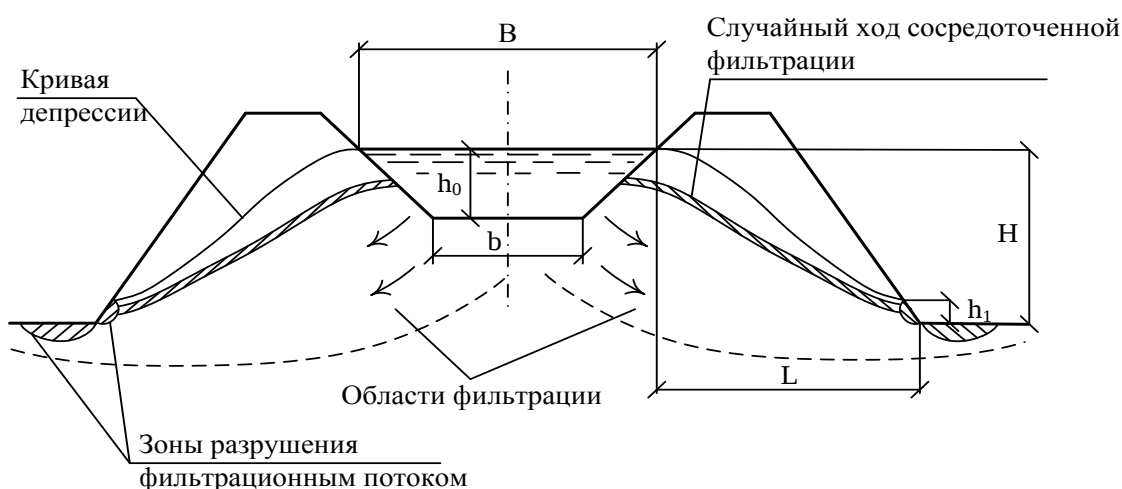


Рисунок 9.1 – Схема возникновения фильтрационных деформаций в дамбе канала в насыпи

На длину сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала влияют: J – градиент напора; ω – площадь живого сечения потока, м^2 ; n – относительная пористость грунта; $\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта, Н/м^3 ; ν – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$; γ_{w} – удельный вес воды, Н/м^3 , и ускорение свободного падения g , м/с^2 . Тогда функциональная зависимость имеет вид:

$$l_{с.х.} = \varphi(J, n, \omega, \nu, g, \gamma_{\text{w}}, \gamma_{\text{гр}}). \quad (9.1)$$

В уравнение (9.1) вошли семь основных переменных, которым присвоим показатели степени:

$$l_{с.х.} = \varphi(J, n, \omega^a, \nu^b, g^c, \gamma_{\text{w}}^d, \gamma_{\text{гр}}^e). \quad (9.2)$$

Представим это уравнение в виде безразмерных комбинаций. Выразим сначала размерность каждой переменной по отношению к трем основным единицам: массе M , времени T и длине L (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Размерность переменных, вошедших в уравнение

Название переменной	Обозначение	Единица измерения	Формула размерности
1	2	3	4
Градиент напора	J	–	–
Относительная пористость грунта	n	–	–

Продолжение таблицы 9.1

1	2	3	4
Площадь поперечного сечения канала	ω	м^2	L^2
Кинематическая вязкость	ν	$\text{м}^2/\text{с}$	$\frac{L^2}{T}$
Ускорение свободного падения	g	$\text{м}/\text{с}^2$	$\frac{L}{T^2}$
Удельный вес воды	γ_w	$\text{кН}/\text{м}^3$	$\frac{M}{L^3}$
Удельный вес грунта	γ_{gr}	$\text{кН}/\text{м}^3$	$\frac{M}{L^3}$

В размерных единицах равенство (9.2) имеет вид:

$$L = \varphi \left[\frac{J}{n}, (L^2)^a, \left(\frac{L^2}{T} \right)^b, \left(\frac{L}{T^2} \right)^c, \left(\frac{M}{L^3} \right)^d, \left(\frac{M}{L^3} \right)^e \right], \quad (9.3)$$

откуда, используя основные размерности, найдем показатели степени:

- для L : $1 = 2a + 2b + c - 3d - 3e$;
- для T : $0 = -b - 2c$;
- для M : $0 = d + e$.

Исключим a , b и d , выразив их через остальные показатели степени. Тогда $a = 0,5 + 1,5c$, $b = -2c$ и $d = -e$. Получим:

$$l_{c.x.} = \varphi \left[\frac{J}{n}, \omega^{0,5+1,5c}, \nu^{-2c}, g^c, \gamma_w^{-e}, \gamma_{gr}^e \right]. \quad (9.4)$$

Используя теорию размерностей [200, 231, 232], представим это уравнение в критериальной форме:

$$\frac{l_{c.x.}}{\sqrt{\omega}} = \varphi \left[\frac{J}{n}, \left(\frac{\sqrt{\omega^3} \cdot g}{\nu^2} \right)^c, \left(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w} \right)^e \right]. \quad (9.5)$$

Используя основные размерности, функциональную зависимость (9.1) удалось представить в критериальной форме (9.5), содержащей в правой части три безразмерных параметра. Таким образом, число факторов несколько сократилось, однако равенство (9.5) является еще многофакторным, поэтому, чтобы выполнить эксперимент с каждым безразмерным параметром, варьируя его в определенных пределах, необходимо провести значительное число опытов. Для сведения числа опытов к минимуму была использована теория планирования эксперимента.

9.4 Вывод расчетных зависимостей для определения фильтрационных характеристик земляных дамб каналов с использованием теории планирования эксперимента

В настоящее время появилось новое направление в области использования теории планирования эксперимента [205, 228, 233–241]. Сочетая ее с теорией подобия и размерностей, можно сначала получить связь между независимыми переменными в критериальной форме, а далее с помощью теории планирования эксперимента установить связь между критериями подобия в виде регрессионной модели [242, 243]. Применим этот метод, воспользовавшись равенством (9.5).

Введем обозначения: $R = \frac{l_{c.x.}}{\sqrt{\omega}}$, $X = \frac{J}{n}$, $Y = \left(\frac{\sqrt{\omega^3} \cdot g}{v^2} \right)^c$, $Z = \left(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w} \right)^d$.

В результате, уравнение (9.5) можно представить как произведение отдельных функций независимых переменных:

$$R = \varphi_1(X)\varphi_2(Y)\varphi_3(Z), \quad (9.6)$$

которое относится к общему соотношению второго класса [244], допускающему применение факторных экспериментов.

Необходимо провести такой сбалансированный эксперимент, в котором X , Y , Z берутся на соответствующих уровнях, и к решению задачи применяется латинский квадрат.

Составляя логарифмические уравнения для строки, содержащей, например, X_1 по n уровням, получим:

$$\lg f_1(X_1) = \frac{\sum \lg R_{X_1}}{n} - \text{const}, \quad (9.7)$$

а для X_n :

$$\lg f_1(X_n) = \frac{\sum \lg R_{X_n}}{n} - \text{const}. \quad (9.8)$$

Все изменения усредненного логарифма результата полностью обусловлены влиянием лишь одной переменной X . Такой же результат получится, если усреднение производить по уровням переменной Y , а затем по уровням переменной Z .

По формулам (9.7) и (9.8) с помощью кривых или таблиц можно получить функции:

$$R_X = k f_1(X), R_Y = k' f_2(Y), R_Z = k'' f_3(Z), \quad (9.9)$$

где R_X – антилогарифм $\sum \lg R_X / n$;

k – постоянная, входящая в формулы (9.7).

Если решить уравнение (9.9) относительно функций $f_1(X)$, $f_2(Y)$, $f_3(Z)$ и подставить их в формулу (9.6), то получим:

$$R = K(R_X)(R_Y)(R_Z), \quad (9.10)$$

где $K = (k \cdot k' \cdot k'')^{-1}$.

Регрессионная модель может быть построена в виде функции:

$$y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z + b_4xy + b_5xz + b_6yz + b_7xyz. \quad (9.11)$$

Для построения модели нужно найти параметры функции $b_0, b_1, \dots, b_7$.

При исследовании фильтрации из каналов в насыпи переменные, входящие в зависимость (9.1), изменялись в пределах: $n = 0,3 - 0,45$, $v = 0,801 \cdot 10^{-6} - 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $J = 0,01 - 0,05$, $\omega = 15 - 150 \text{ м}^2$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\gamma_{gr} = 16 - 26 \text{ кН/м}^3$, $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$.

Тогда безразмерные параметры правой части равенства (9.4) приняли следующие значения: $X = 0,2 - 1,67$, $Y = 331,3 \cdot 10^{12} - 27468,6 \cdot 10^{12}$, $Z = 1,6 - 2,6$, $R = 8,27 - 1,4$, и латинский квадрат представился следующим образом (таблица 9.2).

В свою очередь зависимая переменная R имела значения, представленные в таблице 9.3.

Таблица 9.2 – План эксперимента на четырех уровнях варьирования переменными

Критерий Рейнольдса Y	$331,3 \cdot 10^{12}$	$9377 \cdot 10^{12}$	$18422,8 \cdot 10^{12}$	$27468,6 \cdot 10^{12}$
Относительный градиент фильтрации X	Коэффициент грунта Z			
1,67	1,6	1,9	2,2	2,6
1,19	1,9	1,6	2,6	2,2
0,71	2,2	2,6	1,6	1,9
0,23	2,6	2,2	1,9	1,6

Таблица 9.3 – Значения переменной R

6,90	7,36	7,82	8,27
5,06	5,52	5,98	6,44
3,23	3,69	4,15	4,61
1,40	1,86	2,32	2,77

Длина сосредоточенного хода фильтрации в зависимости от факторов, входящих в (9.6) по данным полученного квадрата результатов R , определялась по схеме, представленной на рисунке 9.2.

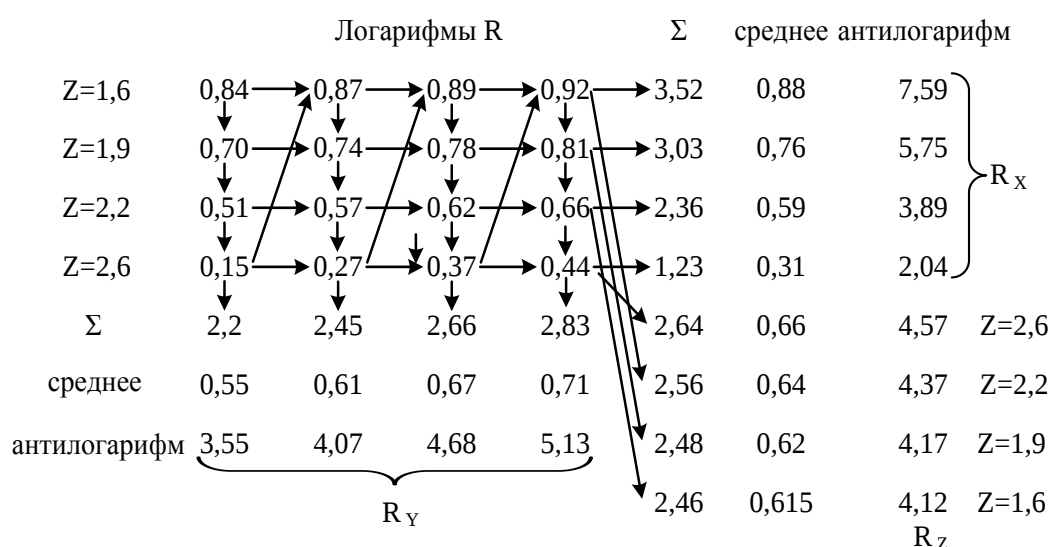


Рисунок 9.2 – Схема вычислений антилогарифмов

После этого по формуле (9.10) были определены постоянные K для всех 16 комбинаций условий, приведенные в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Значения постоянной K

0,056	0,054	0,051	0,042
0,055	0,054	0,053	0,051
0,053	0,053	0,055	0,058
0,051	0,052	0,055	0,063

Среднее значение постоянной K для этих 16 комбинаций – 0,054.

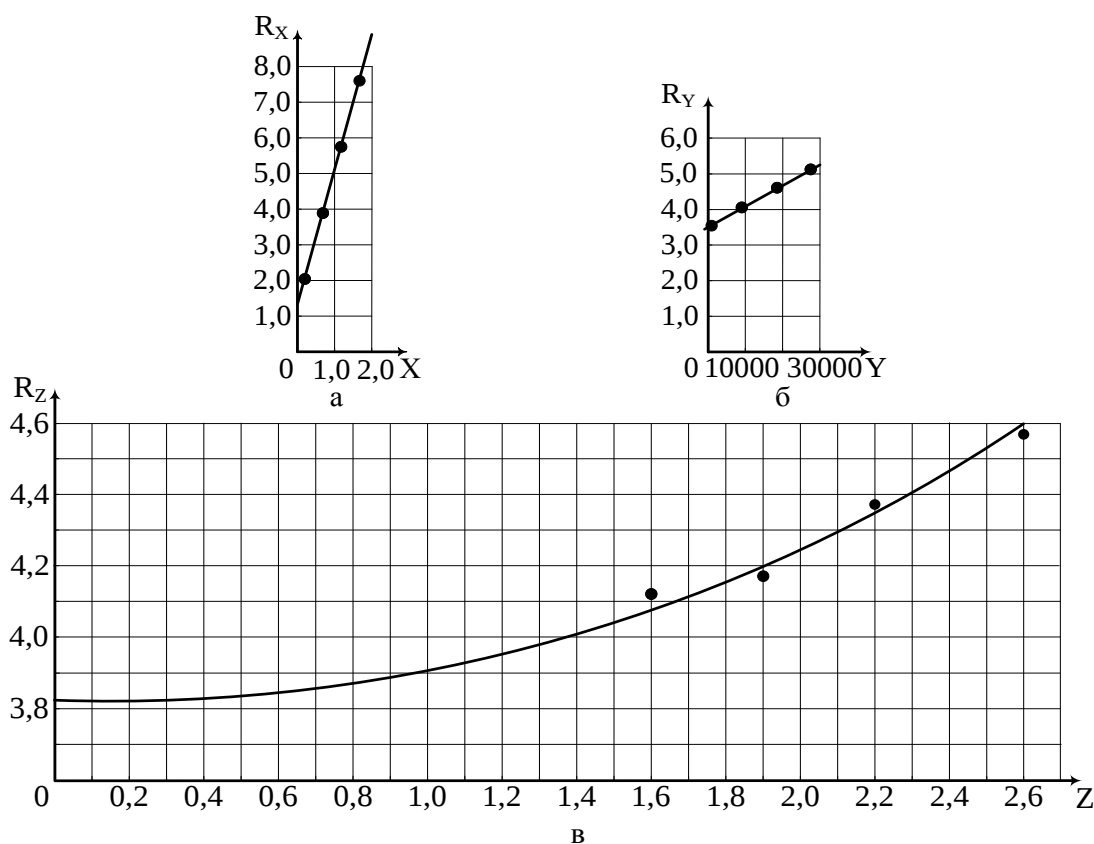
Используя безразмерные комплексы, были вычислены коэффициенты корреляции к формуле (9.10) и определены их значимости.

В результате, коэффициенты корреляции приняли следующие значения: $r_x = 0,96$, $r_y = 0,24$, $r_z = 0,15$, $r_R = 2,18$.

Была выполнена проверка значимости полученных коэффициентов с их критическими значениями: $r_x \sqrt{n-1} = 0,96 \cdot 3,87 = 3,72$; $r_y \sqrt{n-1} = 0,93$; $r_z \sqrt{n-1} = 0,58$; $r_{\text{теор}} = 2,87$ – критическое значение при надежности выводов 0,999; $r_{\text{теор}} = 1,65$ – при надежности выводов 0,90. С надежностью выводов 0,90 оказались значимыми все коэффициенты корреляции.

Методика определения значимости коэффициентов корреляции и доверительной оценки параметров теоретической прямой регрессии подробно изложена Л. З. Румшинским [245].

По данным этих вычислений построены графики зависимости длины сосредоточенного хода фильтрации от градиента фильтрации (рисунок 9.3а), критерия Рейнольдса (рисунок 9.3б), коэффициента грунта (рисунок 9.3в), которые изображают результаты эксперимента.



а – от градиента фильтрации;
б – от критерия Рейнольдса; в – от коэффициента грунта

Рисунок 9.3 – Графики зависимости длины сосредоточенного хода фильтрации от исследуемых факторов

С учетом изложенного, по каждому графику получены уравнения регрессии в следующем виде:

$$R_x = a_x + b_x \cdot X, \quad (9.12)$$

$$R_y = a_y + b_y \cdot Y, \quad (9.13)$$

$$R_z = a_z + b_z \cdot Z^\alpha. \quad (9.14)$$

Коэффициенты a_x , a_y , a_z , b_x , b_y , b_z и показатель степени α , были определены с помощью метода наименьших квадратов по методике Л. З. Румшинского [245].

Подставив в равенство (9.10) значения K , a_x , a_y , a_z , b_x , b_y , b_z , α получим уравнение относительно результата:

$$R = 0,054(3,78X + 1,29)(0,667Y + 3,54)(0,089Z^{2,27} + 3,82). \quad (9.15)$$

Таким образом, размерностно-регрессионный метод позволил выявить параметры, влияющие на длину сосредоточенного хода фильтрации. Построив регрессионную модель, окончательно была найдена зависимость для определения длины сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала:

$$l_{\text{с.х.}} = 0,054\sqrt{\omega} \left[(3,78 \cdot \frac{J}{n} + 1,29)(0,667 \frac{\sqrt{\omega^3}}{v^2} + 3,54)(0,089(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w})^{2,27} + 3,82) \right]. \quad (9.16)$$

Выведенная зависимость предназначена для оценки длины сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала, проложенного в насыпи, с расходом воды от 27 до 105 м³/с и площадью живого сечения потока от 15 до 150 м².

По аналогичной методике проводились исследования по определению зависимости для градиента напора в теле дамбы канала в насыпи.

Для действующего среднего градиента напора J в дамбе канала фундаментальными переменными были выделены: Q – расход канала, м³/с; F – сила давления воды на верховой откос канала, кН; γ_{gr} – удельный вес грунта, кН/м³; g – ускорение свободного падения, м/с², и сам градиент напора J , который можно выразить через вертикальное и горизонтальное проложения, т. е. $J = H_{\Phi} / L_{\Phi}$, где H_{Φ} – вертикальный путь фильтрации; L_{Φ} – горизонтальный путь фильтрации.

Тогда функциональную зависимость для определения действующего градиента напора можно представить в следующем виде:

$$H_{\Phi} = \varphi(L_{\Phi}^a, Q^b, F^c, g^d, \gamma_{gr}^e). \quad (9.17)$$

С помощью размерностно-регрессионного метода число независимых переменных, входящих в уравнение (9.17), сокращено до трех в форме критериальных соотношений:

$$\frac{H_{\Phi}}{L_{\Phi}} = \varphi \left[\left(\frac{L_{\Phi}^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right)^c, \left(\frac{L_{\Phi}^5 \cdot g}{Q^2} \right)^d \right]. \quad (9.18)$$

Введя обозначения $X = \left(\frac{L_{\Phi}^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right)^c$, $Y = \left(\frac{L_{\Phi}^5 \cdot g}{Q^2} \right)^d$, $Z = \frac{H_{\Phi}}{L_{\Phi}} = J$, получили:

$$Z = \varphi_1(X)\varphi_2(Y). \quad (9.19)$$

При исследовании фильтрации из каналов переменные, входящие в зависимость (9.17), изменялись в пределах: $Q = 50 - 100$ м³/с, $F = 150 - 480$ кН, $g = 9,81$ м/с², $\gamma_{gr} = 18 - 21$ кН/м³, $H_{\Phi} = 0,60 - 4,44$ м, $L_{\Phi} = 18,39 - 30,66$ м.

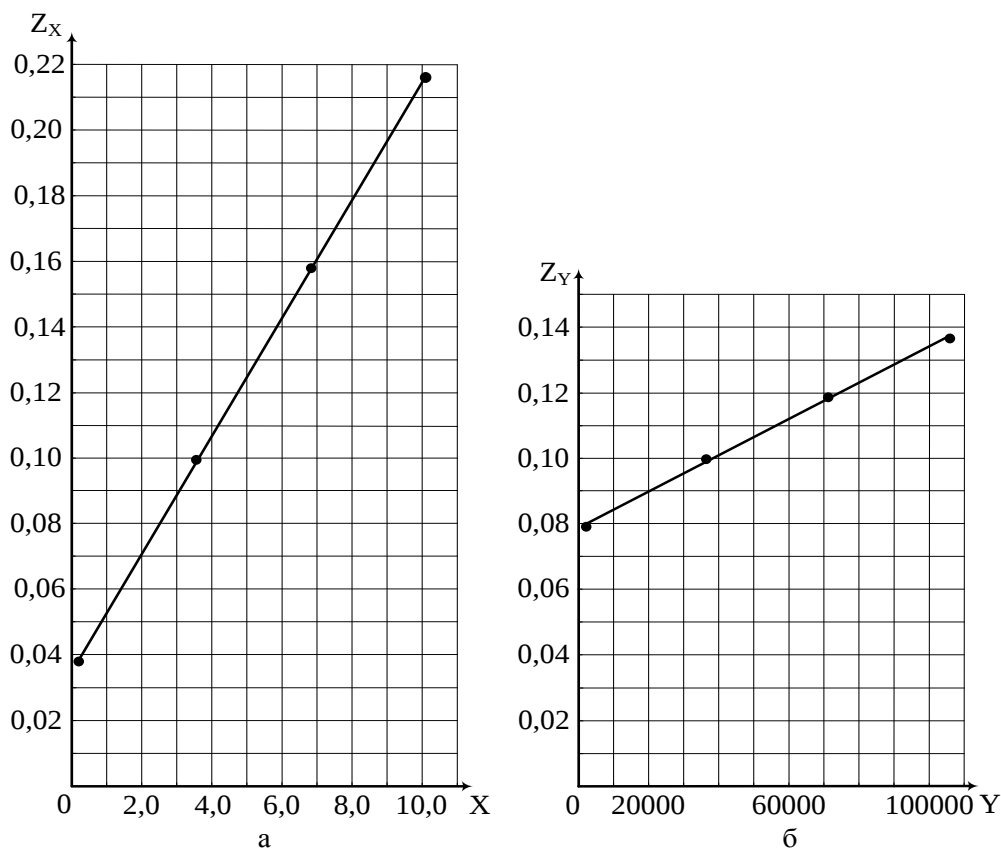
Тогда безразмерные параметры равенства (9.18) приняли следующие значения: $X = 0,242 - 10,03$, $Y = 2065,06 - 106313$, $Z = 0,019 - 0,241$.

Среднее значение постоянной K для этих 16 комбинаций условий равно 9,54.

Используя безразмерные комплексы, были вычислены коэффициенты корреляции $r_x = 0,98$, $r_y = 0,25$. С надежностью выводов 0,90 оказались значимыми оба коэффициенты корреляции. По данным этих вычислений построены графики зависимости градиента напора от критерия Эйлера (рисунок 9.4а), градиента напора от критерия Фруда (рисунок 9.4б), изображающие результат эксперимента, и получены уравнения регрессии первого порядка:

$$Z_X = a_X + b_X \cdot X, \quad (9.20)$$

$$Z_Y = a_Y + b_Y \cdot Y. \quad (9.21)$$



а – от критерия Эйлера; б – от критерия Фруда

Рисунок 9.4 – Графики зависимости градиента напора от исследуемых факторов

Коэффициенты a_X , b_X были определены с помощью метода наименьших квадратов. Подставив их значения, получили:

$$Z = 9,54(0,018X + 0,034)(0,0000005Y + 0,079). \quad (9.22)$$

$$J = 9,54 \cdot \left(0,018 \cdot \left(\frac{L_\Phi^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 0,034 \right) \left(0,0000005 \cdot \left(\frac{L_\Phi^5 \cdot g}{Q^2} \right) + 0,079 \right) \quad (9.23)$$

или окончательно:

$$J = 0,86 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{L_\Phi^7 \cdot F \cdot g}{Q^4 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{L_\Phi^5 \cdot g}{Q^2} \right) + 0,014 \cdot \left(\frac{L_\Phi^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 0,026. \quad (9.24)$$

Полученная зависимость предназначена для нахождения величины градиента напора в дамбе канала с расходом от 50 до 100 м³/с, проложенного в насыпи из несвязных грунтов с удельным весом от 18 до 21 кН/м³ [246].

10 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ КАНАЛОВ ЮГА РОССИИ

10.1 Характеристика объектов исследований

Для проведения натурных исследований были выбраны участки Донского и Пролетарского магистральных каналов Ростовской области, которые характеризуются различными условиями работы и техническим состоянием.

Донской магистральный канал (ДМК) после расширения на головном участке до 45 км имеет расход до $250 \text{ м}^3/\text{с}$. ДМК начинается от нижнего бьефа Цимлянского водохранилища и проходит по левобережной, второй надпойменной террасе р. Дон. Схема трассы ДМК приведена на рисунке 10.1.

Строительство ДМК осуществлялось по очередям. В 1952 году в качестве объектов первоочередного строительства были закончены и введены в эксплуатацию головное водозаборное сооружение, участок магистрального канала до тоннеля, длиной 30,6 км. Остальная часть ДМК с сооружениями на нем была построена позже. Донской магистральный канал введен в эксплуатацию в 1958 г. Всего на ДМК построены 73 ГТС, в т. ч. тоннель длиной 6 км, дюкер на $110 \text{ м}^3/\text{с}$, семь электрифицированных перекачивающих станций.

Донской магистральный канал имеет комплексное назначение (служит для орошения, обводнения и сельхозводоснабжения), в настоящее время подает воду на орошение сельхозкультур на площади 163,10 тыс. га, в том числе 32,76 тыс. га рисовых севооборотов, и обводнение 525 тыс. га сельхозугодий. Кроме этого, по каналу вода поступает для хозяйственно-питьевого водоснабжения с населением более 200 тыс. и рыбного хозяйства.

Донской магистральный канал рассчитан на круглогодичную работу с подачей расхода воды 200–250 $\text{м}^3/\text{с}$ в апреле – мае и 70–100 $\text{м}^3/\text{с}$ в зимний период. Проектная пропускная способность головного сооружения ДМК составляет $250 \text{ м}^3/\text{с}$ и обеспечивается при уровне Цимлянского водохранилища не ниже 33,2 м.

Режим работы ДМК характеризуется продолжительностью до 8 месяцев в году (с марта по октябрь). Типовое поперечное сечение канала представлено на рисунке 10.2.

Пролетарский магистральный канал (ПМК) ответвляется от ДМК на восток в двух километрах от впадения последнего в Весёловское водохранилище (рисунок 10.3). Канал имеет протяженность 83,4 км, расход воды – $54 \text{ м}^3/\text{с}$.

Русло канала полигонального сечения, уклон дна – 0,00004, заложение откосов в нижней части 1:4 до глубины 2–2,5 м, в верхней части – 1:2, коэффициент шероховатости русла равен 0,02.

Канал проходит в земляном русле в выемке, в полувыемке-полунасыпи, в местах прохождения балок – в насыпи с высотой дамб обвалования до 6–8 м.

Канал проложен в средних суглинках, под которыми на небольших участках вскрываются известняки и пески. В этих местах на канале предусмотрено устройство противofiltrационных экранов из суглинка. Грунтовые воды в районе трассы канала залегают на глубине от 2 до 11 м.

Площадь орошаемых земель на канале составляет 23,5 тыс. га, из них 19,3 тыс. га – рисовые севообороты. Урожайность риса, достигнутая за последние годы, снизилась в связи с ухудшением мелиоративного состояния орошаемых земель, в том числе и больших потерь воды из каналов на фильтрацию.

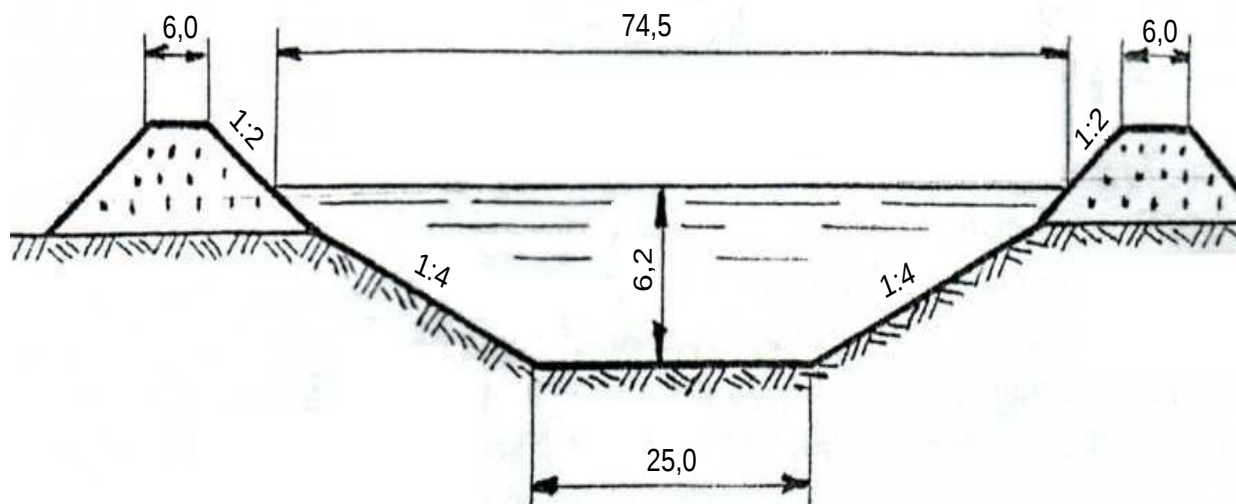


Рисунок 10.2 – Типовое поперечное сечение Донского магистрального канала

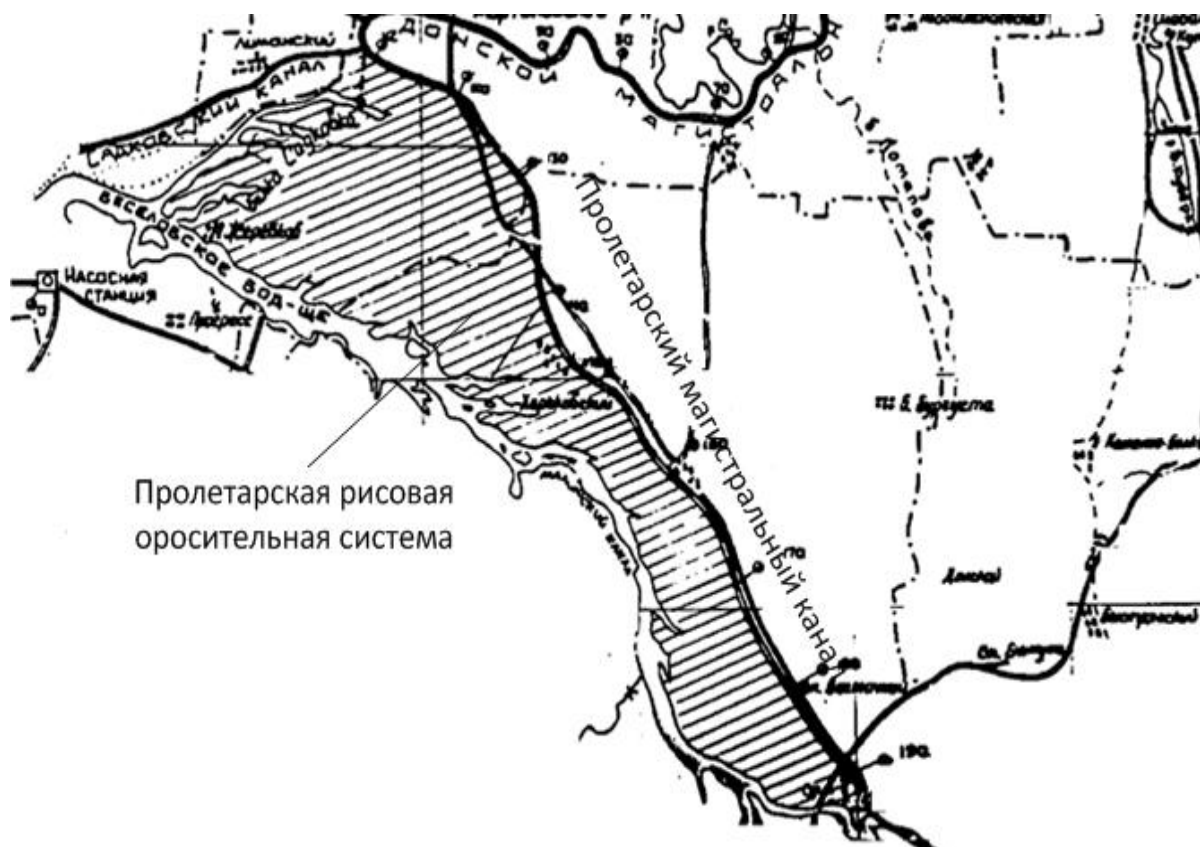


Рисунок 10.3 – Схема Пролетарского магистрального канала

Пролетарский канал относится к магистральным каналам I порядка ДМК. Поперечный профиль и общий вид ПМК представлены на рисунках 10.4 и 10.5 соответственно.

Основные характеристики исследованных каналов приведены в таблице 10.1.

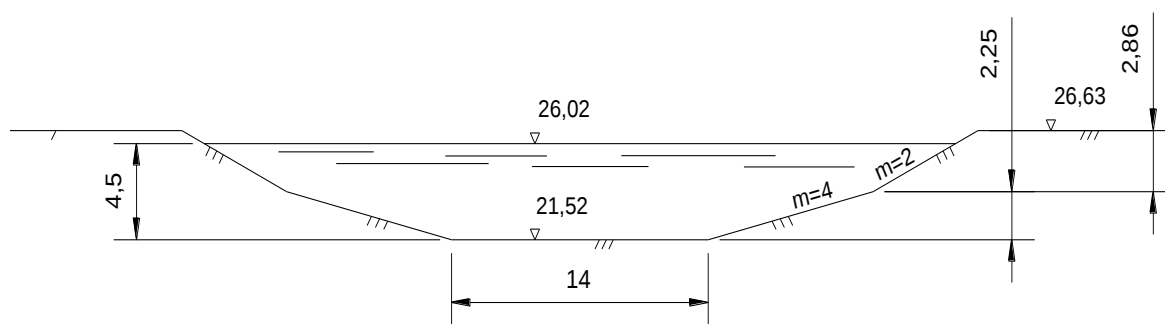


Рисунок 10.4 – Поперечный профиль Пролетарского магистрального канала



Рисунок 10.5 – Общий вид Пролетарского магистрального канала

На ДМК, который являлся объектом исследований, построены четыре МК: Нижне-Донской, Багаевский, Верхне-Сальский и Пролетарский, кроме того, из ДМК осуществляется забор воды для Азовского МК и подпитка донской водой Весёловского водохранилища. Основные технические характеристики этих каналов представлены в таблице 10.2.

В целом техническое состояние всех МК, представленных в таблице 10.2, можно охарактеризовать как удовлетворительное, хотя на некоторых участках Азовского и Нижне-Донского – неудовлетворительное.

Также Верхне-Сальский и Большовский МК имеют неудовлетворительное техническое состояние, что связано со значительными деформациями их русел, заилением, большими потерями на фильтрацию. Вследствие этих причин их КПД составляет 0,70–0,73, что на 15 % ниже проектных значений.

Анализ технического состояния Донского и Пролетарского МК приведен в п. 10.3.

Необходимо отметить, что из-за длительного срока эксплуатации от 35 до 55 лет МК Ростовской области имеют недостаточное и неудовлетворительное состояние по таким основным показателям, как технический уровень и техническое состояние.

Таблица 10.1 – Основные технические характеристики обследуемых каналов

Наименование канала	Время эксплуатации, лет	Протяженность, км	Глубина, м	Ширина по дну, м	Уклон дна	Площадь орошения, тыс. га	Потенциально опасный участок
Донской МК	60	112	6,2	25	0,00003	163,10	В районе х. Комаров на протяжении 4-х км наблюдается выклинивание фильтрационных вод в основании дамбы. Протяженность участков, требующих устройства противо-фильтрационной защиты, составляет около 8 км
Пролетарский МК	52	83,4	4,5–5	4	0,00004	77,7	Фильтрационные процессы, связанные с наличием карстовых пород у н. п. Наумовка на ПК 1549–1520, размывы и интенсивное заиливание канала у ст. Буденовская на ПК 1622–1634

Таблица 10.2 – Основные технические характеристики магистральных каналов Ростовской области

Наименование канала	Год ввода	Протяженность, км	Расход воды, м ³ /с	Конструкция облицовки	КПД (проект./факт.)	Техническое состояние
1 ДМК, в т. ч. тоннель ДМК	1953–1955	112,0–8,1	25,0–165,0	земляное русло	0,93/0,90	удовл.
2 Азовский МК	1953	92,2	22,0	земляное русло	0,83/0,78	удовл./неуд.*
3 Багаевский МК	1954	30,6	34,6	земляное русло	0,84/0,75	удовл.
4 Большовский МК	1963	29,3	22,5	земляное русло	0,87/0,73	неудовл.
5 Верхне-Сальский МК	1975	99,0	30,0	земляное русло	0,85/0,70	неудовл.
6 Нижне-Донской МК	1953	73,9	30,0	земляное русло	0,86/0,76	удовл./неуд.*
7 Пролетарский МК	1960	83,4	54,0	земляное русло	0,90/0,85	удовл.
8 Садковский МК	1971	10,6	11,4	ж/б сборная + пленка	0,93/0,86	удовл.
* На отдельных участках каналов наблюдается неудовлетворительное состояние.						

10.2 Методика натурных исследований

Методика натурных исследований включает в себя проведение визуальных и инструментальных обследований.

Основной задачей визуальных обследований являлось выявление дефектов и повреждений каналов, неисправностей их конструкций и элементов, снижающих их безопасность, при необходимости – определение мест и программы проведения в дальнейшем специализированных детальных обследований.

В задачи визуального обследования также входило выявление признаков неблагоприятных для сооружения процессов, аномально больших осадок, деформаций, трещин, оползней, обвалов, размывов, перемещений, а также зон и участков разрушения материала конструктивных элементов, открытых выходов фильтрационного потока, состояния крепления откосов и т. п., оценка состояния установленной контрольно-измерительной аппаратуры.

Наблюдения за фильтрацией наиболее ответственны в отношении устойчивости грунтовых дамб. К наиболее опасным явлениям, которые могут быть зафиксированы при визуальных наблюдениях, относятся: выход фильтрационного потока на откос, выше дренажа, выпор грунта, ощутимые просадки, в зонах суффозии, свищи, грифоны, ключи, мокрые пятна и т. д.

Объектами визуального обследования сооружений были все основные конструктивные элементы каналов, от состояния каждого из которых может зависеть безопасность сооружения, а также состояние близлежащей территории.

Фотосъемка проводилась для получения объективного визуального отображения внешнего вида исследуемого объекта и его элементов, выводов о техническом состоянии и уровне безопасности сооружения, а также для описания и характеристики элементов системного окружения.

Инструментальное обследование сооружений выполнялось с целью контроля диагностических показателей и определения осадок, горизонтальных и вертикальных

смещений, градиентов фильтрационных напоров, положений депрессионной кривой, фильтрационных расходов, пропускной способности, геометрических размеров сооружений, гидравлических параметров и т. д. Инструментальные обследования позволяют выявить дефекты, которые невозможно идентифицировать при визуальном осмотре сооружения. На заключительном этапе полученные данные обрабатываются, анализируются и заносятся в электронную базу данных.

Инструментальные обследования проводились непосредственно на Донском и Пролетарском МК с помощью следующих приборов: тахеометра, GPS навигатора, лазерного дальномера, цифровой видеокамеры, персонального компьютера, а также реперов, реек, створных знаков и указателей (рисунок 10.6).



1 – персональный компьютер; 2 – тахеометр; 3 – лазерный дальномер; 4 – навигатор; 5 – цифровая видеокамера

Рисунок 10.6 – Комплект оборудования для исследования основных параметров Донского и Пролетарского магистральных каналов

Основные характеристики приборов и оборудования приведены в таблице 10.3.

Таблица 10.3 – Основные характеристики приборов и оборудования

Оборудование	Функция оборудования	Точность измерения
1	2	3
Персональный компьютер	Обработка полученной информации	—
Тахеометр	Измерение горизонтальных и вертикальных углов, расстояний и превышений	Точность угловых измерений: 2"/3"/5"/7". Измерение расстояний по призме: $\pm (2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$ до 3000 м
GPS навигатор	Расчет местоположения, определение конфигурации объекта, определение площадей объектов	—

Продолжение таблицы 10.3

Лазерный дальномер	Замеры линейных расстояний, площадей и объемов	± 3 мм
Цифровая видеокамера	Визуальное обследование сооружений, видеосъемка	—
Эхолот Humminbird	Определение глубины волн в канале, конфигурации дна	—
Измерительная рулетка	Замеры линейных расстояний	—

Все используемые приборы и оборудование имеют свидетельства об их поверках, позволяющие с достоверностью выполнять измерительные работы.

Для анализа размыва каналов в суглинистых грунтах на потенциально-опасных участках проводилась плановая съемка выбранного участка с разбивкой поперечников через 10 м. Поперечные створы на откосах канала закреплялись постоянными знаками (колышками).

Размеры деформаций и сдвигов плит облицовки, а также несложные измерения до 50 м выполнялись измерительной рулеткой (рисунок 10.7). Дальномером, который позволяет производить измерения на расстоянии до 100 м, производились замеры линейных расстояний, площадей и объемов.



Рисунок 10.7 – Измерительная рулетка «Index»

Диагностика условий работы каналов и их технического состояния производится с целью определения показателей, характеризующих устойчивость поперечного сечения русла и величину фильтрационных потерь.

Наиболее точным способом определения фактических потерь в системе действующих каналов является способ, заключающийся в вертушечных замерах расходов воды в различных пунктах системы, организуемых с учетом времени добегания потока от головного до соответствующего нижнего створа. Для этих целей в процессе обследований была использована гидрометрическая микровертушка «ГМЦМ-1» (рисунок 10.8).



Рисунок 10.8 – Гидрометрическая микровертушка «ГМЦМ-1»

Основные технические характеристики гидрометрической микровертушки «ГМЦМ-1»:

- диапазон измерения скорости – от 0,03 до 6,0 м/с;
- диапазон измерения скорости с нормированной погрешностью – от 0,05 до 4,0 м/с;
- время осреднения – от 32 до 64 с;
- диаметр лопастного винта (вертушки) – 0,015 или 0,025 м.

Рабочие условия:

- температура окружающего воздуха – от минус 20 °С до плюс 50 °С;
- максимально допустимая температура воды – 45 °С.

10.3 Результаты натурных исследований

Задачей натурных исследований являлась оценка фактического технического состояния крупных каналов юга России, фильтрационных потерь, степени повреждений различных облицовок, а также выявление причин возникновения повреждений. Кроме того, в задачи исследований входило обобщение и анализ имеющихся данных наблюдений, полученных как автором работы, так и другими организациями.

В 2011 году сотрудниками института ФГБНУ «РосНИИПМ» были проведены обследования Донского (от 45 до 111,5 км) и Пролетарского (ПК 1512–1549 и ПК 1622–1634) МК.

Натурные обследования на ДМК проводились в период опорожнения канала и показали, что за период эксплуатации ДМК дамбы оплыли (рисунок 10.9), наблюдаются оползни, просадки и заиливание ложа канала, зарастание откосов растительностью до уреза воды, на отдельных участках происходит разуплотнение грунтов и увеличение фильтрации воды через тело дамбы, а также подъем уровня грунтовых вод. Большие потери воды наблюдались и на водовыпускных сооружениях в хозяйственную оросительную сеть, которые забирали воду расходом 0,2–0,5 м³/с из ДМК.



Рисунок 10.9 – Оплывы дамб Донского магистрального канала

В неудовлетворительном состоянии находятся и отводящие каналы от ливнепроводящих сооружений, заросли растительностью и камышом дамбы канала, на некоторых участках разрушены плиты облицовки (рисунок 10.10).



Рисунок 10.10 – Разрушение плит облицовки на Донском магистральном канале

Металлоконструкции рабочих затворов, электроподъемного оборудования и винтовых подъемников всех головных водозаборов ДМК выработали свой ресурс и требуют реконструкции и модернизации с учетом современных требований эксплуатации. Верхний и нижний бьефы сооружений не обеспечивают достаточного гашения энергии воды, что вызывает эрозию канала.

На протяжении 4 км, в районе х. Комаров, наблюдается выклинивание фильтрационных вод в основании дамбы, как показали материалы изысканий, за счет погребенного под дамбами растительного грунта. Суммарная протяженность участков, требующих устройства противofильтрационной защиты, составляет около 8 км.

В целом техническое состояние ДМК можно оценить как удовлетворительное, несмотря на то, что грунты дамб канала на некоторых участках разуплотнились и

фильтруют воду.

На Пролетарском МК натурные обследования проводились в августе 2011 г. В результате проведения визуальных обследований зафиксированы многочисленные размывы берегов канала (рисунки 10.11, 10.12), зарастание русла канал водной растительностью, деформации откосов канала, деформации поперечного сечения, разрушение и зарастание плит облицовки на некоторых участках (рисунки 10.13, 10.14), фильтрационные процессы, связанные с наличием карстовых пород у н. п. Наумовка на ПК 1520–1549, размывы и интенсивное заиливание канала у ст. Буденовская на ПК 1622–1634.



Рисунок 10.11 – Деформации берегов Пролетарского магистрального канала



Рисунок 10.12 – Размыв берегов Пролетарского магистрального канала



Рисунок 10.13 – Разрушение и сползание плит облицовки на Пролетарском магистральном канале



Рисунок 10.14 – Обрастание плит облицовки растительностью на Пролетарском магистральном канале

На ПК 1520–1549 ПМК проходит в средних суглинках, под которыми вскрываются известняки и пески, что создает условия для дренирования фильтрационных вод

из канала. На этом участке были проведены натурные измерения отметок бровок дамб канала и глубины воды через каждые 6 м. После чего было проведено сопоставление проектных и натурных параметров ПМК, которое представлено в таблице 10.4.

Таблица 10.4 – Проектные и натурные отметки бровок дамб на Пролетарском магистральном канале (ПК 1512–1542)

Пикетаж	Существующая отметка, м			Проектная отметка, м	
	левой дамбы	правой дамбы	дна	дамбы	дна
ПК 1512	25,02	25,27	20,74	24,98	19,88
ПК 1518	25,16	24,99	21,02	24,96	19,86
ПК 1524	25,21	24,92	20,70	24,93	19,83
ПК 1530	24,73	24,81	20,69	24,91	19,81
ПК 1536	24,80	25,19	20,38	24,88	19,78
ПК 1542	24,84	24,75	20,66	24,86	19,76

Анализируя результаты сводной таблицы, можно сделать вывод о заилении канала на 0,6–1,16 м, а также о смещении дамб канала. На ПК 1530 и ПК 1542 дамбы канала осели на 10–18 см и 2–11 см соответственно.

На остальных поперечниках отметки дамб увеличились от 3 до 29 см. Это свидетельствует об изменении поперечного сечения канала, заилении дна и уменьшении пропускной способности русла канала.

Общие сведения по результатам обследований ДМК, ПМК и других каналов юга России приведены в таблице 10.5.

Анализ данных таблицы показывает, что на каналах в земляном русле основными причинами нарушениями их нормальной эксплуатации является зарастание русла водной растительностью (Азовский и Нижне-Донской, Багаевский, Пролетарский МК). В связи с этим снижается пропускная способность русла, повышается уровень воды в канале, и увеличивается вероятность возникновения аварийной ситуации с переливом воды через бровки канала.

По результатам проведенных обследований установлены значительные нарушения и деформации, связанные с проявлением оползневых процессов (ДМК, БСК-1), разрушением и деформациями покрытий каналов на некоторых участках (ПМК, БСК-1), в связи с чем возможно увеличение расхода фильтрационного потока, действующих средних градиентов напора в теле и основании дамб каналов в насыпи, что также грозит аварийной ситуацией.

Размывы откосов и деформации поперечного сечения каналов (ДМК, ПМК, БСК-1, ТКК) приводят к возникновению отказов в работе каналов, т. е. к уменьшению или прекращению подачи требуемых расходов водопользователям.

Кроме того, в настоящее время фактический КПД этих каналов значительно снизился, что свидетельствует об ухудшении их технического состояния, понижении показателей безопасной работы на потенциально опасных участках.

Для повышения КПД данных каналов, снижения потерь воды на фильтрацию необходимо провести по каналам комплексный капитальный ремонт, а на некоторых участках – реконструкцию с устройством современных противофильтрационных облицовок и устройств.

Проведя натурные исследования на МК Ростовской области, а также изучив опыт эксплуатации крупных МК России и зарубежья, предлагается классифицировать каналы по уровню безопасности (таблица 10.6).

Таблица 10.5 – Натурные данные нарушений, деформаций и отказов при эксплуатации каналов юга России

Канал	Расход (факт./проект.), м ³ /с	КПД канала (факт./проект)	Характер ло- жа (земляное, облицованное)	Обнаруженные дефекты и деформации	Данные наблюдений	Годы наблюдений
1	2	3	4	5	6	7
Донской МК	201/250	0,82/0,89	Земляное	- выклинивание фильтрационных вод в основании дамбы; - разрушение плит облицовки; - оплывы дамб на двух участках; - зарастание растительностью и камышом в береговой зоне	Ю. М. Косиченко Д. В. Бакланова	2005 2011–2013
Пролетарский МК	54	0,80/0,85	Земляное	- зарастание водной растительностью; - заиление дна канала; - деформации поперечного профиля канала; - разрушение плит облицовки; - фильтрация из канала, связанная с наличием карстовых пород в основании канала	Д. В. Бакланова	2011–2013
Азовский МК	18/20	0,78/0,82	Земляное	- зарастание откосов водной растительностью по всей длине канала; - образование водорослей; - размывы и обрушения откосов; - заиление русла канала	Ю. М. Косиченко Ю. И. Иовчу	2004 2007–2008
Нижне-Донской МК	25,6/25,6	0,76/0,9	Земляное	- зарастание откосов водной и древесной растительностью; - оплывы дамб; - заиление дна с уменьшением пропускной способности	Ю. И. Иовчу	2007–2008

Продолжение таблицы 10.5

1	2	3	4	5	6	7
Багаевский МК	24/30	0,75/0,75	Земляное	- зарастание водной растительностью и заиление русла канала; - снижение пропускной способности на 20–30 %	Ю. И. Иовчу	2007
Большой Ставропольский канал (первая очередь) (БСК-1)	172/180	0,928/0,96	Земляное с укреплением на отдельных участках	- образование провальных воронок в ложе канала на 5–7 км; - образование провальных зон с выраженной инфильтрацией. Глубокие промоины глубиной до 0,5 м и шириной 1–1,5 м; - деформации покрытия; - образование подсечек и размывов; - выход фильтрационного потока на низовой откос; - угроза прорыва дамб, вызванная карстово-суффозионными процессами	Ю. У. Байчоров и др. К. Г. Гурин	1972–1978 2005
Терско-Кумский (ТКК)	80,0	—	Земляное	- размывы откосов на 6 км; - отложение наносов у правой части канала; - зарастание сорной растительностью; - выход фильтрационного потока на приканальную территорию	Г. Л. Лобанов	1980–1985

Таблица 10.6 – Классификация каналов по уровню безопасности в зависимости от количественных диагностических показателей

Уровень безопасности канала	По заилению (% от площади живого сечения)	По устойчивости откосов	По градиенту фильтрации J_{est}	По превышению берм, d	По площади повреждения облицовки канала, %
Нормальный	0–8	$K_{зап} \geq K_{доп}$	$J_{est} < 0,5J_{cr}$	$d = d_{np} + 0,05 d_{np}$	0–10
Пониженный	8–15	$K_{зап} = (0,97–0,98) \cdot K_{доп}$	$J_{est} < J_{cr}$	$d = d_{np}$	10–20
Неудовлетворительный	15–23	$K_{зап} = (0,95–0,96) \cdot K_{доп}$	$J_{est} \leq J_{cr}$	$d < 0,1 \cdot d_{np}$	20–30
Опасный	23–30	$K_{зап} \leq 0,95 \cdot K_{доп}$	$J_{est} > J_{cr}$	$d < 0,3 \cdot d_{np}$	30–40

10.4 Оценка риска разрушения потенциально опасных участков Донского и Пролетарского магистральных каналов

По предложенной в восьмой главе методике были выполнены расчеты фильтрации и оценки риска разрушения потенциально опасных участков Донского и Пролетарского МК.

10.4.1 Оценка риска разрушения участков в насыпи Донского магистрального канала

Используя продольный профиль ДМК на ПК 499+00–ПК 1115+79 для оценки риска были выбраны потенциально опасные участки канала в насыпи (таблица 10.7).

Таблица 10.7 – Исходные данные для расчета риска аварии участков в насыпи ДМК

Участок ДМК в насыпи	Исходные данные для расчета риска аварии
ПК 530–540	$d = 1,0$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 14,0$ м, $T = 8,2$ м
ПК 555–565	$d = 0,98$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 9,62$ м, $T = 4,72$ м
ПК 605–620	$d = 1,1$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 10,64$ м, $T = 5,74$ м
ПК 655–665	$d = 0,50$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 9,7$ м, $T = 4,8$ м
ПК 703–707	$d = 1,0$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 15,0$ м, $T = 10,1$ м
ПК 750–755	$d = 0,99$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 15,0$ м, $T = 10,1$ м
ПК 758–768	$d = 1,0$ м, $b = 12$ м, $h_0 = 4,9$ м, $H = 10$ м, $T = 5,1$ м

При этом для всех расчетных случаев ввиду симметричного поперечного профиля канала коэффициенты заложения верхового и низового откоса принимались $m_1 = m_2 = 4$, ширина гребня дамбы – $b_{гр} = 6$ м, коэффициенты фильтрации тела и основания дамбы – $K_T = K_O = 0,2$ м/сут. Результаты расчетов приведены в таблице 10.8.

Таблица 10.8 – Расчеты фильтрации для участков в насыпи на Донском магистральном канале

Участок ДМК в насыпи	Высота вы- хода де- прессион- ной кривой на низовой откос h_1 , м	Удельный фильтраци- онный рас- ход через те- ло дамбы q_T , м ² /сут	Удельный фильтрацион- ный расход че- рез основание дамбы q_O , м ² /сут	Действую- щий гради- ент напора в теле дамбы $J_{est,m}^T$	Действую- щий гради- ент напора в основании дамбы $J_{est,m}^O$	Максималь- ный местный градиент на- пора при вы- ходе потока на низовой откос $J_{est,max}^T$	Риск раз- рушения тела дам- бы канала $\lambda_T, \times 10^{-3}$ 1/год	Риск раз- рушения основания дамбы ка- нала $\lambda_O, \times 10^{-3}$ 1/год	Общий риск раз- рушения дамбы ка- нала $\lambda, \times 10^{-3}$ 1/год
ПК 530–540	6,660	0,320	0,168	0,185	0,102	1,276	1,15	0,634	1,784
ПК 555–565	2,050	0,104	0,023	0,150	0,097	0,823	0,931	0,604	1,535
ПК 605–620	4,476	0,222	0,116	0,173	0,101	1,080	1,07	0,625	1,697
ПК 655–665	4,478	0,223	0,101	0,184	0,106	1,228	1,14	0,655	1,798
ПК 703–707	7,310	0,347	0,205	0,188	0,101	1,319	1,17	0,630	1,794
ПК 750–755	7,310	0,347	0,205	0,188	0,102	1,322	1,17	0,630	1,795
ПК 758–768	4,180	0,208	0,103	0,172	0,101	1,073	1,07	0,629	1,699

На основании анализа результатов расчетов для всех расчетных случаев можно заключить следующее: риск разрушения дамбы канала по средним градиентам не превышает нормативного значения, принятого $\lambda_n = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Однако на всех рассматриваемых участках, кроме ПК 555–565 (55–56 км), не выполняется условие местной фильтрационной прочности грунта при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию, что свидетельствует о возможности локальных разрушений грунта в виде суффозии или выпора.

10.4.2 Оценка риска разрушения участков в насыпи Пролетарского магистрального канала

По результатам проведенных натурных исследований на ПМК может произойти ряд аварийных ситуаций, которые могут привести к сокращению или прекращению подачи воды потребителю. Для ПМК также были выполнены расчеты фильтрации, и проведена оценка риска аварии потенциально опасных участков канала.

На рисунках 10.15–10.18 приведены поперечные сечения канала при высоте насыпи дамб от 3 до 8 м.

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 10.9.

**Таблица 10.9 – Исходные данные для расчета риска аварии участков в насыпи
Пролетарского магистрального канала**

Участок ПМК в насыпи	Исходные данные для расчета риска аварии
С высотой насыпи до 3 м	$m_1 = 3, \quad m_2 = 3, \quad d = 0,6 \text{ м}, \quad b_{гр} = 6 \text{ м}, \quad b = 4 \text{ м}, \quad h_0 = 4,5 \text{ м},$ $K_T = K_O = 0,15 \text{ м/сут}, \quad H = 3 \text{ м}$
С высотой насыпи от 3 до 4 м	$m_1 = 3, \quad m_2 = 3, \quad d = 0,6 \text{ м}, \quad b_{гр} = 6 \text{ м}, \quad b = 4 \text{ м}, \quad h_0 = 4,5 \text{ м},$ $K_T = K_O = 0,15 \text{ м/сут}, \quad H = 4 \text{ м}$
С высотой насыпи от 4 до 6 м	$m_1 = 3, \quad m_2 = 3, \quad d = 0,6 \text{ м}, \quad b_{гр} = 6 \text{ м}, \quad b = 4 \text{ м}, \quad h_0 = 4,5 \text{ м},$ $K_T = K_O = 0,2 \text{ м/сут}, \quad H = 6 \text{ м}$
С высотой насыпи до 8 м	$m_1 = 3, \quad m_2 = 3, \quad d = 0,6 \text{ м}, \quad b_{гр} = 6 \text{ м}, \quad b = 4 \text{ м}, \quad h_0 = 4,5 \text{ м},$ $K_T = K_O = 0,2 \text{ м/сут}, \quad H = 8 \text{ м}$

Результаты вычислений приведены в таблице 10.10. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что для всех расчетных случаев риск аварии дамб ПМК не превышает нормативного значения. Однако возможны разрушения грунта дамб при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию при высоте насыпи дамб от 3 до 8 м.

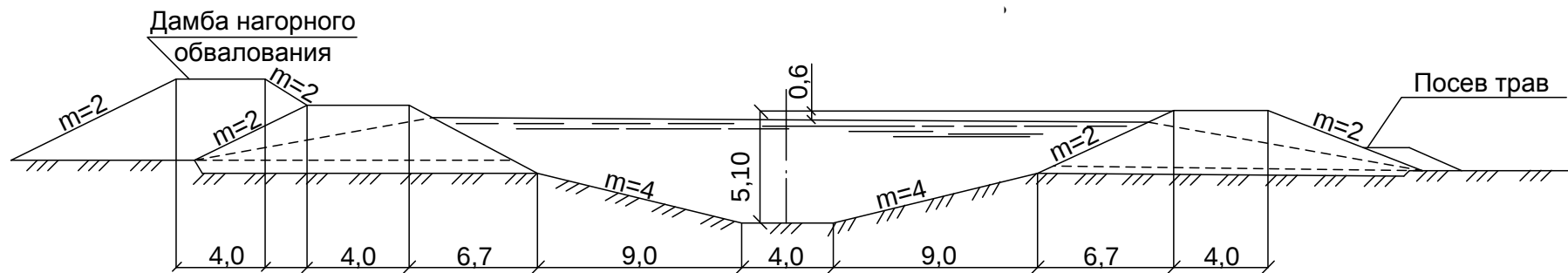


Рисунок 10.15 – Поперечные сечения Пролетарского магистрального канала при высоте насыпи дамб до 3 м

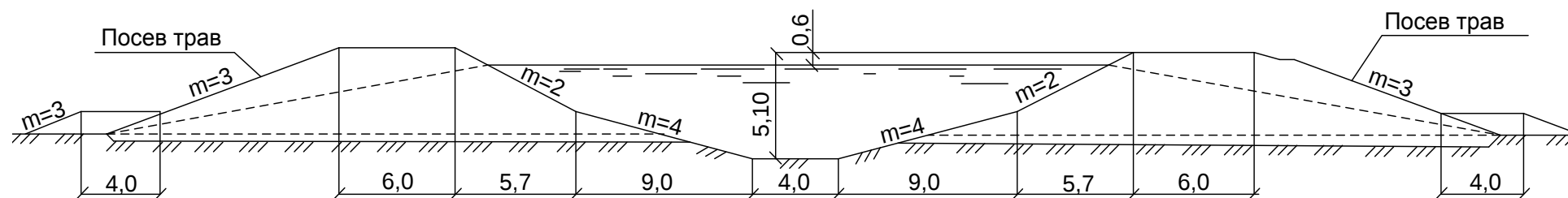


Рисунок 10.16 – Поперечные сечения Пролетарского магистрального канала при высоте насыпи дамб от 3 до 4 м

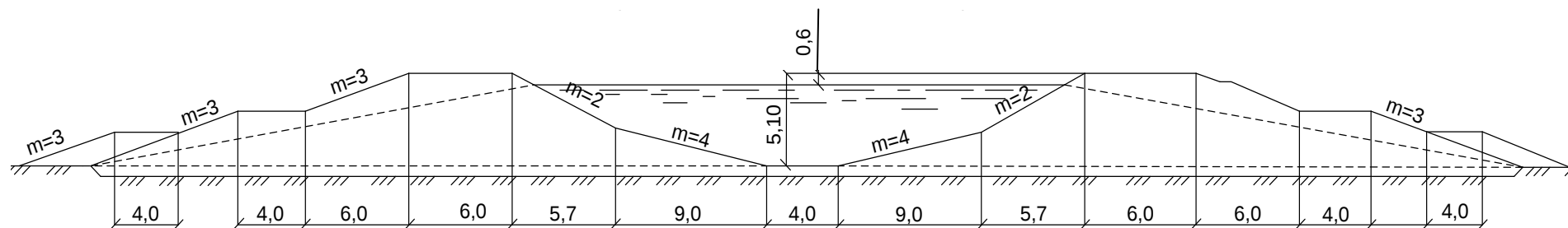


Рисунок 10.17 – Поперечные сечения Пролетарского магистрального канала при высоте насыпи дамб от 4 до 6 м

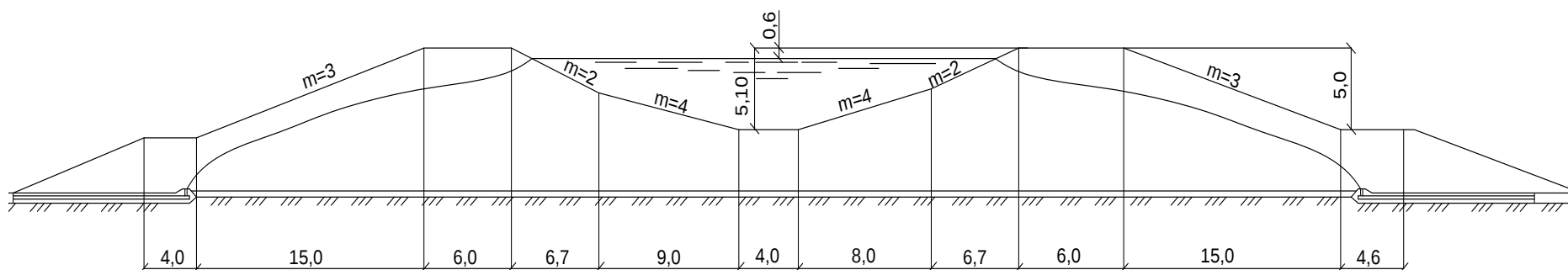


Рисунок 10.18 – Поперечные сечения Пролетарского магистрального канала при высоте насыпи дамб от 6 до 8 м

Таблица 10.10 – Расчеты фильтрации для потенциально опасных участков Пролетарского магистрального канала

Участок ПМК с высотой насыпи	Высота выхода де- прессион- ной кривой h_1 , м	Удельный фильтрацион- ный расход че- рез тело дамбы q_T , м ² /сут	Удельный фильтрацион- ный расход че- рез основание дамбы q_O , м ² /сут	Действую- щий гради- ент напора в теле дамбы $J_{est,m}^T$	Действую- щий гради- ент напора в основании дамбы $J_{est,m}^O$	Максималь- ный местный градиент на- пора при вы- ходе потока на низовой откос $J_{est,max}^T$	Риск раз- рушения тела дам- бы канала $\lambda_T, \times 10^{-3}$ 1/год	Риск раз- рушения основания дамбы ка- нала $\lambda_O, \times 10^{-3}$ 1/год	Общий риск раз- рушения дамбы ка- нала $\lambda, \times 10^{-3}$ 1/год
до 3 м	0,812	0,041	0,002	0,169	0,117	0,892	0,959	0,669	1,628
от 3 до 4 м	1,110	0,056	0,002	0,172	0,119	0,928	0,981	0,679	1,660
от 4 до 6 м	2,040	0,102	0,029	0,200	0,128	1,175	1,138	0,728	1,866
до 8 м	3,111	0,150	0,067	0,217	0,128	1,398	1,237	0,729	1,966

11 РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ КАНАЛОВ

11.1 Мероприятия по повышению надежности и безопасности потенциально опасных участков на каналах (по опыту эксплуатации каналов юга России)

В настоящем подразделе рассматриваются основные мероприятия по повышению надежности и безопасности потенциально опасных участков каналов.

Вопросы надежности работы каналов и их русловые деформации изучены многими отечественными учеными [116, 157, 165, 167, 181, 185, 186, 238, 247–261 и др.].

Надежность работы МК непосредственно зависит от условий и режима их эксплуатации. Поддержание в исправном состоянии канала и сооружений на нем требует постоянного ухода, своевременного проведения ремонта и предупредительных мер на потенциально опасных участках, быстрого устранения обнаруженных повреждений, а также систематического выполнения работ по улучшению технического состояния канала.

Одной из основных задач службы эксплуатации МК является достоверная оценка их надежности и безопасности в данное время, а также прогнозирование ее на будущий период.

Служба эксплуатации должна оценивать, прогнозировать и принимать меры по повышению основных показателей надежности:

- работоспособности канала и его отдельных элементов, вероятности его безотказной работы (сохранении своих параметров в заданных пределах при определенных условиях эксплуатации в течение определенного времени);
- долговечности канала и его отдельных конструкций, способности его длительно, с возможными перерывами на ремонт, сохранять работоспособность в заданных режимах и условиях эксплуатации до разрушения, полного износа или момента, когда ремонт становится экономически неоправданным;
- ремонтпригодности канала и его составных элементов, приспособленности его к восстановлению работоспособности путем своевременного ремонта или замены отказавших элементов.

В процессе эксплуатации МК должны проводиться текущие и капитальные ремонты. Аварийные работы – особый вид ремонта, проводимый после стихийных бедствий или аварий.

Текущий и капитальный ремонты – планово-предупредительные, которые проводят в определенном порядке. Аварийные работы выполняют внепланово и, как правило, круглосуточно с принятием всех мер по быстрой ликвидации аварии [262].

В процессе капитального ремонта магистральных каналов производится полное или частичное восстановление отдельных элементов или их групп на канале, конструктивных частей мелиоративной сети и их оборудования или замена их на более прочные и экономичные.

Периодичность капитального ремонта межхозяйственных магистральных или распределительных каналов в земляном русле составляет примерно 10 лет, при среднем сроке службы канала 100 лет.

Перечень основных работ по категориям ремонта, выполняемых на открытых каналах, приведен в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Перечень основных работ по текущему и капитальному ремонту открытых каналов в земляном русле

Текущий ремонт	Капитальный ремонт
Очистка от растительности и мусора. Очистка от наносов магистральных каналов при заилении до 30 % рабочего поперечного сечения канала. Удаление оползней с исправлением откосов и креплением их дерном или посевом трав. Проведение мероприятий по сокращению потерь воды на фильтрацию, уплотнение грунта, глинистая облицовка ложа и т. д. Окашивание откосов берм каналов от травянистой растительности, вырубка и срезка кустарников. Исправление плетневых фашинных и дощатых стенок. Удаление топляков и перемычек. Перемещение и разравнивание кавальеров. Планировка берм и полос отчуждения в приканальной зоне	Придание каналам проектных размеров и уклонов, изменение трассы каналов (до 20 % от общей протяженности) на отдельных участках канала с ремонтом или переустройством элементов сети, затронутых при изменении трасс каналов, по согласованию с землепользователями. В случае сложных инженерно-геологических условий (оползни, обрушения, выклинивания грунтовых вод и т. д.) и по другим техническим причинам в целях повышения эффективности и надежности работы магистральных каналов допускается изменение проектных параметров каналов по согласованию с землепользователями. Устройство перепадов или быстроток в местах размыва каналов. Замена на каналах морально и физически устаревших сооружений на сооружения из долговечных материалов с улучшенными техническими параметрами. Укрепление вогнутого берега (откоса) или увеличение радиуса закругления в случае размыва. Смена изношенных креплений откосов до 50 % от общей площади крепления. Замена креплений (биологических, деревянных, каменных) на бетонные и железобетонные в объеме 20 % (единовременно) от общей площади креплений. Устройство дополнительных пешеходных мостиков, скотопрогонов, водопоев и переездов с креплением при необходимости железобетонными плитами в верхнем и нижнем бьефах. Очистка каналов от наносов при заилении более 30 % рабочего поперечного сечения

Для достоверной оценки надежности и безопасности ГТС необходимо ведение систематических наблюдений за качеством их эксплуатации со сбором и обобщением данных о работе отдельных элементов и регистрацией в специальном журнале:

- всех случаев отказов в работе, их частоты, интенсивности и среднего значения времени между соседними отказами (наработки на отказ);
- проведенных мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности;
- даты, времени и причины возникновения отказа и его устранений;
- конкретного места, характеристики отказа и размера причиненных повреждений;
- времени на отыскание повреждения, ожидание ремонта и его проведение;
- затрат материалов деталей, рабочей силы и денежных средств на устранение повреждения.

Основные параметры надежности работы магистральных каналов устанавлива-

ются в соответствии с методами теории вероятности [263].

На надежную и безопасную работу каналов, особенно на потенциально опасных участках в насыпи и на косогоре, существенное влияние оказывает заиление и зарастание их русел, так как при этом снижается их пропускная способность и скорости течения воды, что может привести к подъему уровня воды и нарушению безопасной работы сооружения. Чтобы обеспечить надежность и безопасность эксплуатации канала необходимо добиться стабильной пропускной и транспортирующей способности по всей длине канала.

Кроме того, в начальный период эксплуатации канала необходим усиленный режим наблюдений за фильтрацией из канала и работой дренажных систем (приканального дренажа) [164].

Появление оползневых процессов характерно чаще всего для искусственных насыпей. Оползни могут появляться вследствие комплекса причин, вызывающих изменение физико-механических свойств грунтов. Например, при неправильном заложении откосов; на грунтах, предрасположенных к оползанию; при повышенной фильтрации из канала; вырубке леса и кустарника; нарушении травяного покрова; распашке близлежащих земель; выпасе скота; подрезке основания неустойчивого косогора при производстве земляных работ и их неорганизованном ведении на самом косогоре.

Оползни представляют собой большую угрозу безопасности эксплуатации потенциально опасных участков каналов ввиду возможного перекрытия русла канала грунтом оползня с последующим повышением уровня воды в канале, переливом воды через бровки дамбы, образованием прорана и, как следствие, затоплением прилегающей территории.

Авторами предлагаются следующие профилактические мероприятия для исключения развития оползневых процессов:

- регулярный наружный осмотр, промеры заложения откосов и берм, надлежащее содержание имеющихся потенциально опасных участков канала и их своевременный ремонт;
- обследование состояния оползневого массива с выявлением необходимых работ по заделке трещин, деформаций и разрывов в грунте;
- устройство облицовок канала на опасных участках для обеспечения уменьшения фильтрации;
- надзор за состоянием водоохранной зоны.

При образовании оползня необходимо выполнить комплекс решений, направленных на устранение причин, вызывающих снижение устойчивости оползневого массива, и на механическое повышение его устойчивости с помощью противооползневых сооружений. В перечень этих мер входят:

- планировка поверхности оползневого массива и покрытие ее водонепроницаемой «одеждой»;
- перераспределение оползневых масс с разгрузкой активной части оползня и укладкой грунта у основания косогора;
- уполаживание низового откоса дамбы канала в насыпи или на косогоре с целью уширения основания дамбы;
- возведение поддерживающих сооружений при ремонте дамб на косогоре.

Оседание насыпей может происходить вследствие уплотнения грунта самой насыпи или из-за просадочных грунтов в основании, в том числе – и оттаявших вечномерзлых, в связи с этим предлагается:

- уширение насыпей;
- быстрый сбор и отвод воды с нагорной стороны насыпи;
- перехват и отвод от насыпи грунтовых вод;

- возведение поддерживающего сооружения;
- отсыпка камня с низовой стороны насыпи.

При выпучивании грунтов с низовой стороны дамбы канала в насыпи необходимо систематически проводить наблюдения за состоянием грунта за дамбой и зондировкой этого участка металлическим шупом. В местах, где выпучивание грунтов с низовой стороны дамбы канала в насыпи связано с наличием грунтовых вод, необходимо устраивать дренажи для перехвата и отвода воды. В качестве дренирующего устройства можно использовать древесные посадки вдоль каналов, если же эти мероприятия не оказывают нужного эффекта, необходимо принимать меры по увеличению длины фильтрационного потока под дамбой.

Очень важным моментом при работе каналов на опасных участках является правильность выполнения проектных и строительных работ. Земляные насыпи, дамбы возводят в основном из однородных связных грунтов. При подготовке основания насыпи предусматривается снятие растительного и плодородного слоев, удаление непригодных грунтов и уплотнение основания.

К основным работам при возведении насыпи дамб каналов можно отнести:

- разгрузку, разравнивание, увлажнение (или подсушивание) и уплотнение грунтов;
- доставку и выгрузку грунта в тело насыпи (обычно осуществляются самосвалами или скреперами).

Схему движения самосвалов (кольцевую или с поворотом на 180°) выбирают в зависимости от ширины слоев отсыпаемого грунта и принятой технологии работ. При этом насыпь по длине обычно разбивается на отдельные участки – карты, на каждой из которых последовательно производят разгрузку транспортных средств, разравнивание грунта и его уплотнение.

Окончательно зачищают земляные насыпи бульдозерами, экскаваторами-планировщиками, грейдерами, автогрейдерами и универсальными бульдозерами с навесным откосным оборудованием.

На основании вышеизложенного и обобщения опыта эксплуатации МК юга России предлагаются мероприятия по повышению надежности и безопасности эксплуатации каналов на потенциально опасных участках в земляном русле (таблица 11.2).

Таблица 11.2 – Мероприятия по повышению надежности и безопасности эксплуатации каналов на потенциально опасных участках в земляном русле

Наименование мероприятия	Периодичность проведения	Повышение показателя надежности и безопасности
1	2	3
1 Поддержание стабильной пропускной и транспортирующей способности по всей длине канала	постоянно	Повышение показателей надежности и безопасности канала на 10–40 %
2 Режимные наблюдения за фильтрацией и работой приканального дренажа на потенциально опасных участках	постоянно	
3 Регулярный наружный осмотр искусственных насыпей, промеры заложения откосов и берм. Надзор за состоянием водоохранной зоны	постоянно	

Продолжение таблицы 11.2

1	2	3
4 Промеры отметок верха дамб канала, контроль за оседанием грунта тела и основания дамб канала	постоянно	
5 Систематические наблюдения за состоянием грунта за дамбой и зондировка опасного участка металлическим щупом	постоянно	
6 Очистка канала от растительности, мусора и наносов	1 раз в 1–2 года	Увеличение пропускной способности в 2–3,5 раза
7 Восстановление проектного поперечного сечения канала	1 раз в 1–2 года	
8 Ликвидация деформаций русла канала при размывах (подсечек) и действиях ветровых волн (ветровая и водная эрозия)	постоянно	Повышение КПД канала на 3–5 %. Уменьшение фильтрационных потерь в 5–10 раз. Повышение общей и местной фильтрационной прочности грунта тела и основания дамбы, увеличение длины пути фильтрации. Уменьшение общего риска возникновения аварийной ситуации
9 Исключение деформаций русла канала, связанных с развитием карстово-суффозионных процессов, заделка трещин с использованием конструкций из геомембран и габионных матов	1 раз в 3 года	
10 Ликвидация просадок дамб на потенциально опасных участках по средствам уширения насыпей, отвода воды с нагорной стороны насыпи, перехват и отвод от насыпи грунтовых вод. Восстановление проектных отметок дамб, возведение поддерживающего сооружения, укрепление откосов	1 раз в 2–3 года	
11 Устранение оползней на верховом и низовом откосах с устройством противофильтрационных устройств или облицовок. Уполаживание низового откоса дамб канала	1 раз в 2 года	
12 Исключение выпучивания грунта с низовой стороны дамбы канала в насыпи или на косогоре по средствам устройства дренажа для перехвата и отвода воды или древесной посадки вдоль канала, увеличение длины фильтрационного потока под дамбой	1 раз в 2 года	
13 Устранение фильтрационных деформаций (мокрых пятен, суффозии, выпора) при выходе фильтрационного	1 раз в 3–5 лет	

Продолжение таблицы 11.2

1	2	3
потока на низовой откос путем устройства противофильтрационных устройств или «одежд»		
14 Текущий ремонт канала	1 раз в 1–3 года	Повышение надежности и безопасности эксплуатации канала на 10–20 %
15 Капитальный ремонт канала	1 раз в 5–10 лет	Повышение надежности и безопасности эксплуатации канала (КПД – до 0,93–0,95, общего риска аварии λ – до значений, не превышающих значений нормативного риска λ_n)

Проведение предлагаемых мероприятий позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации магистральных каналов на потенциально опасных участках в среднем на 10–40 %, при этом КПД канала может увеличиться на 3–5 % и принять нормативные значения 0,93–0,95 (для земляных русел).

Перечисленные в таблице 11.2 мероприятия сократят фильтрационные потери в 5–10 раз, а также увеличат длину пути фильтрации, общую и местную фильтрационную прочность грунта тела и основания дамбы. В целом использование предлагаемого комплекса мероприятий поспособствует уменьшению величины общего риска возникновения аварийной ситуации на участке канала в насыпи или на косогоре.

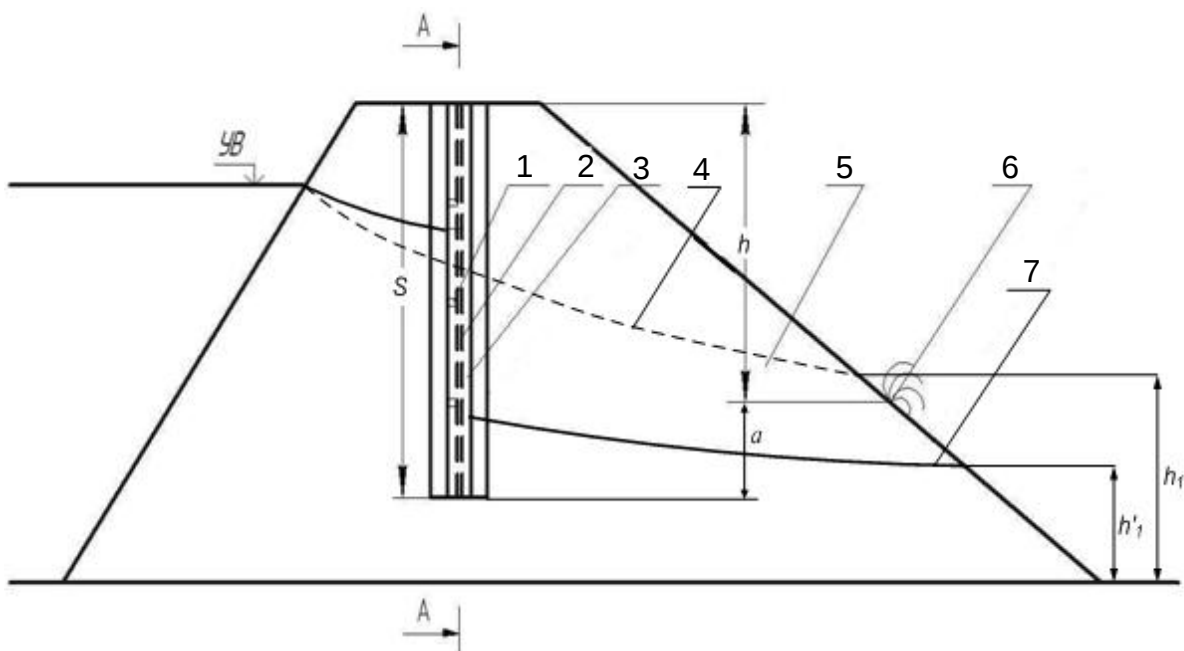
11.2 Противофильтрационная диафрагма дамб каналов

Для повышения надежности дамб каналов ООО «ЮжНИИГиМ» разработана противофильтрационная диафрагма для дамб каналов высотой до 10 м, выполненных из грунтовых материалов (патент на изобретение № 2539147). Конструкция противофильтрационной диафрагмы представлена на рисунках 11.1 и 11.2.

Сущность технического результата заключается в повышении эксплуатационной надежности низконапорных плотин и дамб из грунтовых материалов и снижении строительной стоимости противофильтрационной диафрагмы.

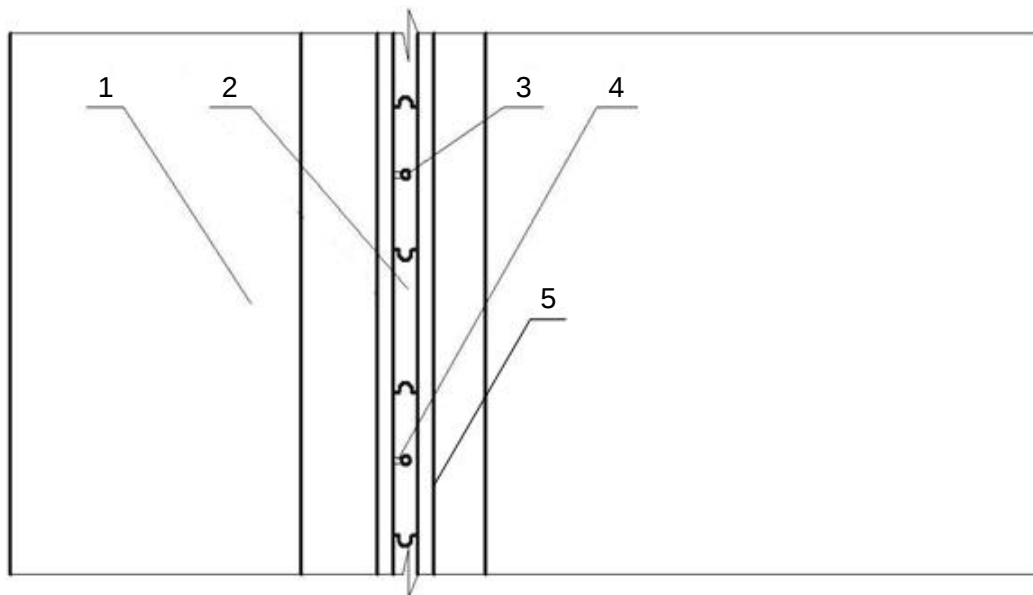
Противофильтрационная диафрагма состоит из плит двух типов А (рисунок 11.3) и Б (рисунок 11.4), изготовленных из отходов полиолефинов, снабженных внутренними и наружными полуцилиндрическими выступами и каналами, плотно соприкасающимися между собой, препятствующими их сдвигу в процессе эксплуатации и проникновению фильтрационных вод в нижний бьеф.

Соединенные посредством полуцилиндрических выступов и каналов плиты помещаются в траншею на гребне плотины или дамбы на глубину необходимую для отсечения фильтрационного потока, при этом в плитах предусматриваются продольные цилиндрические полости, снабженные фильтрационными отверстиями, выполненными со стороны верхнего бьефа и предназначенными для определения уровня воды в теле плотины или дамбы. Для предотвращения выноса грунта фильтрационным потоком по контуру противофильтрационной диафрагмы выполняется обратный фильтр из нетканого геотекстиля.



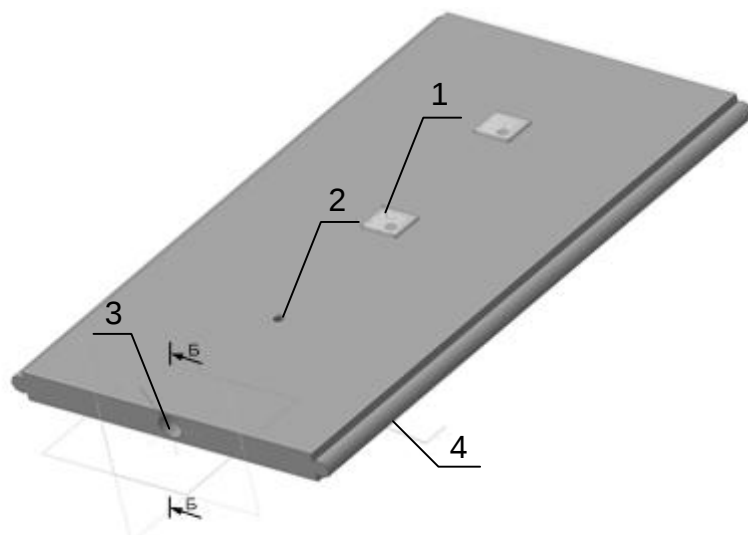
1 – отверстия в диафрагме; 2 – продольная цилиндрическая полость;
 3 – противофильтрационная диафрагма; 4 – положение кривой депрессии до устройства диафрагмы; 5 – тело дамбы канала; траншея; 6 – очаг фильтрационных деформаций; 7 – положение кривой депрессии после устройства диафрагмы

Рисунок 11.1 – Общий вид противофильтрационной диафрагмы в теле водоподпорного сооружения



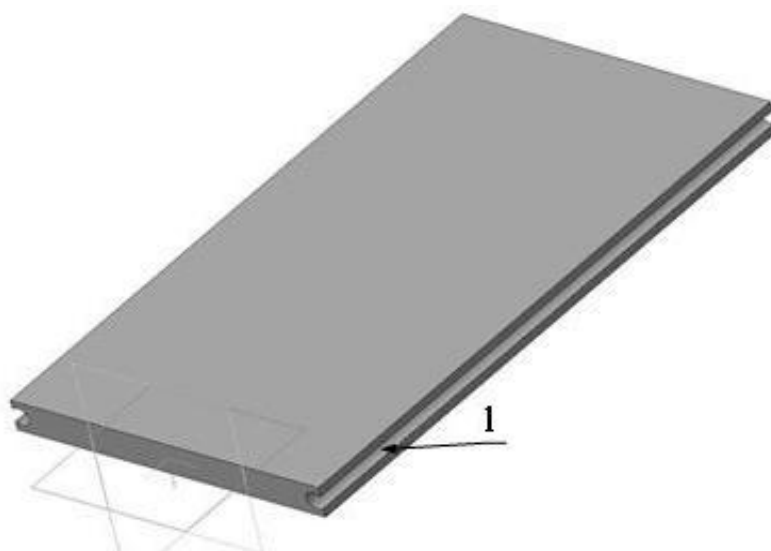
1 – тело дамбы канала; 2 – противофильтрационная диафрагма; 3 – цилиндрическая полость; 4 – отверстия в диафрагме; 5 – траншея

Рисунок 11.2 – Противофильтрационной диафрагмы в теле водоподпорного сооружения (вид сверху)



1 – фильтр из геотекстиля; 2 – отверстия в диафрагме; 3 – цилиндрическая полость;
4 – наружные полуцилиндрические выступы

Рисунок 11.3 – Плита типа А



1 – внутренний полуцилиндрический канал

Рисунок 11.4 – Плита типа Б

Технический результат достигается применением противофильтрационной диафрагмы из плит, выполненных из отходов полиолефинов, снабженных продольной цилиндрической полостью, предназначенной для определения уровня воды и устраиваемой в гребне низконапорной плотины или дамбы из грунтовых материалов.

Предлагаемое устройство обеспечивает повышение надежности низконапорных плотин и дамб из грунтовых материалов высотой до 10 м за счет обеспечения водонепроницаемости противофильтрационного устройства и доступности проведения наблюдений за уровнем грунтовых вод в теле плотины, применение предлагаемой противофильтрационной диафрагмы способствует снижению строительной стоимости и материалоемкости с одновременной утилизацией отходов полиолефинов.

Повышение эксплуатационной надежности низконапорных плотин и дамб из грунтовых материалов высотой до 10 м достигается следующим образом.

При выявлении очагов фильтрационных деформаций на низовом откосе низкона-

порной плотины или дамбы в виде грифонов и ключей, определяют положение выхода кривой депрессии фильтрационного потока. Затем осуществляют устройство противofильтрационной диафрагмы в траншее на гребне плотины или дамбы на глубину, равную $S = h + a$, где h – расстояние по вертикали от отметки гребня плотины до места проявления очага фильтрационных деформаций на низовом откосе, м; a – величина заглубления диафрагмы (принимаемая от 1,0 до 1,5 м в зависимости от высоты сооружения), м. Траншею под диафрагму выполняют на глубину S , шириной 0,2–0,3 м, работы производят с помощью экскаватора, обеспечивающего необходимую глубину разработки грунта.

Устройство противofильтрационной диафрагмы на глубину $S = h + a$ позволит значительно снизить высоту выхода депрессионной кривой на низовой откос с величины h_1 до h'_1 и уменьшить выходные градиенты фильтрационного потока до безопасного значения, исключающего образование фильтрационных деформаций (суффозии, грифонов и ключей). Устройство противofильтрационной диафрагмы на глубину более $S = h + a$ нецелесообразно, так как при этом устройство траншеи для противofильтрационной диафрагмы усложняется, а эффект защиты низового откоса не увеличивается.

Плиты, изготовленные в заводских условиях из отходов полиолефинов, имеют следующие параметры: толщина – 0,1 м, ширина – 1,5 м, длина – 8,0 м, снабжены полуцилиндрическими выступами и каналами. Плиты типа А снабжены наружными полуцилиндрическими выступами, имеющими округлую форму, а также имеют продольную цилиндрическую полость, диаметром 0,08 м, центр которой расположен на расстоянии 0,5 м от кромки плиты, при этом продольная цилиндрическая полость имеет на одной из стенок отверстия диаметром 0,03 м, расположенные с расстоянием между центрами 0,5 м. Для предотвращения попадания в продольную цилиндрическую полость грунта, отверстия закрыты фильтром из нетканого геотекстиля плотностью 200 г/м². Плиты типа Б снабжены внутренними полуцилиндрическими каналами.

Далее плиты разрезаются на секции длиной S , из полученных секций формируют противofильтрационную диафрагму путем соединения внутренних и наружных коннекторов. Длина противofильтрационной диафрагмы определяется по формуле $L_{п.д.} = L_T - 1,0$, где L_T – длина траншеи, м, 1,0 м – запас.

Затем производят раскройку геотекстиля на полотнища размером: шириной – 0,6 м, длиной – равной глубине траншеи S , полученные полотнища прикрепляют к боковым граням диафрагмы с нахлестом 0,1 м путем нагрева поверхности плиты.

Далее противofильтрационную диафрагму в ручную или с помощью автокрана опускают в траншею, устроенную на гребне плотины, при этом отверстия в плитах типа А направлены в сторону верхового откоса. Засыпку траншеи производят вручную.

В процессе эксплуатации водоподпорного сооружения возможно проведение периодических наблюдений за уровнем грунтовых вод в теле сооружения, при этом уровень грунтовых вод измеряют в продольных цилиндрических полостях уровнемером скважинным, например УСП-Л-50. Данные наблюдений позволяют прогнозировать изменение показателей надежности сооружения.

Противofильтрационную диафрагму плотин и дамб из грунтовых материалов выполняют следующим образом. В теле водоподпорного сооружения формируют траншею. Из плит типа А и плит типа Б собирают противofильтрационную диафрагму, путем соединения наружных полуцилиндрических выступов и внутренних полуцилиндрических каналов, после чего к противofильтрационной диафрагме прикрепляют полотна нетканого геотекстиля, выполняющего роль обратного фильтра, затем диафрагму опускают в траншею, ориентируя отверстия, защищенные фильтром из геотекстиля в сторону верхнего бьефа. Далее производится засыпка траншеи. В процессе эксплуатации специалистами

эксплуатирующей организации могут проводиться наблюдения за положением уровня грунтовых вод в теле водоподпорного сооружения путем замера уровня воды в продольной цилиндрической полости.

При появлении на низовом откосе низконапорной плотины или дамбы очага фильтрационных деформаций в ее теле выполняют противофильтрационную диафрагму. Противофильтрационная диафрагма работает следующим образом. Фильтрационный поток, встречая на своем пути противофильтрационную диафрагму, гасит значительную часть фильтрационного напора, в результате чего происходит значительное понижение кривой депрессии, вследствие чего снижаются выходные градиенты фильтрационного потока до безопасных значений, исключая дальнейшее появление фильтрационных деформаций.

Предлагаемая противофильтрационная диафрагма плотин и дамб из грунтовых материалов позволит устранить фильтрацию через тело водоподпорного сооружения. Выполнение противофильтрационной диафрагмы из плит, изготовленных из отходов полиолефинов, способствует удешевлению конструкции и вторичной переработке отходов полимеров. Наличие обратного фильтра из геотекстиля исключит вероятность выноса грунта по контуру противофильтрационной диафрагмы. Наличие в плитах продольных цилиндрических полостей позволит производить наблюдения за уровнем грунтовых вод в теле водоподпорного сооружения, что позволит своевременно определить и прогнозировать изменения его технического состояния. Кроме того, изготовление плит длиной 8,0 м и возможность их разрезки на секции необходимой длины делают предлагаемое устройство универсальным.

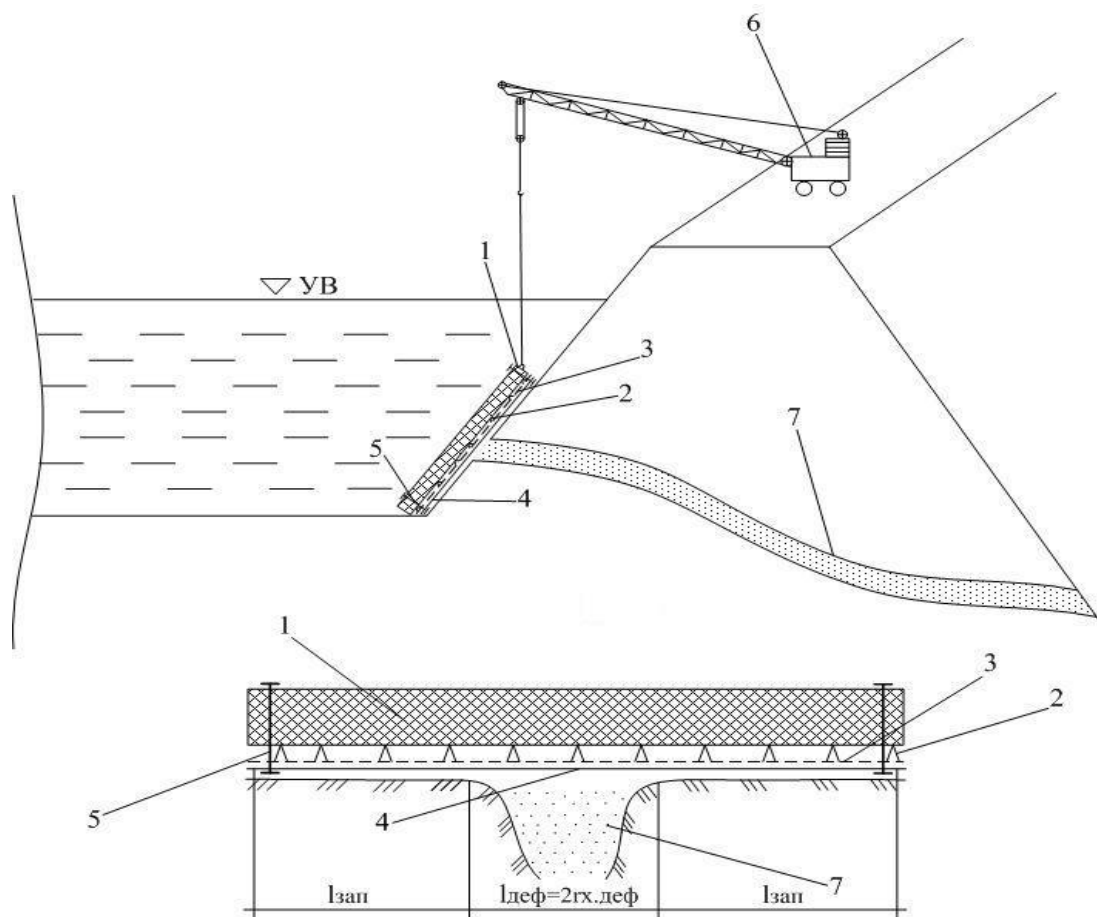
11.3 Способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала

ФГБНУ «РосНИИПМ» разработан способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала, который может быть использован при проведении аварийно-восстановительных работ под водой посредством заделки фильтрационных ходов в размываемых руслах каналов. Предлагаемый способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала без его опорожнения повышает качество укладки, производительность и водонепроницаемость за счет использования габионно-геомембранной конструкции защитного покрытия (патент на изобретение № 2562487) [264].

На рисунке 11.5 изображена укладка габионно-геомембранной конструкции и заделка очага фильтрационных деформаций в дамбе канала, а также ширина габионно-геомембранной конструкции, необходимая для заделки очага фильтрации.

Габионно-геомембранная конструкция собирается следующим образом. Габионы размещают в решетчатые арматурные каркасы (заранее изготовленные по размерам 4×3×0,3 м, весом 37 кг), к которым по всему периметру проволокой через 1,0–1,5 м прикрепляется тканый геотекстиль, обладающий высокой прочностью, малой деформируемостью, высокой водопроницаемостью и средней плотностью (600 г/м²), после чего укладывается полотно водонепроницаемой геомембраны (изготовленной, например, из полиэтилена низкой или высокой плотности, в том числе из полимерных отходов) и производится крепление всей конструкции с двух сторон с помощью металлических скоб.

После этого готовая габионно-геомембранная конструкция погружается под воду на откос с помощью подъемного крана на предварительно установленное по результатам промерных работ место расположения входной части свободного фильтрационного хода в дамбе канала.



- 1 – арматурные каркасы с габионами; 2 – алюминиевая проволока; 3 – геотекстиль;
 4 – водонепроницаемая геомембрана; 5 – металлическая скоба; 6 – подъемный кран;
 7 – свободный фильтрационный ход

Рисунок 11.5 – Укладка габионно-геомембранной конструкции и заделка очага фильтрационных деформаций

Размеры габионно-геомембранной конструкции защитного покрытия конструкции будут зависеть от размера фильтрационного хода, а также от геологических и просадочных свойств грунта и определяются по формуле:

$$l_{\text{кон.}} = l_{\text{зап}} + 2l_{\text{деф}}, \quad (11.1)$$

где $l_{\text{кон.}}$ – ширина габионно-геомембранной конструкции защитного покрытия, м;

$l_{\text{зап}}$ – ширина запаса, м;

$l_{\text{деф}}$ – ширина области деформации, м.

Необходимая ширина запаса для исключения контактной фильтрации под габионно-геомембранной конструкцией принимается не менее $l_{\text{зап}} \geq 1,5-2,0$ м, что позволяет под действием гидростатического давления прижимать плотно к основанию и области деформации непроницаемую геомембрану и исключить развитие фильтрационных деформаций через образованный фильтрационный ход.

Преимуществом предлагаемого способа заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала является быстрота и простота производства работ, локализация фильтрационного хода, полная водонепроницаемость за счет использования габионно-геомембранной конструкции.

12 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, РЕМОНТА, РЕКОНСТРУКЦИИ ИЛИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

12.1 Существующие подходы для проведения оценки целесообразности дальнейшей эксплуатации, ремонта, реконструкции или ликвидации низконапорных гидротехнических сооружений IV класса

Как было отмечено ранее в п. 1.2, по данным Ростехнадзора на 2014 г. низконапорных ГТС IV класса, в том числе бесхозяйных ГТС, насчитывается 29964 сооружений, что составляет 95,7 % от всех поднадзорных ГТС. Таким образом, подавляющее большинство ГТС, поднадзорных Ростехнадзору, относятся к IV классу и в основном находятся в ведении Минсельхоза РФ и Росводресурсов, т. е. имеют водохозяйственное назначение.

Ввиду многочисленности низконапорных ГТС часто они создавались без проектов, на многих объектах отсутствует техническая документация по их эксплуатации, не имеется работников, занимающихся эксплуатацией таких сооружений, техническое состояние многих сооружений оценивается как неудовлетворительное или аварийное, востребованность значительного количества ГТС либо отсутствует, либо весьма мала.

Все это определяет актуальность и необходимость проведения оценки для решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу их из эксплуатации.

Существующие подходы к решению подобных задач основаны на выборе оптимального варианта дальнейшего использования ГТС на основе технико-экономических расчетов, вероятностно-экономическом анализе с учетом и без учета риска аварий [65, 66, 68, 238].

Д. В. Стефанишин [66] предлагает учитывать при обосновании мероприятий по повышению безопасности ГТС принцип разумно достижимых низких уровней риска (ALARP), который применяют в Великобритании.

Принцип разумно достижимых низких уровней риска позволяет при принятии решений по повышению безопасности ГТС целенаправленно реализовать концепции пригодности, оптимизации и адаптивности.

В соответствии с концепцией пригодности, экономически эффективными вариантами повышения безопасности ГТС [66] можно считать такие варианты, при которых дополнительные затраты на соответствующие мероприятия компенсируются снижением вероятных потерь (риском ущербов) в результате гипотетической аварии на сооружении.

При этом условие экономической эффективности i -го решения может иметь следующий общий вид:

$$\sum_{t=1}^T \Delta C_{i,t} < \sum_{t=1}^T \Delta I_{i,t}, \quad (12.1)$$

$$\Delta C_{i,t} = C_{i,t} - \Delta C_{0,t}; \Delta I_{i,t} = I_{0,t} - I_{i,t}, \quad (12.2)$$

где T – период эксплуатации гидротехнического сооружения, на который рассчитаны мероприятия по повышению безопасности, ч;

$\Delta C_{i,t}$ – дисконтированные на момент оценки экономической эффективности ежегодные дополнительные мероприятия на повышение безопасности ГТС по сравнению с базисным («нулевым») вариантом обеспечения безопасности;

$\Delta I_{i,t}$ – величина снижения вероятных годовых потерь (годового риска ущербов) в

результате гипотетической аварии;

$C_{i,t}, \Delta C_{0,t}, l_{0,t}, l_{i,t}$ – соответствующие оценки обобщенных затрат C на обеспечение безопасности ГТС и вероятных потерь (рисков ущербов) l в результате потенциальной аварии на ГТС при исходном (нулевом) и i -ом варианте проведения дополнительных мероприятий по обеспечению безопасности на момент времени t .

Реализация концепции пригодности позволит при анализе вариантов мероприятий отбирать экономически оправданные варианты.

Согласно концепции оптимизации в качестве оптимального варианта мероприятий [66], направленных на повышение безопасности, может быть выбрана альтернатива, обеспечивающая максимум функционала:

$$\sum_{t=1}^T \Delta l_{i,t} - \sum_{t=1}^T \Delta C_{i,t} \rightarrow \max, \quad (12.3)$$

где величина $\sum_{t=1}^T \Delta l_{i,t}$ с точки зрения выбора оптимального решения может рассматриваться как ожидаемый выигрыш, получаемый от i -го варианта по сравнению с исходным (нулевым) вариантом.

Вероятные потери (риск ущерба) l в результате аварии на ГТС определяется в виде произведения безусловной вероятности (риска аварии) λ на величину вызванного этой аварией ущерба Y :

$$l = \lambda Y. \quad (12.4)$$

Такой подход к оценке риска ущербов от аварий на ГТС рекомендуется Международной Комиссией по большим плотинам (СИГБ) [66].

В работах Г. М. Каганова [192, 202] одним из первых обосновывается такой подход к проектированию ГТС. Наиболее экономичное проектное решение находится путем минимизации суммы затрат на возведение сооружения Π и риска λ , связанного с возможными повреждениями и авариями:

$$\bar{\Pi} = \Pi + \sum \lambda_i Y_i, \quad (12.5)$$

где $\bar{\Pi}$ – общие затраты с учетом риска аварии, руб.;

λ_i – вероятность отдельных повреждений или аварий;

Y_i – ущерб, вызванный каждым повреждением или аварией, руб.

Согласно данным, представленным на XIV конгрессе по большим плотинам, годовая вероятность разрушения современных плотин составляет 10^{-4} и 10^{-5} и варьирует в зависимости от вида и класса сооружения.

В работе Ц. Е. Мирцхулавы [65] рассматривается вопрос об оптимальном уровне надежности, который можно установить путем минимизации суммарных затрат.

В случаях, когда учитываются ущербы и эффекты (прибыли), а также длительный срок эксплуатации, наивыгоднейший вариант определяется по условию:

$$\bar{Z}_\tau + \bar{Y}_{\text{шт}_\tau} - \bar{\Theta}_{\text{эф}_\tau} \rightarrow \min, \quad (12.6)$$

где $\bar{Z}_\tau$ – приведенные затраты, подсчитанные с учетом фактора времени, руб.:

$$\bar{Z}_\tau = \sum_{i=1}^m (E_n K_t + \Delta I_t) (1 + E_{\text{н.п.}})^{\tau-t}, \quad (12.7)$$

где m – число лет, в течение которых производят капитальные вложения и изменяются ежегодные издержки;

E_n – нормативный коэффициент приведения затрат;

K_t – капитальные вложения в год t , руб.;

ΔI_t – приращение ежегодных издержек в год t , руб.;

$E_{н.п.}$ – нормативное значение коэффициента приведения (0,06–0,10);

τ – год приведения затрат;

$\bar{U}_{шт\tau}$ – ущербы с учетом фактора времени;

$\bar{\Xi}_{эф\tau}$ – эффекты (прибыли) с учетом фактора времени.

Черта сверху в величинах затрат, ущербов и эффектов обозначает приведенные характеристики затрат в году приведения.

Таким образом, проведенный анализ подходов к оценке дальнейшего использования ГТС показывает, что они в основном учитывают приведенные затраты, ущербы и эффекты (прибыли), приведенные к определенному году. Кроме того, при оценке ущербов учитывается одна из основных характеристик безопасности ГТС – риск аварии.

На основании вышеизложенного для разработки методики оценки оптимального варианта дальнейшего использования ГТС целесообразно учесть рассмотренные выше подходы. При этом необходимо будет обосновать различные уровни безопасности ГТС, которые применяются в Регистре гидротехнических сооружений, с точки зрения величины вероятного риска аварии.

12.2 Обоснование уровней безопасности для принятия решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу из эксплуатации низконапорных гидротехнических сооружений

В Российском регистре гидротехнических сооружений принято четыре уровня безопасности ГТС: нормальный, пониженный, неудовлетворительный и опасный.

Нормальный уровень безопасности считается такой уровень, при котором сооружение не имеет дефектов и повреждений, дальнейшее развитие которых может привести к аварии, а его эксплуатация осуществляется с выполнением норм и правил безопасности.

Пониженный уровень безопасности – такой уровень, при котором сооружение находится в нормальном техническом состоянии, но наблюдается нарушения правил эксплуатации.

Неудовлетворительный уровень безопасности характеризуется превышением первого (предупреждающего) уровня значений критериев безопасности и ограниченной работоспособностью сооружения.

Опасный уровень безопасности характеризуется превышением предельно допустимых значений критериев безопасности, при котором сооружение не подлежит эксплуатации.

При обосновании уровней безопасности принятых в регистре ГТС будем исходить из того, что наиболее высокий уровень безопасности должен соответствовать допускаемому значению риска вероятной аварии ГТС.

Следовательно, для нормального уровня безопасности риск вероятности аварии ГТС IV класса не должен превышать указанного значения – $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год, а для остальных уровней безопасности риска аварии должен повышаться, достигая максимального значения при опасном уровне безопасности.

Используя рекомендации по классификации уровня риска аварии ГТС, предложенные ГНЦ РФ (ОАО «ВНИИ ВОДГЕО») [34], приведем их значения для низконапорных ГТС IV класса (таблица 12.1).

Таблица 12.1 – Степень риска вероятной аварии на низконапорных ГТС IV класса

Уровень безопасности	Нормальный	Пониженный	Неудовлетворительный	Опасный
Риск аварии для ГТС IV класса, 1/год	$< 5 \cdot 10^{-3}$	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$	$\geq 5 \cdot 10^{-2}$	$\geq 1,8 \cdot 10^{-1}$

Следует отметить, что приведенные значения риска аварии в зависимости от уровня безопасности практически совпадают с расчетными оценками ФГБНУ «РосНИИПМ» [58] с учетом технического состояния ГТС для нормального, пониженного, неудовлетворительного и опасного уровня безопасности.

12.3 Методика оценки вариантов для принятия решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или выводу из эксплуатации низконапорных гидротехнических сооружений

Данная методика основывается на ранее изложенных подходах в п. 12.1 и предусматривает определение суммы приведенных затрат, сумм прибылей (доходов) от использования водных ресурсов всеми водопользователями и суммы вероятных ущербов от аварии ГТС. Решение задачи выбора наиболее целесообразного варианта дальнейшего использования ГТС или вывода его из эксплуатации осуществляется путем минимизации целевой функции, учитывающей все вышеперечисленные составляющие. При этом для определения суммы вероятных ущербов от аварий ГТС учитывается уровень безопасности сооружения для каждого рассматриваемого варианта, который определяет риск вероятной аварии низконапорных ГТС IV класса (см. таблицу 12.1).

Общее выражение целевой функции $\bar{C}$, основанной на вероятностно-экономическом подходе, имеет следующий вид:

$$\bar{C}_f = \sum_{i=1}^n \bar{Z}_i - \sum_{i=1}^k R_i + \sum_{i=1}^m \lambda_i U_i + \sum_{i=1}^l S_i \rightarrow \min, \quad (12.8)$$

где $\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i$ – сумма приведенных затрат по рассматриваемому варианту использования

ГТС, руб.;

$\sum_{i=1}^k R_i$ – сумма прибылей (доходов) от использования воды всеми водопотребителями и водопользователями, руб.;

$\sum_{i=1}^m \lambda_i U_i$ – сумма вероятных ущербов от аварии ГТС, руб.;

λ_i – риск (вероятность) аварии ГТС;

U_i – ущерб, вызванный аварией ГТС, от затопления населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий, руб.;

$\sum_{i=1}^l S_i$ – сумма компенсаций водопользователям.

В таблице 12.2 представлены рассматриваемые варианты ГТС в целевой функции, их уровни безопасности и рекомендуемые значения риска вероятной аварии.

Таблица 12.2 – Рассматриваемые варианты гидротехнических сооружений, их уровни безопасности и значения риска аварии

Рассматриваемый вариант	Возможное дальнейшее использование ГТС	Уровень безопасности вариантов ГТС	Превышение диагностических критериев безопасности	Рекомендуемые значения вероятного риска аварии, 1/год	Рекомендуемые мероприятия по повышению уровня безопасности	Востребованность варианта ГТС
Вариант I	Возможна дальнейшая эксплуатации ГТС	Пониженный	Один из диагностических показателей выходит за пределы критериев 1-го уровня K_1	$\frac{(0,6 - 3,0) \cdot 10^{-2}}{1,0 \cdot 10^{-2}}$	Необходимо проведение эксплуатационных мероприятий	Востребован
Вариант II	Возможна дальнейшая эксплуатации ГТС	Пониженный	Несколько диагностических показателей выходит за пределы критериев 1-го уровня K_1	$\frac{(0,6 - 3,0) \cdot 10^{-2}}{2,5 \cdot 10^{-2}}$	Необходимо проведения текущего ремонта	Востребован
Вариант III	Возможна дальнейшая эксплуатации ГТС	Неудовлетвор. или опасный	Один или несколько диагностических показателей выходит за пределы критериев 2-го уровня K_2	$\frac{(4,0 - 7,0) \cdot 10^{-2}}{4,0 \cdot 10^{-2}}$ $\frac{(8,0 - 10) \cdot 10^{-2}}{8,0 \cdot 10^{-2}}$	Необходимо проведения капитального ремонта	Востребован
Вариант IV	Необходима реконструкция ГТС	Неудовлетвор. или опасный	Несколько диагностических показателей выходит за пределы критериев 2-го уровня K_2	$\frac{(4,0 - 7,0) \cdot 10^{-2}}{5,0 \cdot 10^{-2}}$ $\frac{(8 - 10) \cdot 10^{-2}}{9,0 \cdot 10^{-2}}$	После реконструкции ГТС уровень риска понизится до нормативного	Востребован
Вариант V	Необходим вывод из эксплуатации ГТС	Неудовлетвор. или опасный	Большинство диагностических показателей выходит за пределы критериев 2-го уровня K_2	$\frac{(4,0 - 7,0) \cdot 10^{-2}}{7,0 \cdot 10^{-2}}$ $\frac{(8,0 - 10) \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-2}}$	—	Не востребован

Примечание – В графе «Рекомендуемые значения вероятного риска аварии» указано: в числителе – диапазон изменения риска аварии при соответствующем уровне безопасности, в знаменателе – значение риска аварии для данного варианта с учетом превышения диагностических показателей.

Для сравнимости вариантов использования ГТС в целевой функции (12.8) учитывается коэффициент приведения (дисконтирования):

$$\bar{C}_f = \sum_{t=1}^{\tau} \left[\alpha_t \left(\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i - \sum_{i=1}^k R_i + \sum_{i=1}^m \lambda_i V_i \right) + \sum_{i=1}^l S_i \right] \rightarrow \min, \quad (12.9)$$

где α_t – коэффициент приведения (дисконтирования), определяемый по формуле:

$$\alpha_t = (1 - E_{ин})^{\tau-t}, \quad (12.10)$$

где $E_{ин}$ – нормативное значение коэффициента приведения (0,06–0,10);

τ – год приведения затрат;

t – годы в течение всего срока службы (жизненного цикла) ГТС.

При расчете целевой функции (12.9) учитываются следующие составляющие:

$\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i$ – сумма приведенных затрат по рассматриваемому варианту использования

ГТС, рассчитываемая по формуле:

$$\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i = \sum_{i=1}^n (E_{ин} K_i + I_i), \quad (12.11)$$

где K_i – капитальные затраты по рассматриваемому варианту, руб., определяемые по формуле:

$$K_i = K_{пл} + K_{вс}, \quad (12.12)$$

где $K_{пл}, K_{вс}$ – капитальные затраты на плотину и водосброс (капитальный ремонт или реконструкция), руб.;

I_i – ежегодные текущие затраты по рассматриваемому варианту, руб., определяемые как:

$$I_i = I_{экс} + I_{пл} + I_{вс}, \quad (12.13)$$

где $I_{экс}$ – ежегодные эксплуатационные затраты, руб.;

$I_{пл}$ – затраты на текущий ремонт плотины, руб.;

$I_{вс}$ – затраты на текущий ремонт водосброса, руб.;

$\sum_{i=1}^n R_i$ – сумма прибылей (дохода) от использования воды всеми водопользователями, руб.

Доход от использования воды всеми водопользователями определяется по формуле:

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_{ор} + R_{вс} + R_{рыб}, \quad (12.14)$$

где $R_{ор}$ – прибыль от орошения, руб.;

$R_{вс}$ – прибыль от водоснабжения населения и сельхозпредприятий, руб.;

$R_{рыб}$ – прибыль от рыбозаведения, руб.

Суммарный риск аварийной опасности, определяемый независимыми факторами, будет равен [73]:

$$\lambda_{сум} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \quad (12.15)$$

где λ_1 – риск аварии грунтовой плотины при переливе через гребень вследствие волновых и нагонных явлений и недостаточном запасе отметки гребня над НПУ;

λ_2 – риск разрушения грунтовой плотины от паводка, превышающего расчетный 1 % обеспеченности;

λ_3 – риск разрушения плотины вследствие фильтрационных процессов (суффозии грунта тела и основания плотины);

$\sum_{i=1}^l S_i$ – сумма компенсаций потребителям при опорожнении пруда (водохранилища) при выводе из эксплуатации ГТС, равная:

$$\sum_{i=1}^l S_i = S_{ор} + S_{вс} + S_{рыб}, \quad (12.16)$$

где $S_{ор}, S_{вс}, S_{рыб}$ – компенсационные выплаты водопользователям вследствие прекращения орошения, водоснабжения и рыбозаведения, руб.

При этом за расчетный год принимается настоящий год эксплуатации ГТС τ , например 20-й год, за период $t = 1-50$ лет. Полученные таким образом все затраты суммируют за все годы жизненного цикла и затем сопоставляют варианты.

Рассматривая данную задачу в общем виде как экономико-математическую с учетом вероятных рисков аварии грунтовой плотины, для решения ее можно использовать известные методы линейного программирования, основанные на симплекс-методе.

В целях реализации экономико-математической модели используются следующие ограничения:

- для затрат на ремонт и эксплуатацию плотины и водосброса:

$$0 \leq C_{экс_i} \leq 0,02C_{бал} - \text{эксплуатационные затраты на ГТС}; \quad (12.17)$$

$$0,02C_{балпл} \leq C_{пл_i} \leq 0,20C_{балпл} - \text{текущий ремонт}; \quad (12.18)$$

$$0,20C_{балпл} \leq K_{пл_i} \leq 0,50C_{балпл} - \text{капитальный ремонт}; \quad (12.19)$$

$$0,50C_{балпл} \leq K_{рпл_i} \leq C_{балпл} - \text{реконструкция}; \quad (12.20)$$

- для затрат на вывод из эксплуатации ГТС:

$$0,20C_{бал} \leq K_{выв.эк} \leq 0,40C_{бал}; \quad (12.21)$$

- для вариантов дальнейшего использования ГТС:

$$K_{выв.эк} = 0; \quad (12.22)$$

- для компенсационных выплат все водопользователям при выводе из эксплуатации ГТС:

$$0 \leq S_i \leq 0,30C_{бал}, \quad (12.23)$$

где $C_{бал}$ – балансовая стоимость ГТС;

- для прибылей от использования водных ресурсов пруда (водохранилища) водопользователями:

$$0 \leq R \leq 0,50C_{бал}, \quad (12.24)$$

где $C_{бал}$ – балансовая стоимость ГТС;

- для рисков разрушения грунтовой плотины и водосброса:

$$5 \cdot 10^{-3} \leq \lambda_i \leq 0,1. \quad (12.25)$$

Риск аварии грунтовой плотины и водосброса рассчитывается по методике, изложенной в разделе 4; в случае вывода из эксплуатации ГТС – $\lambda_i = 0$;

Коэффициент значения рисков разрушений грунтовой плотины при переливе через гребень плотины вследствие волновых и нагонных явлений λ_1 , вследствие паводков, превышающих расчетный λ_2 , и при воздействии фильтрационных процессов λ_3 рассчитываются по методике, изложенной в п. 4.3.2–4.3.4.

Ущерб от затопления населенных пунктов и сельхозугодий $U_1(U_2)$, руб., опреде-

ляется по формуле:

$$Y_1(Y_2) = C_{\text{жил}} + Y_{\text{с.-х.}} = C_{\text{жил}_{\text{ччч}}} N_{\text{жит}} + Y_{\text{с.-х.}_{1\text{г}}} F_{\text{зат}}, \quad (12.26)$$

где $C_{\text{жил}_{\text{ччч}}}$ – стоимость жилья, имущества и земельных участков в расчете на одного жителя, руб.;

$N_{\text{жит}}$ – число жителей, попадающих в зону затопления, чел.;

$Y_{\text{с.-х.}_{1\text{г}}}$ – ущерб сельскохозяйственному производству в расчете на площадь 1 га, руб.;

$F_{\text{зат}}$ – площадь сельскохозяйственных угодий, попадающих в зону затопления, га.

При выборе оптимального варианта дальнейшего использования ГТС необходимо учитывать некоторые критерии, представленные в таблице 12.3.

Таблица 12.3 – Основные критерии для выбора оптимального варианта бесхозяйного гидротехнического сооружения

Характеристика условия	Математическая запись
Минимизация приведенных затрат на ремонт и эксплуатацию плотины и водосброса	$\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i \rightarrow \min$
Минимизация компенсаций водопользователям при ликвидации ГТС	$\sum_{i=1}^n S_i \rightarrow \min$
Получение максимальной прибыли от использования водных ресурсов водохранилища всеми водопользователями	$\sum_{i=1}^n R_i \rightarrow \max$
Востребованность бесхозяйного ГТС на ближайшую перспективу	$\sum_{i=1}^n P_i > 0$

В качестве таких критериев предлагается использовать минимизацию приведенных затрат на ремонт и эксплуатацию плотины и водосброса, минимизацию компенсаций водопользователям при ликвидации ГТС, получение максимальной прибыли от использования водных ресурсов водохранилища всеми водопользователями.

12.4 Методика оценки целесообразности дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйных гидротехнических сооружений

За основу методики оценки целесообразности дальнейшего использования бесхозяйных ГТС принята ранее изложенная методика для низконапорных ГТС в п. 12.3.

В качестве основных вариантов принятия решения о выборе оптимального варианта дальнейшей эксплуатации или ликвидации бесхозяйного ГТС рассмотрим пять основных вариантов:

- вариант I – современный уровень эксплуатации ГТС без ремонта, не отвечающий требованиям безопасности;

- вариант II – частичный или текущий ремонт плотины и водосброса с сохранением эксплуатационных параметров пруда или водохранилища и уменьшением риска аварии;

- вариант III – капитальный ремонт плотины или водосброса с уменьшением риска аварии, отвечающий требованиям безопасности;

- вариант IV – реконструкция плотины и водосброса с уменьшением риска аварии до нормативного, отвечающий требованиям безопасности;

- вариант V – ликвидация бесхозяйного ГТС, как нецелесообразного для дальнейшего использования.

Уровни безопасности, превышение диагностических показателей и значения вероятного риска аварии здесь приняты аналогично таблице 12.2, соответственно, для пяти вариантов ГТС (вариант I–V).

Для расчета оптимального варианта дальнейшего использования бесхозяйственного ГТС также используется целевая функция (12.8) из п. 12.3 с учетом коэффициента приведения (дисконтирования), позволяющая найти ее минимум (обозначения приведены в п. 12.3):

$$\bar{C}_f = \sum_{i=1}^{\tau} \left[\alpha_t \left(\sum_{i=1}^n \bar{Z}_i - \sum_{i=1}^k R_i + \sum_{i=1}^m \lambda_i Y_i \right) + \sum_{i=1}^l S_i \right] \rightarrow \min. \quad (12.27)$$

В целевой функции используются некоторые составляющие, отличные от (12.9):

$-\sum_{i=1}^k R_i$ – сумма прибылей от использования водных ресурсов водопользователями, руб.:

$$\sum_{i=1}^k R_i = R_{op} + R_{вс} + R_{вп} + R_{рыб} + R_{рек}, \quad (12.28)$$

где R_{op} – прибыль от орошения, руб.;

$R_{вс}$ – прибыль от водоснабжения населения и сельхозпредприятий, руб.;

$R_{вп}$ – прибыль от водопоя скота, руб.;

$R_{рыб}$ – прибыль от рыбозаведения, руб.;

$R_{рек}$ – прибыль от рекреации, руб.;

$-\sum_{i=1}^l S_i$ – сумма компенсаций потребителям при опорожнении пруда (водохранилища) при ликвидации бесхозяйных ГТС, руб.:

$$\sum_{i=1}^l S_i = S_{op} + S_{вп} + S_{вс} + S_{рыб} + S_{рек}, \quad (12.29)$$

где $S_{op}, S_{вп}, S_{вс}, S_{рыб}, S_{рек}$ – компенсационные выплаты водопользователям вследствие прекращения хозяйственной деятельности, руб..

Для реализации экономико-математической задачи выбора оптимального варианта используются ограничения, представленные в таблице 12.4.

Таблица 12.4 – Принятые ограничения при выборе оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйного ГТС

Наименование	Предел ограничения
1	2
Затраты на ремонт и эксплуатацию плотин и водосброса	$0 \leq C_{экс_i} \leq 0,02C_{бал}$ – эксплуатационные затраты на ГТС
	$0,02C_{бал.пл} \leq C_{пл_i} \leq 0,20C_{бал.пл}$ – текущий ремонт
	$0,20C_{бал.пл} \leq K_{пл_i} \leq 0,50C_{бал.пл}$ – капитальный ремонт
	$0,50C_{бал.пл} \leq K_{рпл_i} \leq C_{бал.пл}$ – реконструкция
Затраты на ликвидацию ГТС	$0,20C_{бал.пл} \leq K_{ликв} \leq C_{бал}$
Компенсационные выплаты всем водопользователям при ликвидации ГТС	$0 \leq S_i \leq 0,30C_{бал}$

Продолжение таблицы 12.4

1	2
Прибыли от использования водных ресурсов водохранилища	$0 \leq R \leq 0,50C_{бал}$
Риски разрушения грунтовой плотины и водосброса	$5 \cdot 10^{-3} \leq \lambda_i \leq 0,1$
Ущерб, вызванный аварией ГТС (для чрезвычайной ситуации муниципального характера)	$0 \leq Y_i \leq 5 \text{ млн руб.}$

Реализация разработанной модели водохранилища как объекта проведения оценки целесообразности использования или ликвидации водохранилища путем выбора оптимального варианта наиболее эффективна при расчете большого количества вариантов, отвечающих определенным условиям и ограничениям.

Для апробации методики в п. 12.5 рассмотрим условный пример расчета для пяти основных вариантов и более 100 подвариантов с фиксированными значениями задаваемых величин. Согласно структуре вероятностно-экономического анализа (рисунок 12.1), алгоритм компьютерного моделирования включает ввод исходных данных с параметрами водохранилища, плотины, водосброса, данные о водопользователях и экономические показатели объекта: балансовая стоимость всего сооружения, плотины и водосброса.

Для каждого из подвариантов в компьютерной модели определяются составляющие целевой функции. Окончательный выбор оптимального варианта производится на основе минимизации целевой функции C_f .

12.5 Апробация методики оценки целесообразности дальнейшего использования или ликвидации бесхозных гидротехнических сооружений

Расчет проводится по пяти основным вариантам: современный уровень эксплуатации без собственника и без ремонта, проведение ремонта (текущего, капитального) и реконструкции ГТС с доведением риска аварии грунтовой плотины до нормативного уровня, а также ликвидация ГТС.

В пределах каждого из пяти основных вариантов рассматривается от 7 до 36 подвариантов с различным уровнем надежности ГТС, различными величинами затрат на текущий и капитальный ремонт, затрат на реконструкцию и ликвидацию сооружения. Принятое значительное количество расчетных подвариантов в общей модели (более 100 подвариантов) обусловлено необходимостью более детального разбиения для определения оптимального варианта при отработке модели.

Для каждого из подвариантов в компьютерной модели определяются составляющие целевой функции: приведенные затраты $\bar{Z}_i$, прибыли от использования воды для всех водопользователей R_i , вероятные риска разрушений плотины λ_1 , λ_2 и λ_3 , ущербы от затопления Y_i и компенсационные выплаты водопользователям S_i . Окончательный выбор оптимального варианта производится на основе минимизации целевой функции $\bar{C}_f$.

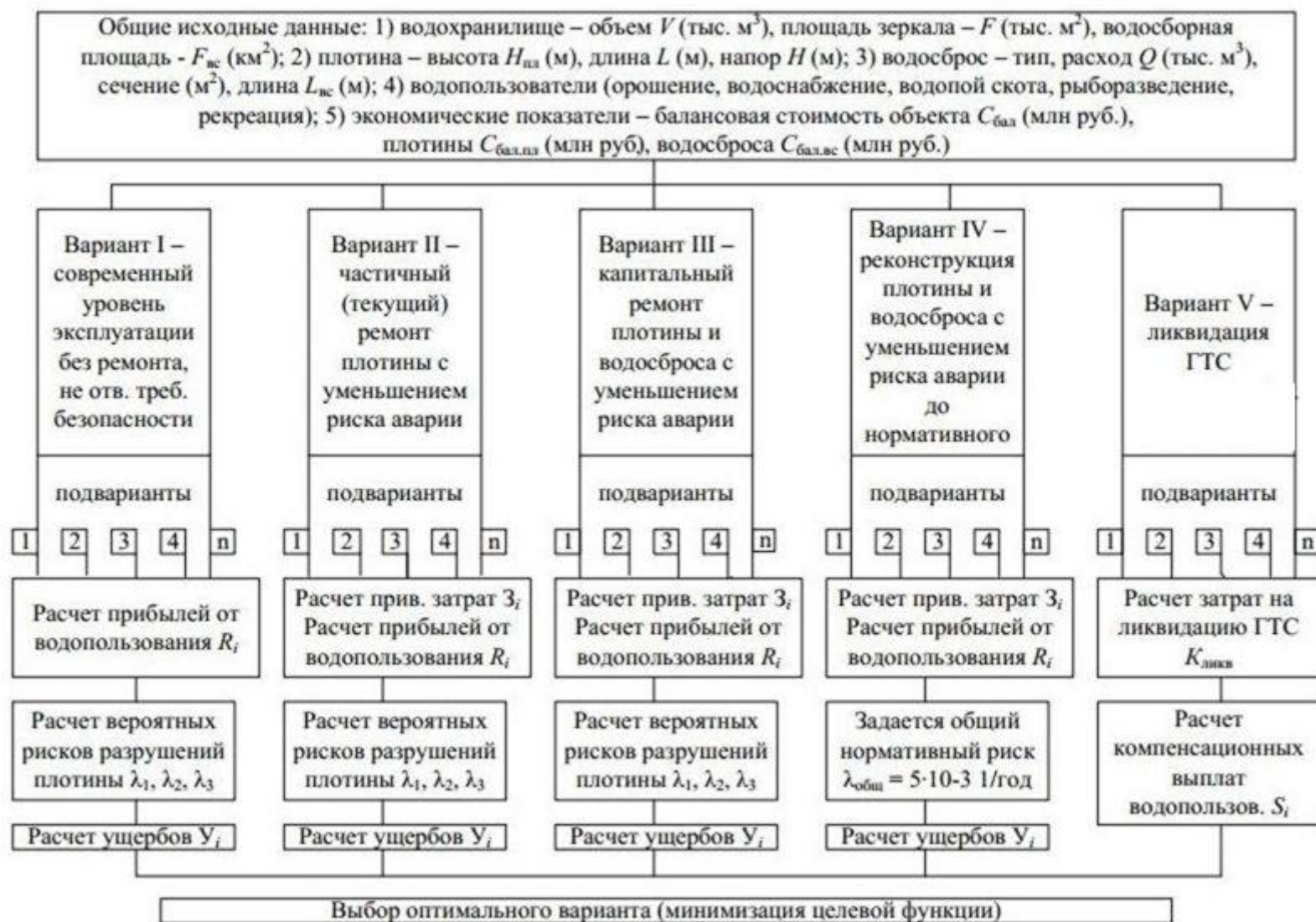


Рисунок 12.1 – Структурная схема вероятностно-экономического анализа выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйного гидротехнических сооружений

Расчет рисков разрушений грунтовой плотины по трем основным вероятным сценариям аварийных ситуаций: перелив через гребень от волновых и нагонных явлений; перелив через гребень от паводка, превышающего расчетный, и разрушение плотины от фильтрационных процессов проводится в составе общей программы по трем отдельным подпрограммам.

В соответствии с общей структурной схемой вероятностно-экономического анализа выбора оптимального варианта дальнейшего использования ГТС была составлена компьютерная программа в системе вычислений Mathcad, где все затраты, прибыли и ущербы рассчитывались за весь жизненный цикл пруда (водохранилища) и приводились к одному расчетному году – настоящему момент эксплуатации ГТС.

Для отработки компьютерной программы были использованы следующие исходные данные для условного объекта – пруда (водохранилища), приведенные в таблице 12.5.

Таблица 12.5 – Исходные данные для расчета вариантов использования бесхозяйного гидротехнического сооружения

Наименование параметра	Обозначение, ед. изм.	Значение	Наименование параметра	Обозначение, ед. изм.	Значение
1	2	3	1	2	3
Объем воды в пруду (водохранилище)	V , тыс. м ³	150	Количество жителей, попадающих в зону затопления:		
Высота плотины	$H_{пл}$, м	10,0			
Длина плотины	$L_{пл}$, м	150	- для варианта 1 и 2	—	—
Глубина воды в верхнем бьефе	H_1 , м	7	- при риске аварии 1, 2	$N_{жит}$, чел.	100
Балансовая стоимость плотины	$C_{балл}$, млн руб.	50	- для варианта 3 и 4	—	—
Балансовая стоимость водосброса	$C_{балв}$, млн руб.	5	- при риске аварии для вариантов 1–3	$N_{жит}$, чел.	0
Площадь орошения	$F_{ор}$, га	10	Эксплуатационные затраты	$C_{экс}$	$0,01 C_{бал}$
Количество жителей	$N_{жит}$, шт.	1000	Затраты на текущий ремонт:		
Норма водоснабжения на 1 чел.	$Q_{вс}$, м ³ /сут	0,15	- плотины	$C_{пл}$	$0,01 C_{балл}$
Прибыль от орошения 1 га	$R_{ор1га}$, руб.	9672	- водосброса	C_v	$0,015 C_{балв}$
Прибыль от использования 1 м ³ воды	$R_{вод1м^3}$, руб.	22	Затраты на капитальный ремонт:		
Прибыль от рекреации на 1 чел.	$R_{рек1чел}$, руб.	1000	- плотины	$K_{пл}$	$0,2 C_{балл}$
			- водосброса	K_v	$0,4 C_{балв}$

Продолжение таблицы 12.5

1	2	3	1	2	3
Дополнительная прибыль после реконструкции	R _{доп} , млн руб.	1,6	Затраты на реконструкцию		
			- плотины	$K_{пл}$	$0,5C_{балл}$
Ущерб от затопления 1 га с.-х. угодий	У _{с.-х.1га} , тыс. руб.	52,0	- водосброса	$K_в$	$0,5C_{балв}$
Ущерб от затопления домовладения на 1 чел.	С _{жил1чел} , тыс. руб.	46,7	Затраты на ликвидацию	$K_{ликв}$	$0,4C_{бал}$
Превышения гребня плотины над уровнем воды в верхнем бьефе:			Дополнительные данные для расчета риска аварии:		
			- средняя глубина воды в водоеме	H _{ср} , м	2
- для варианта 1	d ₁	0,2	- длина разгона волны	L, м	500
- для варианта 2	d ₂	0,4			
- для варианта 3	d ₃	1,0	- максимальная скорость ветра	V _{max} , м/с	18
- для варианта 4	d ₄	2,0			
Площадь затопления при аварии плотины:			- максимальный среднегогодежный расход паводка	Q _{maxca} , м ³ /с	6
- для варианта 1 и 2:					
1) при риске затопления 1	F _{зат} , га	2000	- ширина плотины по гребню	b _{гр} , м	6
2) при риске затопления 2	F _{зат} , га	100			
3) при риске затопления 3	F _{зат} , га	100	- коэффициент заложения откосов:	—	—
- для варианта 3:			1) верхового	m ₁	3,0
1) при риске затопления 1	F _{зат} , га	100	2) низового	m ₂	2,0
2) при риске затопления 2	F _{зат} , га	100	Критические градиенты напора:		
3) при риске затопления 3	F _{зат} , га	100	- в теле плотины	I _{кр.т}	1,0
- для варианта 4:			- в основании плотины	I _{кр.о}	0,8
1) при риске затопления 1	F _{зат} , га	10			
2) при риске затопления 2	F _{зат} , га	10	Мощность водопроницаемого основания	T, м	15

Сводные результаты расчетов приведены в таблице 12.6.

Таблица 12.6 – Сводные результаты при вероятностно-экономическом анализе вариантов дальнейшего использования бесхозного гидротехнического сооружения

Вариант ГТС	Содержание варианта	Суммарные приведенные затраты $\sum \bar{z}_i$, млн руб.	Суммарные прибыли или компенсации $\sum R_i (\sum S_i)$, млн руб.	Суммарный ущерб от затопления $\sum \lambda_i V_i$, млн руб.	Целевая функция $\bar{C}_f$, млн руб.	Место варианта по минимуму целевой функции
Вариант I	Современный уровень эксплуатации без ремонта	0,000	1,401	51,97	2811,0	5
Вариант II	Частичный (текущий) ремонт плотины и водосброса	1,125	1,401	5,81	307,6	4
Вариант III	Капитальный ремонт плотины и водосброса	1,750	1,401	0,097	24,8	2
Вариант IV	Реконструкция плотины и водосброса	3,300	3,001	0,0026	16,7	1
Вариант V	Ликвидация ГТС	2,200	0,262*	0,0	132,8	3
* Компенсации водопользователям.						

Анализ сводных результатов расчета показывает, что несмотря на наиболее высокие приведенные затраты по варианту IV (реконструкция плотины и водосброса), данный вариант характеризуется минимумом целевой функции, которая составила 16,7 млн руб., а следовательно, является оптимальным. Вторым по оптимальности является вариант III (капитальный ремонт плотины и водосброса), где целевая функция составила 24,8 млн руб.

Все остальные варианты значительно уступают оптимальному и соответственно могут считаться заведомо невыгодными.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно сделать вывод об отработке методики сравнительного анализа вариантов и о получении приемлемых результатов по выбору оптимального варианта дальнейшего использования пруда (водохранилища).

Однако при уточнении численных значений приведенных затрат, прибылей, убытков и компенсаций, и особенно для реальных объектов, возможен выбор в качестве оптимального – любого варианта ГТС, в том числе варианта ликвидации или варианта эксплуатации ГТС без ремонта.

В конечном итоге, определение оптимального варианта зависит от соотношения затрат, прибылей и ущербов.

Для дальнейшей апробации разработанной методики сравнительного анализа вариантов и выбора оптимального из них были проведены расчеты 124 подвариантов при следующих данных:

- для варианта 1: $d = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ м;
- для варианта 2: $C_{пл} = 0,01; 0,02; 0,05; 0,10; 0,15$ Сбал_{пл},

- где $C_{бал_{пл}} = 50$ млн руб.;
- $d = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ м;
- для варианта 3: $K_{пл} = 0,2; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5 C_{бал_{пл}}$,
где $C_{бал_{пл}} = 50$ млн руб.;
- $d = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$ м;
- для варианта 4: $K_{пл} = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 C_{бал_{пл}}$,
где $C_{бал_{пл}} = 50$ млн руб.;
- $K_{вс} = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 C_{бал_{вс}}$,
где $C_{бал_{вс}} = 5$ млн руб.;
- $d = 2,0$ м;
- для варианта 5: $K_{ликв} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7$.

В результате проведенных расчетов целевой функции из 124 подвариантов был выбран в качестве оптимального 73-й вариант с минимальным значением целевой функции $\bar{C}_f = 16,75$ млн руб.

Исходя из вышеизложенного, методика сравнительного анализа различных вариантов дальнейшего использования пруда (водохранилища) может также использоваться практически при любом большом количестве рассматриваемых подвариантов – до 100 и более.

12.6 Алгоритмы расчета выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации низконапорного гидротехнического сооружения

Для выбора оптимального варианта использования или ликвидации низконапорного ГТС разработан обобщенный алгоритм расчета, представленный на рисунке 12.2.

Этот алгоритм включает несколько этапов:

- 1 Ввод исходных данных.
- 2 Расчет 1-го риска аварий на ГТС вследствие волновых и нагонных явлений.
- 3 Расчет 2-го риска аварий на ГТС вследствие паводка с большим расходом.
- 4 Расчет 3-го риска аварий на ГТС вследствие фильтрационных процессов.
- 5 Расчет затрат на ГТС.
- 6 Расчет прибыли от ГТС.
- 7 Расчет компенсации за ГТС.
- 8 Расчет ущерба от ГТС.
- 9 Оценка выполнения функции ГТС. Оценивается выполнение трех прямых:
 - орошение;
 - рыбоводство;
 - рекреация.

Также оценивается выполнение двух косвенных функций ГТС:

- водопой скота;
- транспортное сообщение.

10 Оценка востребованности функций ГТС. Оценивается востребованность трех прямых функций:

- орошение;
- сельхозводоснабжение;
- пожаротушение.

Также оценивается востребованность одной косвенной функции – полив огородов и приусадебных участков.

11 Оценка ранжирования функций ГТС.

12 Оценка социальной значимости ГТС.

13 Оптимизация модели ГТС, сначала вычисляется целевая функция модели

ГТС для пяти вариантов:

- эксплуатация;
- текущий ремонт;
- капитальный ремонт;
- реконструкция;
- ликвидация.

Далее производится поиск минимального значения целевой функции среди этих пяти вариантов, после чего делается вывод о наиболее оптимальном варианте, приводящем целевую функцию к наименьшему значению.

14 Вывод результатов.

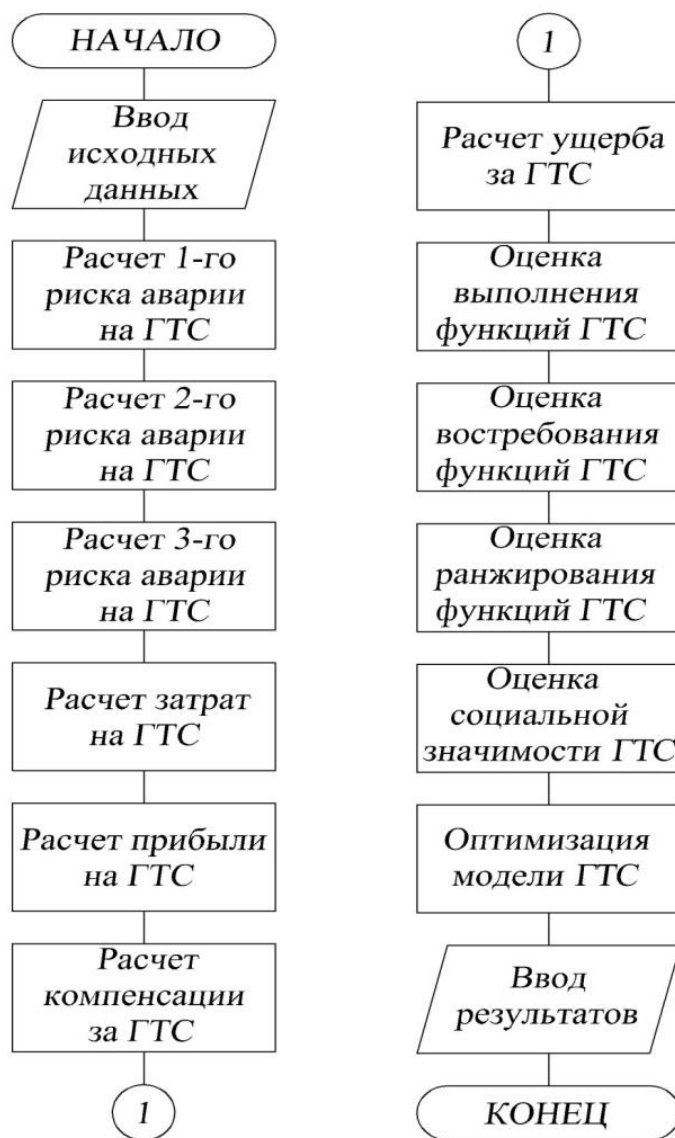


Рисунок 12.2 – Обобщенный алгоритм выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации низконапорного гидротехнического сооружения

12.7 Тестовые расчеты оптимальных вариантов дальнейшего использования или ликвидации безхозных гидротехнических сооружений на примере существующих сооружений

12.7.1 Пруд на балке Волчье Логово в селе Султан-Салы Ростовской области

Описание объекта: пруд на балке Волчье Логово в селе Султан-Салы, притоке балки Хавалы, реки Мокрый Чалтырь, расположен на территории Мясниковского района Ростовской области. Технические параметры пруда представлены в таблице 12.7.

Таблица 12.7 – Технические параметры пруда на балке Волчье Логово

Наименование параметра	Значение
Водосборная площадь, км ²	9,5
Площадь пруда при нормальном подпорном уровне (НПУ), га	18,8
Средняя глубина при НПУ, м	2,9
Площадь пруда при ФПУ, га	–
Площадь пруда при УМО, га	14,3
Объем форсировки, 10 ⁶ м ³	–
Полный объем пруда при НПУ, 10 ⁶ м ³	0,552
Полезный объем пруда, 10 ⁶ м ³	0,302
Мертвый объем пруда, 10 ⁶ м ³	0,25
Площадь пруда на момент обследования, га	18,8
Объем пруда на момент обследования, 10 ⁶ м ³	0,552
Превышение гребня плотины над НПУ, м	1,5
Наибольшая глубина в водоеме при НПУ, м	6

Гидроузел пруда состоит из грунтовой плотины, чаши пруда и водосброса-водоспуска.

Грунтовая плотина: материал плотины – суглинок. Технические характеристики: сечение – трапецеидальное; максимальная высота – 7,5 м; ширина по гребню переменная – 3,5–9,5 м; заложение откосов: мокрого-переменное $m_{12} = 8$, $m_1^2 = 0,5$ –2, $m_1^3 = 5$, сухого $m_2 = 1,5$; откосы не закреплены; длина плотины – 240 м; гидравлический напор – 6 м; превышение гребня над уровнем воды – 1,5 м; техническое состояние плотины неудовлетворительное.

Водосбросное сооружение: водосброс-водоспуск расположен на мокром откосе правого крыла плотины. Водосбросное сооружение в виде шахтного водосброса диаметром 4500 мм совмещенное с водоспуском. В теле плотины уложены две нитки железобетонных труб диаметром 1500 мм. Выход устроен в виде прямоугольного железобетонного лотка с шашечным гасителем, заканчивающийся обратной стенкой. Далее поток идет по отводному каналу в земляном русле. Канал трапецеидального сечения с заложением откосов $m = 1,5$, шириной по дну $b = 2$ м. Откосы отводящего канала не закреплены. Отводящий канал зарос высшей водной растительностью (тростник, рогоз). Служебный мост частично разрушен. Сороудерживающая решетка местами отсутствует. Нет механизма для подъема затвора на водоспуске. Наблюдается контактная фильтрация в виде слабых струй (протечки) вдоль сооружения в нижнем бьефе. Техническое состояние водосброса-водоспуска аварийное. Ситуационный план пруда показан на рисунке 12.3.

Схемы пруда, гидроузла, поперечного и продольного разрезов приведены на рисунках 12.4–12.7, а на рисунках 12.8–12.10 – фотоиллюстрации плотины, зеркала пруда и водосброса. На рисунках 12.11, 12.12 – батиграфические кривые объема и площади зеркала пруда.

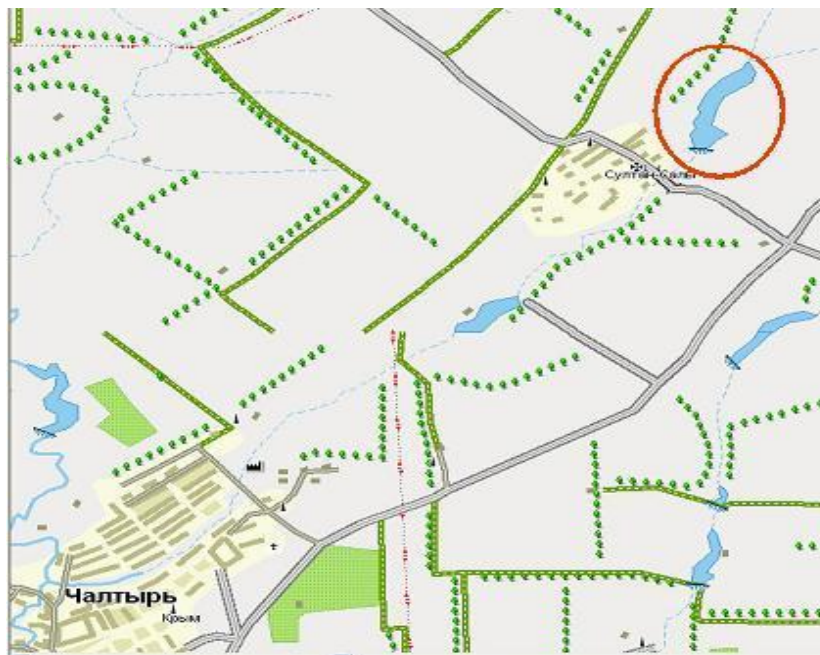


Рисунок 12.3 – Ситуационный план расположения пруда на балке Волчье Логово в селе Султан-Салы

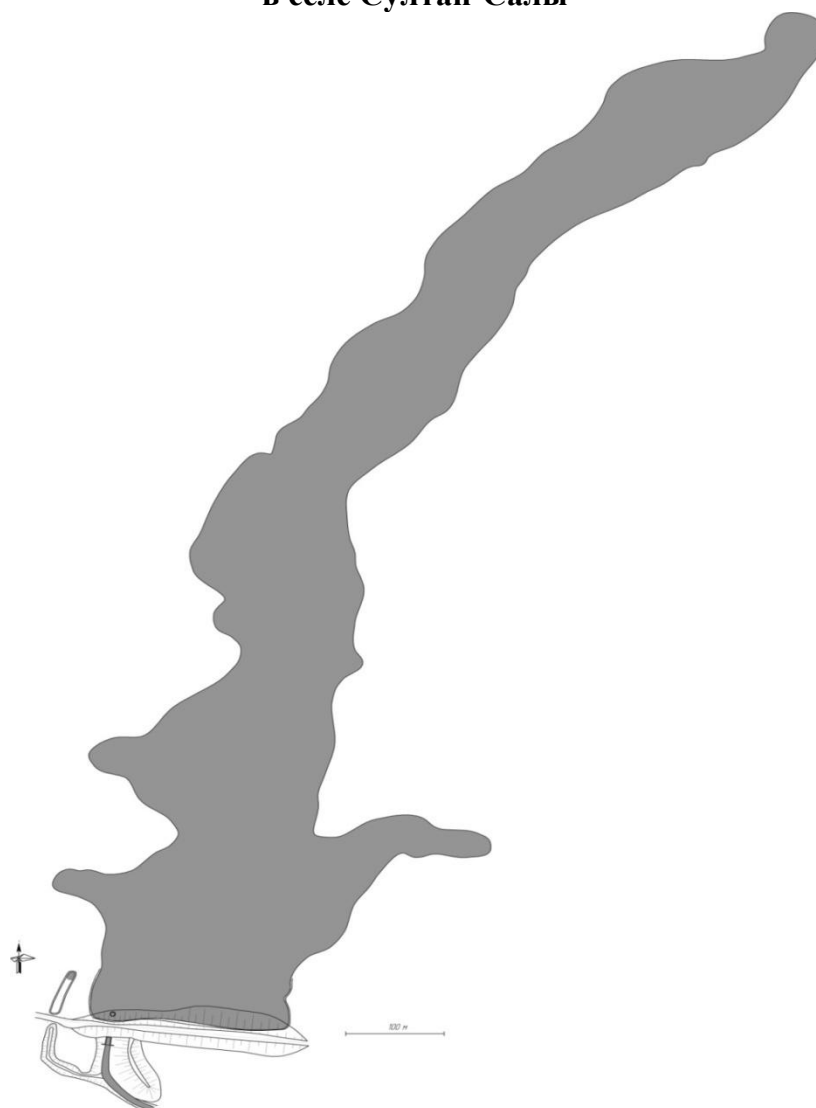


Рисунок 12.4 – Схема пруда на балке Волчье Логово (по данным съемки GPS навигатором и тахеометром)

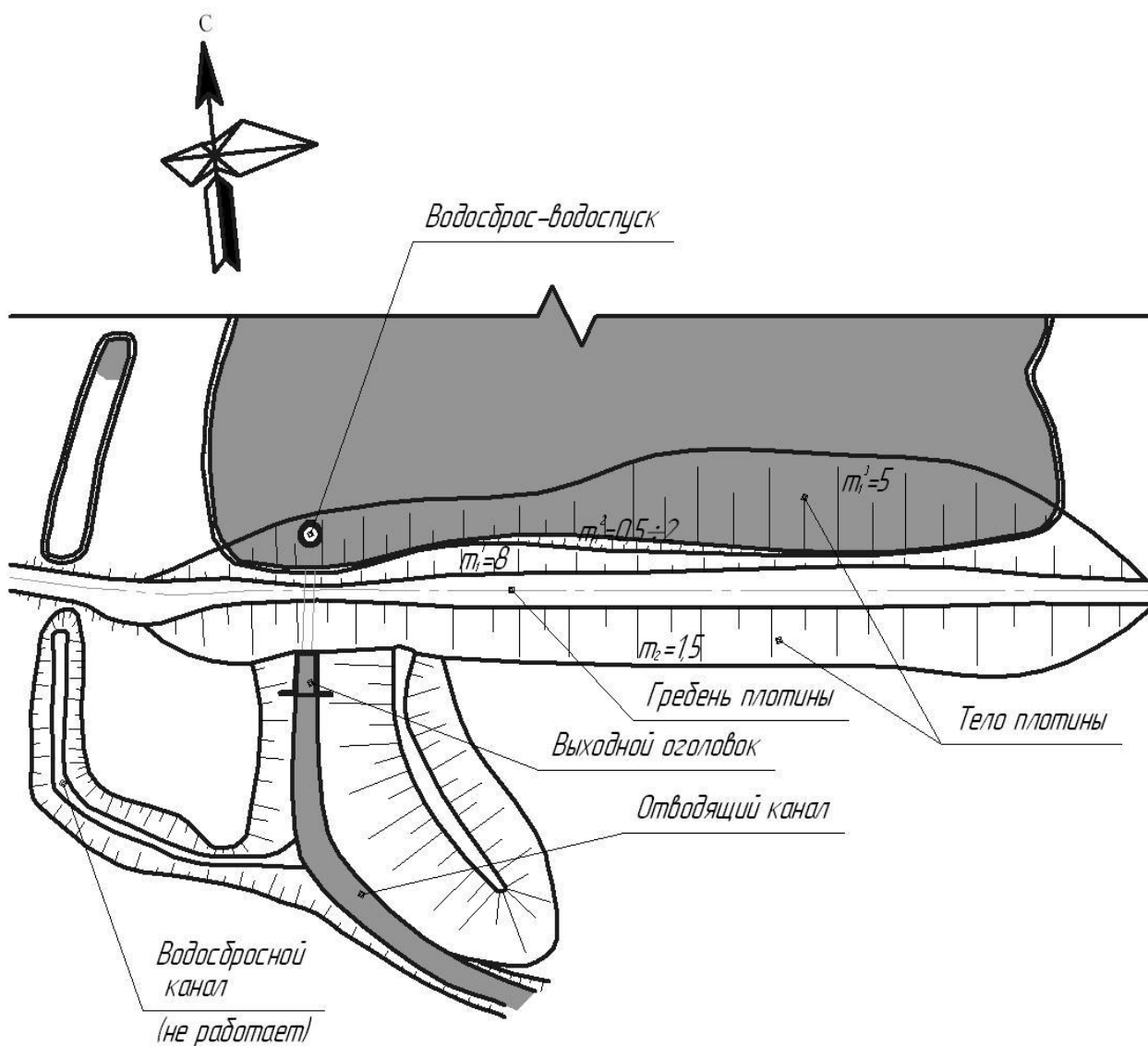


Рисунок 12.5 – Схема гидроузла на балке Волчье Логово

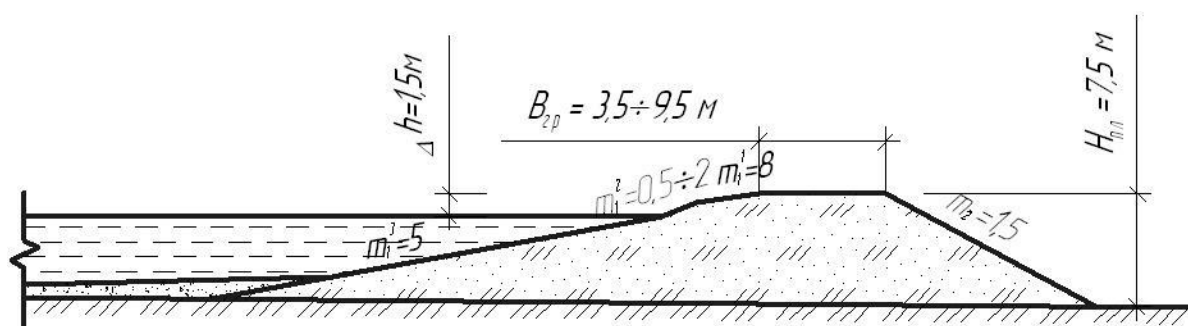


Рисунок 12.6 – Схема поперечного профиля плотины

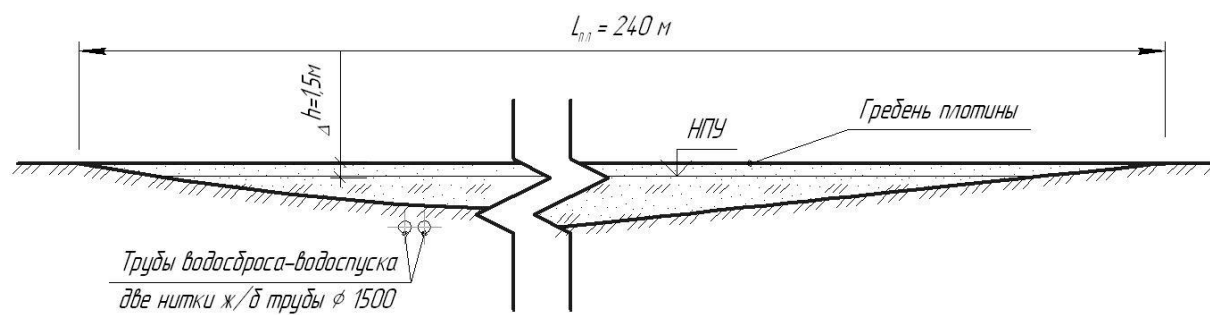


Рисунок 12.7 – Схема продольного профиля плотины



Рисунок 12.8 – Фрагмент гребня плотины (проезжая часть)



Рисунок 12.9 – Зеркало пруда



Рисунок 12.10 – Входная часть шахтного водосброса

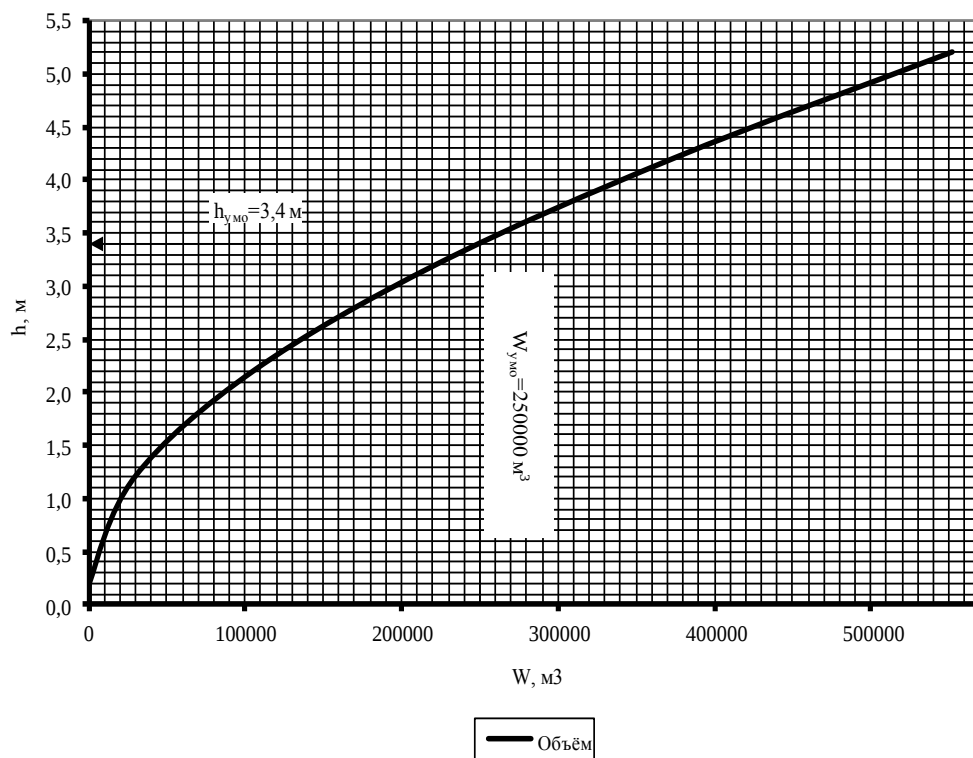


Рисунок 12.11 – График зависимости объема от глубины

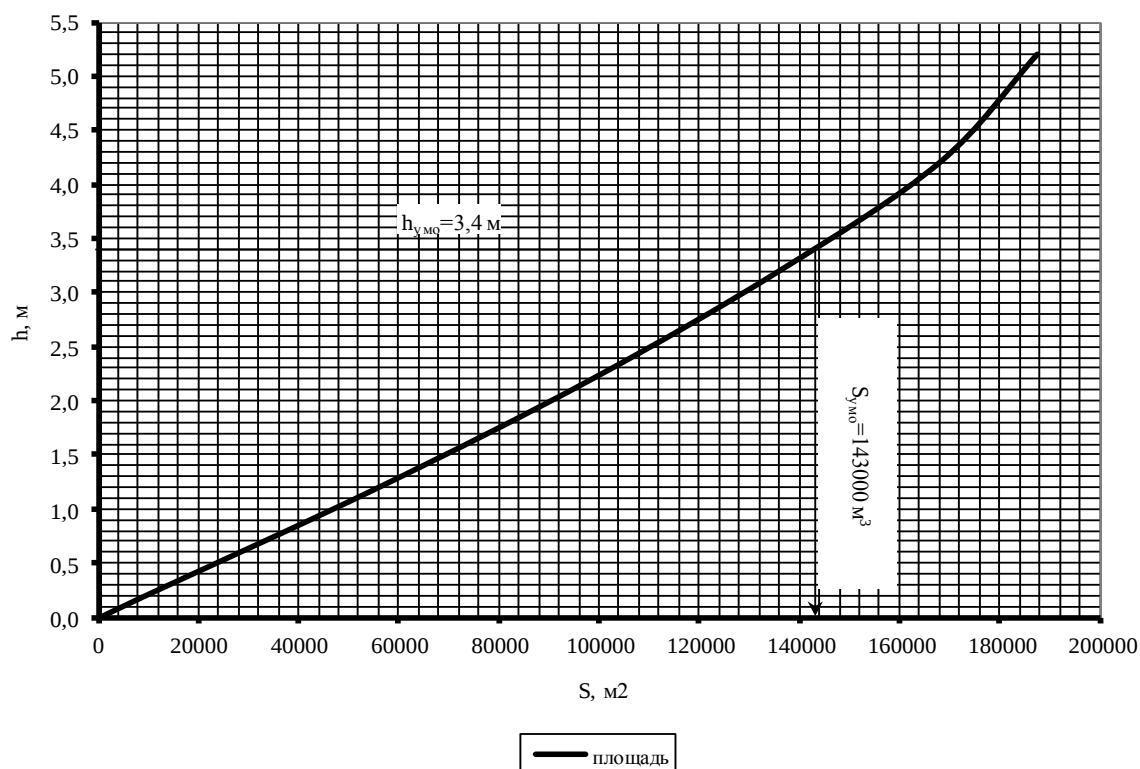


Рисунок 12.12 – График зависимости площади от глубины

12.7.2 Пруд на балке Калмыцкая в селе Крым Ростовской области

Описание объекта проведения оценки: пруд на балке Калмыцкая, в с. Крым, притоке реки Чалтырь, расположен на территории Мясниковского района Ростовской области. Технические характеристики пруда представлены в таблице 12.8.

Таблица 12.8 – Технические параметры гидротехнического сооружения

Наименование параметра	Значение
Водосборная площадь, га	–
Площадь пруда при НПУ, га	19
Средняя глубина при НПУ, м	2,24
Площадь пруда при ФПУ, га	25
Площадь пруда при УМО, га	16
Объем форсировки, 10^6 м^3	0,225
Полный объем пруда при НПУ, 10^6 м^3	0,449
Полезный объем пруда, 10^6 м^3	0,177
Мертвый объем пруда, 10^6 м^3	0,272
Площадь пруда на момент обследования, га	16
Объем пруда на момент обследования, 10^6 м^3	0,272
Отметка нормального подпорного уровня (НПУ), м	31,50
Отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ), м	32,60
Отметка гребня плотины, м	34,00
Отметка УВВБ, м	30,5

Гидроузел пруда состоит из грунтовой плотины, чаши пруда, водосбросного сооружения сифонного типа. Водоспуск стальная труба диаметром 400 мм.

Грунтовая плотина: материал плотины – суглинок. Технические характеристики: сечение – трапецеидальное; максимальная высота – 8,0 м; ширина гребня – 6–7,5 м; заложение откосов переменное, мокрого откоса $m_1 = 2$, сухого $m_2 = 2,25$, откосы не закреплены; длина плотины – 210 м; гидравлический напор – 7,8 м; превышение гребня над уровнем воды на момент обследования – 3,5 м.

Крепление откоса в верхнем бьефе водосбросного сооружения частично разрушено. Низовой откос на участке центральной части плотины местами имеет промоины. Тело плотины деформировано в районе входного оголовка водосбросного сооружения. В целом техническое состояние плотины находится в удовлетворительном состоянии. Плотина проездная, состояние дороги, проходящей по гребню, удовлетворительное.

Водосбросное сооружение: водосбросное сооружение сифонного типа, автоматического действия. Состоит из шести ниток стальных труб диаметром 1200 мм. Железобетонное крепление откоса на входном оголовке (около трех ниток труб: четвертая, пятая, шестая) деформировано. Через сифонный водосброс по гидравлическим расчетам может проходить расход $Q = 56 \text{ м}^3/\text{с}$. Расчетный расход $Q_{\max P1\%} = 84 \text{ м}^3/\text{с}$. Пропускная способность водосбросных сооружений не обеспечивает пропуск форсированного расхода 1 % обеспеченности ($Q_{\max P1\%}$) для IV класса.

Водосбросные сооружения находятся в удовлетворительном состоянии.

Трубы уложены горизонтально в теле плотины, по которым осуществляется сброс воды в нижний бьеф (общий расход около $Q = 56 \text{ м}^3/\text{с}$).

Низ труб в верхнем бьефе уложен на нормальном подпорном уровне поверхности зеркала воды пруда. В нижнем бьефе при работе водосбросного сооружения образовалась яма размыва.

Ситуационный план пруда приведен на рисунке 12.13.



Рисунок 12.13 – Ситуационный план расположения пруда на балке Калмыцкая в селе Крым

По данным съемок с использованием GPS навигатора и тахеометра построена двумерная модель зеркала пруда (рисунок 12.14), а также схема гидроузла (рисунок 12.15) и схемы поперечного и продольного профиля плотины (рисунки 12.16, 12.17). Приведены фотоматериалы, иллюстрирующие описание гидроузла (рисунки 12.18–12.25).

По результатам инструментальных обследований получены данные, позволяющие построить зависимости объема, площади зеркала пруда от глубины (рисунки 12.26, 12.27).

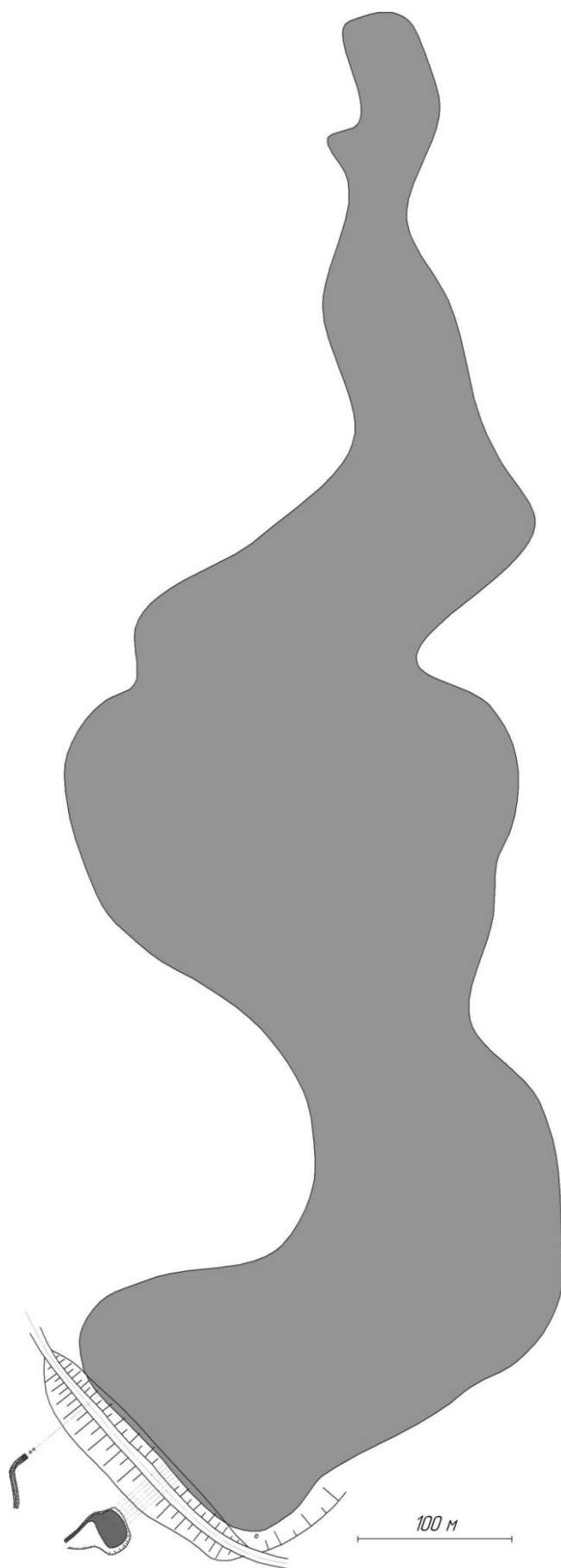


Рисунок 12.14 – Схема пруда на балке Калмыцкая

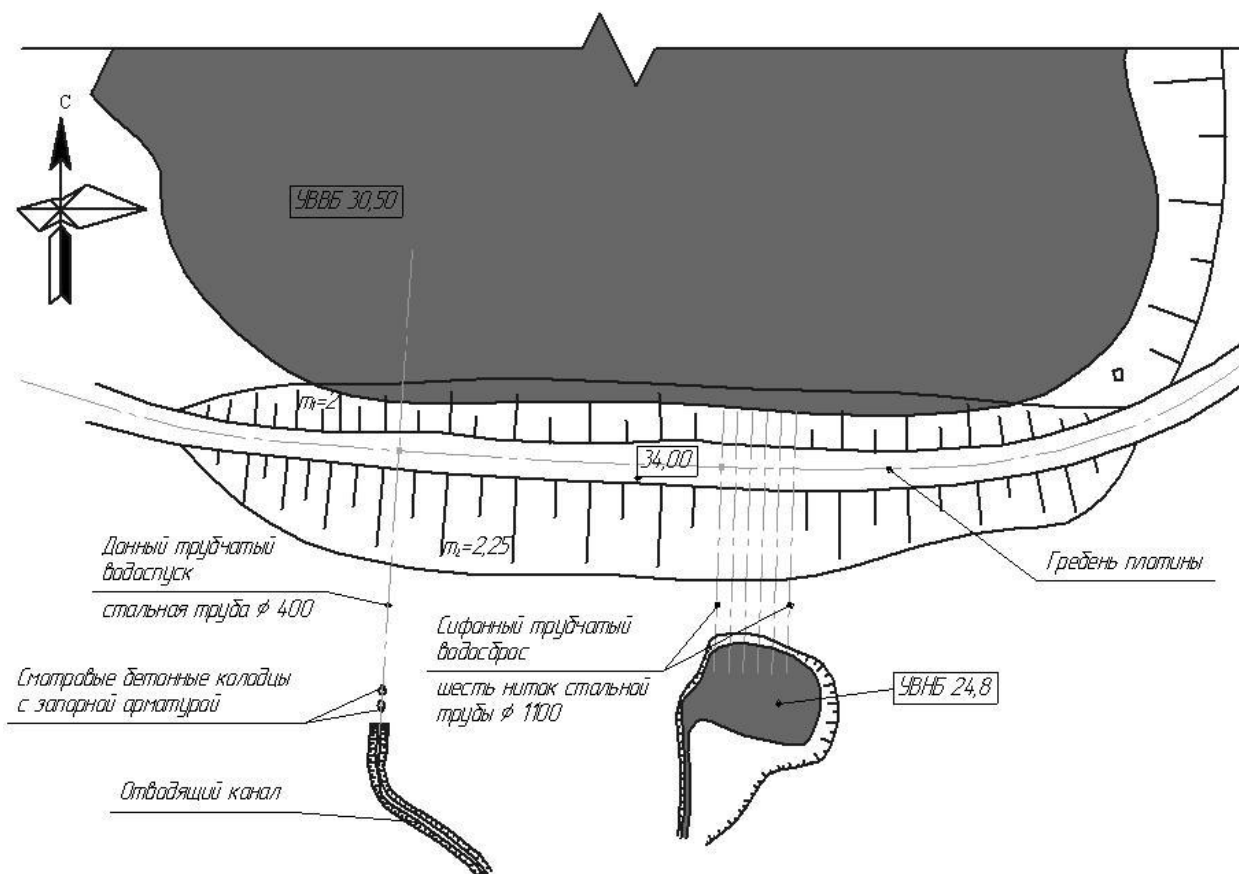


Рисунок 12.15 – Схема гидроузла на балке Калмыцкая

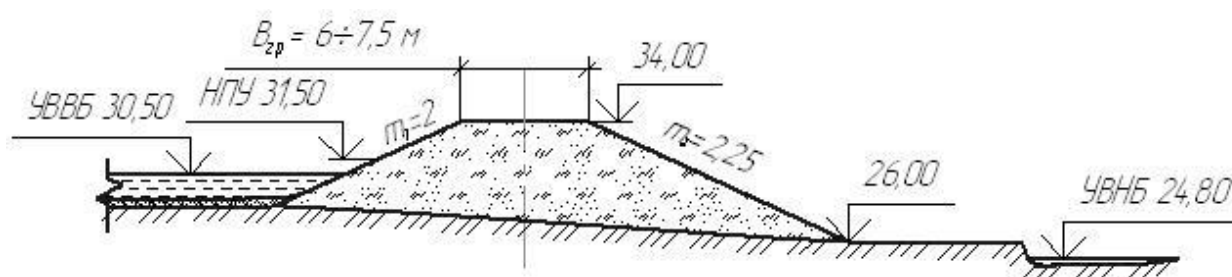


Рисунок 12.16 – Схема поперечного профиля плотины

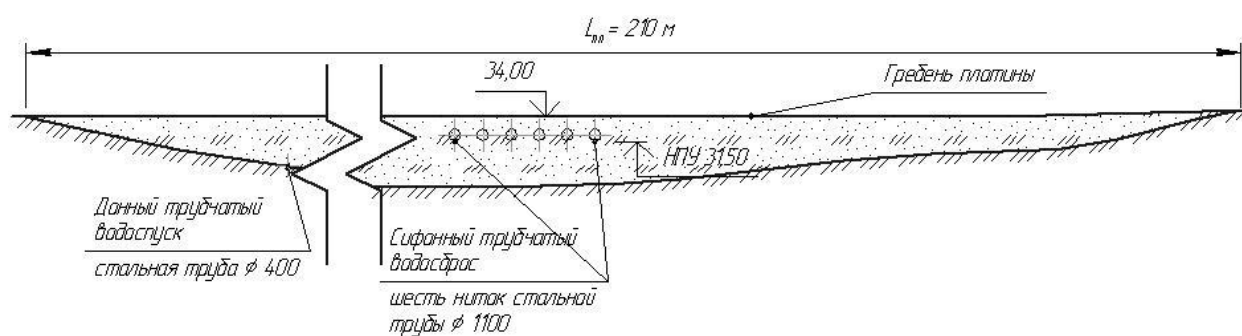


Рисунок 12.17 – Схема продольного профиля плотины



Рисунок 12.18 – Фрагмент гребня плотины (проезжая часть)



Рисунок 12.19 – Сухой откос плотины (вид с правого крыла плотины)



Рисунок 12.20 – Фрагмент гребня и мокрого откоса плотины



Рисунок 12.21 – Обрушение крепления верхнего откоса возле водосброса



Рисунок 12.22 – Входная часть сифонного водосброса



Рисунок 12.23 – Выходная часть сифонного водосброса и яма размыва



Рисунок 12.24 – Зеркало водохранилища



Рисунок 12.25 – Вид нижнего бьефа с гребня плотины

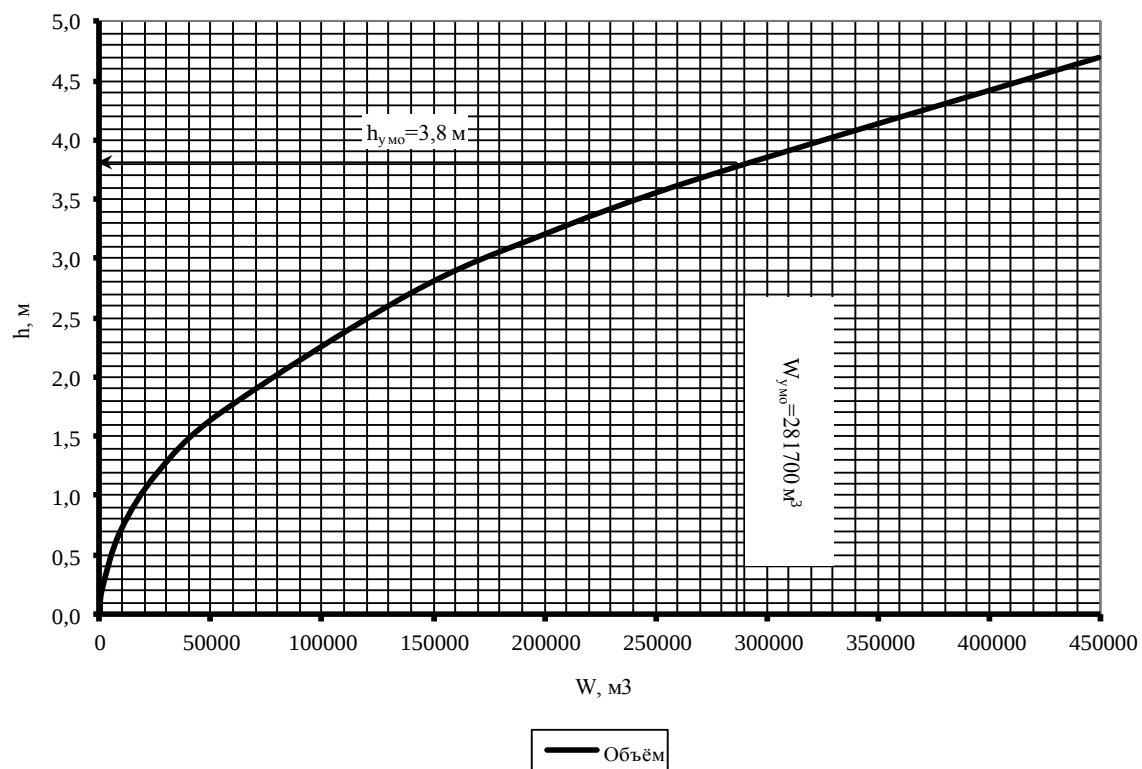


Рисунок 12.26 – График зависимости объема от глубины

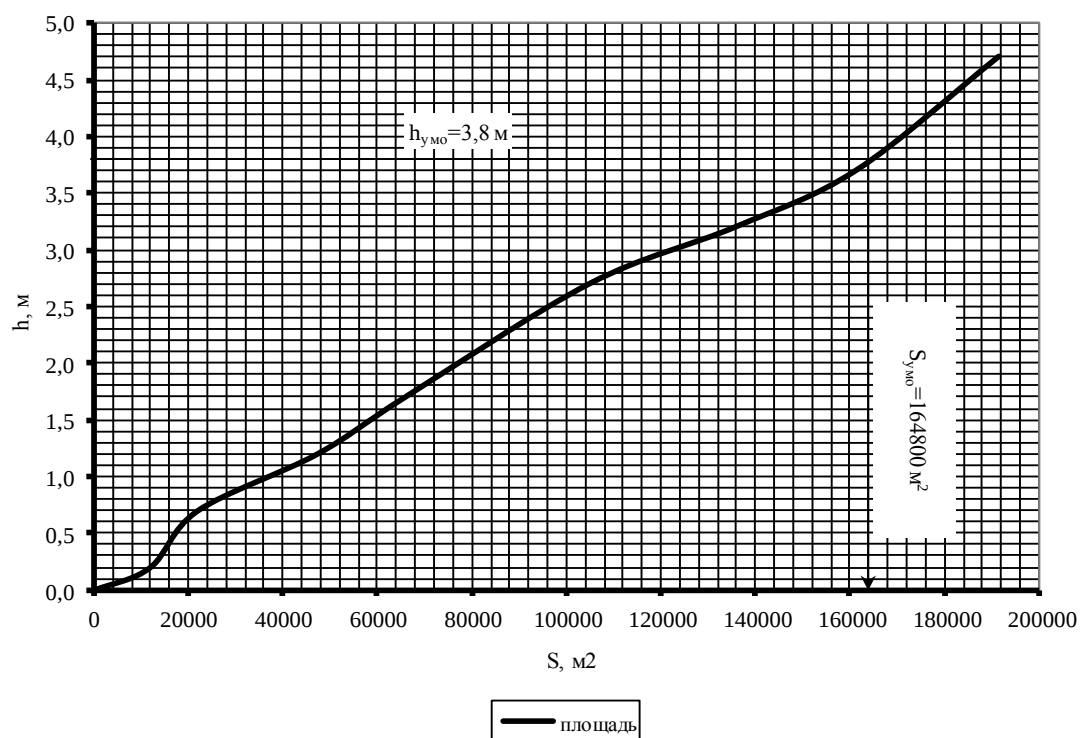


Рисунок 12.27 – График зависимости площади от глубины

12.7.3 Результаты тестовых расчетов оптимальных вариантов дальнейшего использования или ликвидации бесхозных гидротехнических сооружений

Используя вышеприведенную методику в п. 12.4, а также в качестве исходных данных параметры по тестовым объектам (пруд на б. Волчье Логово в с. Султан-Салы и пруд на б. Калмыцкая в с. Крым Ростовской области), описание и замеренные параметры которых даны в п. 12.7.1 и 12.7.2, были проведены тестовые расчеты.

В задачи тестовых расчетов входила проверка методики расчета оптимальных вариантов на основе реальных данных бесхозных ГТС.

Также как и в изложенной методике в п. 12.5, все расчеты проводились для пяти основных вариантов.

Сводные результаты расчетов выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации для двух тестовых объектов приведены в таблицах 12.9 и 12.10.

По результатам расчетов получено, что в качестве оптимального варианта для пруда на б. Волчье Логово в с. Султан-Салы является вариант реконструкции плотины и водосброса, где целевая функция составила 64,3 млн руб. Для пруда на б. Калмыцкая в с. Крым оптимальным вариантом является вариант капитального ремонта плотины и водосброса при максимуме целевой функции, составляющей 202,0 млн руб.

Следует отметить, что оптимальным вариантом может получиться любой из рассмотренных пяти вариантов, в том числе вариант I при современном уровне эксплуатации или вариант II при ликвидации ГТС. Все зависит от основных составляющих целевой функции, а именно: от суммы приведенных затрат по каждому варианту, суммы прибылей (дохода) вероятных ущербов, компенсаций. При этом, для сравнимости вариантов учитывается коэффициент приведения (дисконтирования) [265, 266].

Поскольку полученные результаты расчета являются приближенными ввиду отсутствия некоторых данных по бесхозным ГТС, то они принимались по аналогии с другими объектами или задавались экспертно. Для получения более точных результатов необходимо проведение тщательных натурных обследований и замеров основных параметров бесхозных ГТС. При отсутствии данных о балансовой стоимости объекта, стоимости текущего и капитального ремонта, а также стоимости реконструкции или ликвидации бесхозного ГТС необходимо их уточнение по данным предпроектных проработок и оценок, в том числе на основе сметных расчетов.

Немаловажным вопросом в выборе оптимального варианта является учет востребованности объекта и социальной значимости, что учитывается в данной методике с помощью оценки востребованности функций бесхозного ГТС и его социальной значимости для населения и системного окружения.

В заключение отметим, что разработанная методика может быть использована для оценки вариантов низконапорных ГТС как имеющих собственников, так и для бесхозных ГТС IV класса. В этом случае в методике в качестве варианта вывода ГТС из эксплуатации будет рассматриваться консервация сооружения, а для бесхозного ГТС, не имеющего собственника, – консервация ГТС.

Таблица 12.9 – Сводные результаты расчета выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации бесхозного гидротехнического сооружения – пруд на балке Волчье Логово в селе Султан-Салы Ростовской области

[illegible]

Таблица 12.10 – Сводные результаты расчета выбора оптимального варианта дальнейшего использования или ликвидации бесхозяйного гидротехнического сооружения – пруд на балке Калмыцкая в селе Крым Ростовской области

Вариант ГТС	Содержание варианта	Суммарные приведенные затраты $\sum \bar{z}_i$, млн руб.	Суммарные прибыли или компенсации $\sum R_i (\sum S_i)$, млн руб.	Суммарный ущерб от затопления $\sum \lambda_i y_i$, млн руб.	Целевая функция $\bar{C}_f$, млн руб.	Место варианта по минимуму целевой функции
Вариант I	Современный уровень эксплуатации без ремонта	0,750	0,005	5,56	840,0	5
Вариант II	Частичный (текущий) ремонт плотины и водосброса	1,54	0,005	0,32	248,0	2
Вариант III	Капитальный ремонт плотины и водосброса	1,73	0,295	0,025	202,0	1
Вариант IV	Реконструкция плотины и водосброса	4,50	1,970	0,0	297,3	3
Вариант V	Ликвидация ГТС	1,50	0,616*	0,0	358,0	4

* Компенсация водопользователям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К низконапорным ГТС относятся грунтовые плотины IV класса высотой до 15 м, а также бетонные и железобетонные плотины высотой до 10 м. Кроме того, к низконапорным ГТС, используемым в водохозяйственном комплексе, относятся подпорные ГТС мелиоративных гидроузлов IV класса с объемом водохранилищ до 50 млн м³, а также ГТС мелиоративных систем IV класса с площадью орошения и осушения до 50 тыс. га и каналы комплексного водохозяйственного назначения и сооружения на них IV класса при суммарном годовом объеме водоподачи до 20 млн м³.

Общее количество низконапорных ГТС IV класса, поднадзорных Ростехнадзору, в 2014 г. составило 28847 или более 96 % от всех ГТС. В водохозяйственном комплексе насчитывается 28552 ГТС, из них в ведении Минсельхоза России – 1481 ГТС, Росводресурсов – 884 ГТС, число бесхозных ГТС – 4477. Распределение ГТС в зависимости от уровня безопасности по данным Российского регистра гидротехнических сооружений составляет: с нормальным уровнем безопасности – 39,4 %, с пониженным – 43,4 %, с неудовлетворительным и опасным уровнем безопасности – 17,2 %. Наибольшее количество составляют водохранилища объемом до 5 млн м³ и более – 160 и пруды объемом до 1 млн м³ – 84. Только на юге России расположены 84 водохранилища, более 1490 регулирующих гидроузлов, крупные каналы протяженностью более 13000 км, дамбы протяженностью более 1250 км.

Анализ фактических данных КПД каналов свидетельствует о том, что он существенно ниже проектного: в земляном русле – на 3–9 %, в облицовке – на 7–10 %. В то же время, сравнение фактических КПД каналов с требованиями СНиП 2.06.03-85 показывает снижение значений КПД каналов в земляном русле по сравнению с нормативными требованиями до 16–19 %.

Для низконапорных ГТС целесообразно применение упрощенных экспертных методов оценки риска аварий, в частности метода ОАО «НИИ ВОДГЕО».

Анализ аварийных ситуаций на грунтовых плотинах прудов и малых водохранилищ позволяет принять следующие наиболее вероятные сценарии:

- перелив воды через гребень;
- сосредоточенная фильтрация через тело и основание грунтовой плотины вследствие фильтрационных деформаций (суффозий);
- недостаточная пропускная способность водосбросных сооружений по причине неудовлетворительного их технического состояния или заклинивания затворов;
- локальное разрушение участков грунтовой плотины при потере статической устойчивости откосов;
- контурная фильтрация вдоль трубы водосбросного сооружения.

Для оценки надежности низконапорных ГТС возможно применение метода Байеса, позволяющего по диагностическим показателям и возможным основным состояниям (диагнозам) ГТС, включающим наиболее вероятные отказы и нормальное (безопасное) состояние ГТС, получить достоверную оценку отказов и в конечном счете – риска аварии ГТС. С этой целью рассмотрены конкретные примеры оценки надежности грунтовой плотины малого водохранилища, резервного водосброса с размываемой вставкой, крупного канала и конструкции противофильтрационного экрана.

С целью повышения безопасности низконапорных грунтовых плотин водохранилищ рассмотрены конструкции резервных водосбросов в составе речных гидроузлов и опыт их применения для пропуска паводковых расходов. В ФГБНУ «РосНИИПМ» разработаны новые конструкции резервных водосбросов с размываемой вставкой и порогом с защитным покрытием из полимерной геомембраны, а также быстровозводимый водосброс с искусственным прораном и защитным его покрытием, которые за-

щищены патентами на изобретения. Приведены методы гидравлических расчетов и определения основных параметров новых конструкций резервных водосбросов, основанные на формуле расхода для водослива с широким порогом.

На основе опыта эксплуатации каналов России и зарубежья определены основные причины и факторы, влияющие на возникновение аварий и отказов. Составлена схема сценариев возможных аварийных ситуаций на магистральных каналах, возникающих вследствие гидравлических, фильтрационных и оползневых процессов.

Разработана методика оценки риска возникновения аварийной ситуации на наиболее опасных участках крупных каналов в насыпи и на косогоре вследствие перелива открытого потока через гребень дамбы канала с образованием прорана и фильтрационных деформаций, включающая определение удельных, действующих средних и выходных градиентов напоров, а также риска разрушения дамбы канала.

Получены зависимости для определения фильтрационных характеристик в дамбе канала и ее основания с учетом дополнительного фильтрационного сопротивления под дном канала для четырех расчетных случаев, а также зависимости для определения градиентов напора.

Выполнена оценка достоверности результатов по методике ФГБНУ «РосНИИПМ» в сравнении с методом эквивалентного профиля Е. А. Замарина и экспериментальным методом электро моделирования. При сопоставлении результатов по методике авторов и методу ЭГДА получены близкие результаты с расхождением в пределах 2,48–5,12 %, что свидетельствует о их достоверности и возможности применения предлагаемой методики на практике. На основании проведенных расчетов по различным методам авторы рекомендуют использовать для расчета дамб каналов в насыпи предложенную методику при высоте насыпи более 5 м, а при высоте насыпи до 5 м – известные методики расчета фильтрации для грунтовых плотин.

Выполненные расчеты риска аварий для участков в насыпи Донского и Пролетарского МК показали, что риск разрушения дамб каналов не превышает нормативного значения. Однако на некоторых участках возможны локальные разрушения грунта при выходе фильтрационного потока на низовой откос.

Для практического использования предложен комплекс мероприятий по предупреждению и устранению аварийных ситуаций на потенциально опасных участках в насыпи и на косогоре. Разработана противофильтрационная диафрагма для дамб каналов высотой до 10 м. Предлагаемое устройство позволит повысить эксплуатационную надежность дамб каналов при низкой строительной стоимости самой диафрагмы. Кроме того, предложен способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбах каналов, который повышает качество укладки, производительность и водонепроницаемость за счет использования габионно-геомембранной конструкции. На данные предложения получены патенты на изобретения.

Представлено обоснование разработанной методики оценки вариантов для принятия решения по дальнейшей эксплуатации, реконструкции или вывода из эксплуатации низконапорных ГТС IV класса, которая основана на вероятностно-экономическом анализе различных вариантов с учетом риска аварий. Применительно к установленным уровням безопасности в Российском Регистре гидротехнических сооружений – пониженному, неудовлетворительному и опасному, предложены диапазоны изменения риска аварий для ГТС IV класса, которые обоснованы опытом разработки деклараций безопасности и определения риска аварий в ФГБНУ «РосНИИПМ».

Разработана методика оценки целесообразности дальнейшего использования или ликвидации бесхозных ГТС, которая апробирована на соответствующем примере расчета. Проведены тестовые расчеты по предполагаемой методике для конкретных объектов низконапорных ГТС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ: по состоянию на 28 декабря 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

2 Гидротехнические сооружения. Основные положения: СП 58.13330.2012: утв. М-вом регионального развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М., 2012. – 38 с.

3 Щедрин, В. Н. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко // Гидротехническое строительство. – № 5. – 2011. – С. 33–38.

4 Брэдлоу, Д. Д. Нормативно-правовая база безопасности плотин. Сравнительный аналитический обзор: Всемирный банк / Д. Д. Брэдлоу, А. А. Пальмиери, М. А. Салман. – М.: Весь мир, 2003. – 196 с.

5 Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ: по состоянию на 02 июля 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

6 О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ: по состоянию на 21 июля 2014 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

7 Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте: Федеральный закон от 27 июля 2010 г. № 225-ФЗ: по состоянию на 28 декабря 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

8 О Федеральной целевой программе «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы»: постановление Правительства Российской Федерации от 12 декабря 2013 г. № 922: по состоянию на 12 октября 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

9 О режиме постоянного государственного надзора на опасных производственных объектах и гидротехнических сооружениях: постановление Правительства Российской Федерации от 05 мая 2012 г. № 455: по состоянию на 25 марта 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

10 О федеральном государственном надзоре в области безопасности гидротехнических сооружений: постановление Правительство Российской Федерации от 27 октября 2010 г. № 1108: по состоянию на 21 августа 2014 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

11 Об утверждении Положения об эксплуатации гидротехнического сооружения и обеспечения безопасности гидротехнического сооружения, разрешение на строительство и эксплуатацию которого аннулировано, а также гидротехнического сооружения, подлежащего консервации, ликвидации либо не имеющего собственника: постановление Правительства Российской Федерации от 27 февраля 1999 г. № 237: по состоянию на 6 октября 2011 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

12 О классификации гидротехнических сооружений: постановление Правительства Российской Федерации от 21 августа 2013 г. № 986: по состоянию на 17 декабря 1999 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

13 Об утверждении формы декларации безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных гидротехнических сооружений): приказ Ростехнадзора от 02 июля 2012 г. № 377: по состоянию на 23 июля 2012 г. // Гарант Эксперт

2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

14 Об усилении контроля за техническим состоянием гидротехнических сооружений поднадзорных Ростехнадзору: приказ Ростехнадзора от 21 марта 2006 г. № 226: по состоянию на 21 марта 2006 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

15 Об утверждении рекомендаций к содержанию правил эксплуатации гидротехнических сооружений (за исключением судоходных гидротехнических сооружений): приказ Ростехнадзора от 27 сентября 2012 г. № 546: по состоянию на 27 сентября 2012 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

16 Об утверждении положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений: постановление Правительства Российской Федерации от 06 ноября 1998 г. № 1303: по состоянию на 21 августа 2014 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

17 Об утверждении Административного регламента Министерства сельского хозяйства Российской Федерации по предоставлению государственной услуги по паспортизации государственных мелиоративных систем и отнесенных к государственной собственности отдельно расположенных гидротехнических сооружений: приказ Минсельхоза России от 22 октября 2012 г. № 559: по состоянию на 09 апреля 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

18 Об утверждении Инструкции о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений: приказ Минприроды России от 29 января 2013 г. № 34: по состоянию на 29 января 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

19 Об утверждении типовых правил использования водохранилищ: приказ Минприроды России от 24 августа 2010 г. № 330: по состоянию на 30 сентября 2010 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

20 Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта: приказ МЧС России от 04 ноября 2004 г. № 506 // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

21 Инструкция о порядке ведения мониторинга безопасности гидротехнических сооружений предприятий, организаций, подконтрольных Госгортехнадзору России (вместе с инструкцией РД 03-259-98): утв. Госгортехнадзором России 12.01.98 // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

22 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84: СП 39.13330.2012: утв. М-вом регионального развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М.: Минрегион России, 2012. – 85 с.

23 СТО 17230282.27.010.001-2007. Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния. – Введ. 2007-11-30. – М.: РАО «ЕЭС России», 2007. – 182 с.

24 Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений: утв. М-вом сельского хоз-ва и продовольствия Рос. Федерации 26.05.98: введ. в действие с 26.05.98. – М.: СНЦ «Госэкомелиовод», 1998. – 39 с.

25 Типовая инструкция по эксплуатации водохранилищ для нужд орошения емкостью до 10 млн м³: ВСН 33-3.02.01-84: утв. М-вом мелиорации и вод. хоз-ва СССР 16.04.84: введ. в действие с 01.07.84. – М., 1984. – 145 с.

26 Типовые правила эксплуатации водохранилищ емкостью 10 млн м³: РД 33-3.2.08-87: утв. М-вом мелиорации и вод. хоз-ва СССР 06.04.87: введ. в действие с 01.10.87. – М., 1987. – 141 с.

27 Типовая инструкция по технической эксплуатации речных плотинных водо-

заборов оросительных систем: ВСН 33-3.2.02-82: утв. М-вом мелиорации и вод. хоз-ва СССР 10.11.82 : введ. в действие с 01.05.83. – М., 1983. – 58 с.

28 Об утверждении Инструкции о порядке ведения мониторинга безопасности гидротехнических сооружений предприятий, организаций, подконтрольных Госгортехнадзору России: постановление Госгортехнадзора РФ от 12 января 1998 г. № 2: по состоянию на 4 февраля 1998 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

29 ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Введ. 2014-01-01. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 2014. – 89 с.

30 Инструкция о порядке определения критериев безопасности и оценки состояния гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и организациях: РД 03-443-2002: утв. постановлением Госгортехнадзора Рос. Федерации 4.02 02: введ. в действие с 10.06.02. – М., 2002. – 20 с.

31 Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений: РД 153-34.2-21.342-00: утв. РАО «ЕЭС России» 12.27.2000: введ. в действие с 01.01.01. – М.: Науч.-исслед. ин-т энергетических сооружений, 2001. – 24 с.

32 Современное состояние и пути повышения надежности и экологической безопасности эксплуатации мелиоративных систем: информац. сборник / ФГНУ ЦНТИ «Мелиоводинформ». – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2013. – 89 с.

33 Рекомендации по обследованию гидротехнических сооружений с целью оценки их безопасности / ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – М., 2001. – 35 с.

34 Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности. – 2-е издание. – М.: ДАР/ВОДГЕО, 2009. – 64 с.

35 Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений: стандарт предприятия. – М.: НИИЭС, 2004. – 12 с.

36 Соглашение между правительствами Российской Федерации и Республики Казахстан о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов от 27 августа 1992 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bestpravo.ru/rossijskoje/xi-praktika/f6n.htm>.

37 National Dam Safety Program Act (passed in 1972, revised in 1984, and incorporated as Section 215 of the Water Resources Development, Act of 1996, October 12 (NDSPA). – 1996. – P. 104–303.

38 The water sector in Germany // Methods and experience. – Berlin, 2001. – P. 151.

39 Опыт Германии по обеспечению безопасности плотин и других гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vnadzor.gov.uz>.

40 Безопасность гидротехнических сооружений в центральной Азии: проблемы и подходы к их решению. – Алматы, 2011. – 37 с.

41 Economic Commission for Europe. Water Series problems. Dam Safety in Central Asia: capacity building and regional cooperation. – New York and Geneva, 2007. – № 5. – 101 p.

42 Программа улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель в Кыргызской Республике на период 2008–2010 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agroprod.kg/modules.php?name=Pages&page=6>.

43 Information and Communication Technology Policy and Legal Issues for Central Asia / UNITED NATIONS. – New York and Geneva, 2007. – P. 67.

44 Water Pressures in Central Asia Crisis Group Europe and Central Asia Report № 233, 11 September 2014. – 35 p.

45 Соглашение между Республикой Казахстан, Кыргызской Республикой, Республикой Таджикистан и Республикой Узбекистан о сотрудничестве в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций от 17 июля 1998 года (в силе с 25 января 2000 года) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://online.zakon.kz/Document/?doc_id=1014313.

46 Михеев, П. А. Безопасность гидротехнических сооружений: курс лекций / П. А. Михеев. – М.: НГМА, 2008. – 106 с.

47 Беллендир, Е. Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2003. – Т. 1, 2. – 546, 524 с.

48 Fell, R. Essential component of Risk Assessment for Dams. Chapter 12. Risk-based Dam Safety Evaluations. Trondheim, 28–29 June 1997. – NNCOLD-CanCOLD-ICH. – 40 p.

49 Волосухин, В. А. О проблемных вопросах в области безопасности гидротехнических сооружений / В. А. Волосухин, Я. В. Волосухин // Мониторинг: Наука и безопасность. Специальный выпуск. – 2013. – С. 84–97.

50 Розанов, Н. С. Аварии и повреждения больших плотин / Н. С. Розанов, А. И. Царев, Л. П. Михайлов, И. Б. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.

51 Радченко, С. В. Причины повреждений и аварий грунтовых плотин (по данным СИГБ) / С. В. Радченко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Т. 258. – 2010. – С. 99–113.

52 Стефанишин, Д. В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Т. 251. – 2008. – С. 3–9.

53 Стефанишин, Д. В. Статистические оценки живучести плотин при авариях / Д. В. Стефанишин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. – № 10. – 9 с.

54 ICOLD. Dam failures-statistical analysis. – № 99. – Paris, 1995.

55 ICOLD. Rehabilitation of dams and appurtenant works-stat of the art and case histories. – Paris, 2001. – P. 119: Appendix 1. Classification of reported failures.

56 Брэдли, Д. Нормативно-правовая база безопасности плотин / Д. Брэдли, А. Пальмиери, М. А. Салман; пер. с англ.; ред. и предисл. проф. Л. А. Золотова. – М.: Изд-во «Весь Мир», 2008. – 196 с.

57 Щурский, О. М. Основные результаты и направления работы по осуществлению надзора за безопасной эксплуатацией гидротехнических сооружений / О. М. Щурский // Гидротехника. – 2014. – № 1 (34). – С. 8–11.

58 Щедрин, В. Н. Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов. – М.: Росинформагротех. – 2011. – 268 с.

59 Кремез, С. А. Опыт строительства и эксплуатации малых водохранилищ в ЦЧО / С. А. Кремез. – Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1965. – 138 с.

60 Черняев, А. М. Россия: речные бассейны / А. М. Черняева [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во «Аэрокосмоэкология». – 1992. – 520 с.

61 Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 3.07.03-85: СП 81.13330.2012: утв. М-вом регионального развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М., 2012. – 38 с.

62 Фролов, Д. И. Организация и проведение работ по выявлению и сокращению количества бесхозных гидротехнических сооружений и обеспечению их безопасности / Д. И. Фролов, О. М. Щурский, В. И. Пименов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 11. – С. 18–21.

63 Щурский, О. М. О работе с бесхозными гидротехническими сооружения-

ми / О. М. Щурский, В. И. Пименов, В. А. Волосухин // Гидротехника. – 2013. – № 1 (30). – С. 99–103.

64 Щурский, О. М. Проблемы безопасности бесхозяйных гидротехнических сооружений / О. М. Щурский, В. И. Пименов, В. А. Волосухин // Безопасность в техносфере. – 2013. – № 1. – С. 31–34.

65 Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

66 Стефанишин, Д. В. Обоснование мероприятий по повышению безопасности гидротехнических сооружений с учетом риска / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 3–9.

67 Иващенко, А. Г. Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований / А. Г. Иващенко, Д. Б. Радкевич, К. И. Иващенко // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 7. – С. 22–28.

68 Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности грунтовой плотины малого водохранилища с использованием диагностических показателей по данным наблюдений / Ю. М. Косиченко, Е. А. Савенкова // Природообустройство. – 2012. – № 5. – С. 41–45.

69 Савенкова, Е. А. Диагностика технического состояния прудов и малых водохранилищ и пути их эффективного использования / Е. А. Савенкова, Ю. М. Косиченко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2011. – № 1. – С. 43–45.

70 Каганов, Г. М. Техническое состояние гидротехнических сооружений мелиоративных гидроузлов Московской области / Г. М. Каганов, В. И. Волков // Мелиорация и водное хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 22–25.

71 Каганов, Г. М., Волков В. И., Секисова И. А. Анализ состояния низконапорных гидротехнических сооружений Российской Федерации на примере обследования гидроузлов Московской области / Г. М. Каганов, В. И. Волков, И. А. Секисова // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 8. – С. 26–32.

72 Вайнберг, А. Н. Оценка риска перелива воды через гребень плотины из грунтовых материалов методом статистических испытаний / А. Н. Вайнберг // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2007. – Т. 246. – С. 121–127.

73 Зотеев, В. Г. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема / В. Г. Зотеев, И. С. Шахов, М. Г. Морозов, М. А. Приходько // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 10. – С. 41–48.

74 Чугаев, Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергия, 1967. – 460 с.

75 Белов, В. А. Оценка уровня фильтрационной безопасности земляных плотин и эффективность инженерной защиты малых водохранилищ / В. А. Белов, Ю. М. Косиченко, М. Ю. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2001. – 58 с.

76 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшее образование, 2005. – 52 с.

77 Савенкова, Е. А. Результаты обследований гидроузлов малых водохранилищ Ростовской области [Электронный ресурс] / Е. А. Савенкова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2011. – № 2 (02). – 6 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/2011/06/17>.

78 Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 241 с.

79 Финагенов, О. М. Оценка эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений / О. М. Финагенов, С. Н. Белякова // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 9. – С. 24–27.

80 Стефанишин, Д. В. Оценка нормативной безопасности плотин по критериям риска / Д. В. Стефанишин // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 2. – С. 44–47.

81 Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2008. – 576 с.

82 Малаханов, В. В. Техническая диагностика грунтовых плотин / В. В. Малаханов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 121 с.

83 Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справ. пособие / А. Б. Векслер [и др.]; под ред. А. Б. Векслера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

84 Беляков, А. А. Влияние схемы пропуска паводковых расходов на экономичность гидроузлов с грунтовыми плотинами / А. А. Беляков, Ю. П. Правдивец // Энергетическое строительство. – 1978. – № 9. – С. 29–32.

85 Гордиенко, П. И. Пути удешевления паводковых водосбросов гидроузлов / П. И. Гордиенко // Гидротехническое строительство. – 1958. – № 8. – С. 36–44.

86 Правдивец, Ю. П. Опыт пропуска паводков через недостроенные плотины из местных материалов / Ю. П. Правдивец // Энергетическое строительство за рубежом. – 1977. – № 2. – С. 22–25.

87 Правдивец, Ю. П. Пропуск паводковых вод через недостроенные плотины из местных материалов / Ю. П. Правдивец // Энергетическое строительство. – 1977. – № 4. – С. 22–25.

88 Дерюгин, Г. К. Разрушение плотин в связи с пропуском сбросных расходов / Г. К. Дерюгин, О. С. Наумов // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 2. – С. 30–33.

89 Blind, H. The Safety of Dams / H. Blind // Int. Water Power and Dam Construction. – 1983. – ol. 35, No. 5. – P. 17–21.

90 Boccotti, P. Sulla probabilita di onde di altezza assegnata / P. Boccotti // Giornale Genio Civile. – 1983. – No. 4. – P. 165–174.

91 Boccotti, P. Risk analysis of spillway design floods / P. Boccotti, R. Rosso // Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams / Coimbra. – 1984. – P. 85–92.

92 Marinier, G. Safety of dams in operation / G. Marinier // Trans. of the 14-th Congress on Large Dams. / Rio de Janeiro. ol. 1. General Rept. – Q 52. – 1982. – P. 1471–1510.

93 Ribler, P. Zur Sicherheitsdiskussion uber Talsperrendamme / P. Ribler // Wasserwirtschaft. – 1981. – № 7/6. – P. 200–205.

94 Serafim, J. L. Statistics of dam failures: a preliminary report / J. L. Serafim, J. M. Coutinho-Rodrigues // Int. Water Power & Dam Construction. – 1989. – ol. 41, No. 4. – P. 30–34.

95 Стефанишин, Д. В. Оценка вероятности разрушения грунтовых плотин при отказе водосбросных сооружений / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1987. – Т. 202. – С. 53–57.

96 Косиченко, Ю. М. Применение резервных водосбросов в грунтовых плотинах для пропуска паводковых вод [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – № 2 (08). – 16 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/2014/05/14>.

97 Косиченко, Ю. М. Быстровозводимый водосброс низконапорного гидроузла малого водохранилища [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, К. В. Морогов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск:

РосНИИПМ, 2012. – № 4 (08). – 14 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/2012/12/10>.

98 Стефанишин, Д. В. К оценке надежности водопропускных сооружений гидротехнических узлов / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 236. – С. 77–82.

99 Косиченко, Ю. М. Высоконадежные конструкции противофильтрационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 8. – С. 18–25.

100 Баев, О. А. Применение планирования эксперимента для изучения водопроницаемости экрана из геомембраны / О. А. Баев // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 46–51.

101 Косиченко, Ю. М. Методика расчета параметров резервного водосброса с размываемой вставкой на основе гидравлических формул [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – № 4 (16). – 13 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/2014/11/17>.

102 Богославчик, П. М. Гидравлический расчет резервного водосброса с размываемой вставкой / П. М. Богославчик // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1990. – Вып. 19. – С. 24–30.

103 Пат. 2498007 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 7/06. Резервный водосброс грунтовой плотины / Косиченко Ю. М., Морогов К. В., Чернов М. А., Михайлов Е. Д.; заявитель и патентообладатель Российский науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – № 2012114853/13; заявл. 13.04.12; опубл. 13.04.12, Бюл. № 31. – 15 с.: ил.

104 Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.

105 Косиченко, Ю. М. Оценка надежности работы резервного водосброса с размываемой вставкой / Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 2. – С. 130–140.

106 Стефанишин, Д. В. Некоторые предложения по количественной оценке надежности водосбросов / Д. В. Стефанишин, Т. В. Гавриленко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1991. – Т. 225. – С. 29–33.

107 Иваненко, Ю. Г. Теоретические принципы и решения специальных задач гидравлики открытых водотоков / Ю. Г. Иваненко, А. А. Ткачев. – Новочеркасск: Лик, 2013. – 203 с.

108 Глаговский, В. Б. Геосинтетические материалы в гидротехническом строительстве / В. Б. Глаговский, С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, Н. В. Добровская, Н. Л. Орлова // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 9. – С. 23–27.

109 Косиченко, Ю. М. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов: монография / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – 239 с.

110 Сольский, С. В. Перспективы и проблемы применения в грунтовых гидротехнических сооружениях современных геосинтетических материалов / С. В. Сольский, Н. Л. Орлова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 260. – С. 61–68.

111 Лупачев, О. Ю. Исследования повреждаемости геомембран частицами грунта защитных слоев / О. Ю. Лупачев // Геосинтетические материалы в промышленном и гидротехническом строительстве: сб. материалов 1-й международной науч.-технич. конф. – СПб., 2011. – С. 35–49.

112 Инструкция по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов: СН 551-82: утв.

постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства 31.05.82: введ. в действие с 01.01.83. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.

113 Косиченко, Ю. М. Рекомендации по применению геосинтетических материалов для противофильтрационных экранов каналов, водоемов и накопителей / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев; ФГБНУ РосНИИПМ. – Новочеркасск, 2015. – 210 с. – Деп. в ВИНТИ 12.01.2015, № 1-В2015.

114 Рекомендации по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полимерных рулонных материалов // ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, СПб НИИ АКХ им. К. Д. Панфилова, СК «Гидрокор». – СПб., 1999.

115 Косиченко, Ю. М. Гибкие конструкции противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий с применением геосинтетических материалов / Ю. М. Косиченко, А. В. Ломакин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 73–79.

116 Чернов, М. А. Обоснование противофильтрационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов / М. А. Чернов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технич. науки. – 2011. – № 2. – С. 108–114.

117 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.

118 Косиченко, Ю. М. Гидравлическая эффективность и эксплуатационная надежность крупных каналов территориального перераспределения стока [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2013. – № 2 (10). – 17 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/2013/05/20>.

119 Иващенко, И. Н. Инженерная оценка грунтовых плотин / И. Н. Иващенко. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 140 с.

120 Об опыте декларирования безопасности гидротехнических сооружений: сб. науч. тр. – Вып. 2: Безопасность энергетических сооружений. – М.: НИИЭС, 1998. – С. 32–37.

121 Риски отказов бетонных плотин: сб. науч. тр. – Вып. 2: Безопасность энергетических сооружений. – М.: НИИЭС, 1998. – С. 37–44.

122 Илюшин, В. Ф. Аварии и в подземных водоводах и методы восстановления повреждений / В. Ф. Илюшин, С. Н. Крылова // Гидротехническое строительство. – 1993. – № 4. – С. 44–52.

123 Калустян, Э. С. Уроки аварий Киселевской и Тирлянкой плотин / Э. С. Калустян // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 4. – С. 3.

124 Гидравлические аспекты прогноза условий прорыва напорного фронта гидроузла: сб. науч. тр. – Вып. № 1: Безопасность энергетических сооружений – М.: НИИЭС, 1998. – С. 91–100.

125 Затворы системы «Гидроплюс», как фактор повышения безопасности и экономичности гидроузлов: сб. науч. тр. – Вып. 2: Безопасность энергетических сооружений. – М.: НИИЭС, 1998. – С. 89–99.

126 Пономарчук, К. Р. Экспериментальные исследования процесса разрушения грунтовых плотин / К. Р. Пономарчук, А. М. Прудовский // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 4. – С. 3.

127 Гидротехнические сооружения: учеб. для вузов / Н. П. Розанов [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с.

128 Мелиорация и водное хозяйство. Сооружения. Строительство: справочник / А. В. Колганова [и др.]; под ред. А. В. Колганова. – М.: Ассоциация «Экост», 2002. –

601 с.

129 Пат. 2080433 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 9/04. Водосброс чрезвычайных паводков для плотин и сооружений подобного типа / Лемперьер Ф.; заявитель и патентообладатель ГТМ «Энтрепоз». – № 5010569/15; заявл. 27.12.91; опубл. 27.05.97, Бюл. № 31. – 27 с.: ил.

130 Пат. 2071527 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 9/04. Резервный водосброс подпорного типа / Ягин В. П., Руднов В. М.; заявитель и патентообладатель Ягин В. П., Руднов В. М. – № 92001646/15; заявл. 20.10.92; опубл. 10.01.97, Бюл. № 29. – 4 с.: ил.

131 Пат. 2256742 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 8/06. Водосброс гидротехнического сооружения / Мауль В. К., Комаров М. А.; заявитель и патентообладатель акционерная компания «АЛРОСА». – № 2003130008/03; заявл. 09.10.03; опубл. 20.07.05, Бюл. № 20. – 6 с.: ил.

132 Пат. 2061817 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 9/04. Водосбросное сооружение / Баширов Ф. Б., Мамедов А. Ш.; заявитель и патентообладатель Азербайджанский науч.-исслед. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии. – № 4939151/15; заявл. 24.05.91; опубл. 10.06.96, Бюл. № 35. – 3 с.: ил.

133 Пат. 2050433 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 8/06. Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения / Ягин В. П., Вахрушев А. Ю.; заявитель и патентообладатель Ягин В. П. – № 5029478/15; заявл. 06.02.92; опубл. 20.12.95, Бюл. № 17. – 6 с.: ил.

134 Пат. 2011736 Российская Федерация, МПК(7) Е 02 В 7/06, Е 02 В 8/06. Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса / Малаханов В. В.; заявитель Московский инженерно-строительный ин-т им. В. В. Куйбышева и патентообладатель Малаханов В. В. – № 4926435/15; заявл. 08.04.91; опубл. 30.04.94, Бюл. № 28. – 7 с.: ил.

135 Пат. 1562393 СССР, МПК(7) Е 02 В 7/06. Водосброс / Орешкин Ю. Г., Мажбиц Г. Л.; заявитель и патентообладатель науч.-исслед. сектор Всесоюзного проектно-изыскательского ин-та «Гидропроект» им. С. Я. Жука. – № 4452871/23-15; заявл. 05.07.88; опубл. 07.05.90, Бюл. № 17. – 2 с.: ил.

136 Пат. 1532656 СССР, МПК(7) Е 02 В 7/06. Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения / Мажбиц Г. Л.; заявитель и патентообладатель науч.-исслед. сектор Всесоюзного проектно-изыскательского ин-та «Гидропроект» им. С. Я. Жука. – № 4348727/23-15; заявл. 25.12.87; опубл. 30.12.89, Бюл. № 48. – 3 с.: ил.

137 Пат. 1209754 СССР, МПК(7) Е 02 В 7/06. Водосбросное сооружение / Богославчик П. М.; заявитель и патентообладатель Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политех. ин-т. – № 3776503/29-15; заявл. 30.07.84; опубл. 07.02.86, Бюл. № 5. – 3 с.: ил.

138 Пат. 968150 СССР, МПК(7) Е 02 В 7/06. Водосливная грунтовая плотина / Правдивец Ю. П.; заявитель и патентообладатель Московский ордена Трудового Красного Знамени Инженерно-строительный ин-т им. В. В. Куйбышева. – № 2790115; заявл. 05.07.79; опубл. 23.10.82, Бюл. № 39. – 3 с.: ил.

139 Пат. 1070262 СССР, МПК(7) Е 02 В 7/06. Гидротехническое сооружение / Ландау Ю. А.; заявитель и патентообладатель Украинское отделение Всесоюзного Ордена Ленина проектно-изыскательского и науч.-исслед. ин-та Гидропроект им. С. Я. Жука. – № 3536868; заявл. 10.01.83; опубл. 30.01.84, Бюл. № 4. – 2 с.: ил.

140 Гидротехнические сооружения: учеб. для вузов / И. А. Васильева [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М.: Стройиздат, 1978. – 647 с.

141 Богославчик, П. М. Исследования транспортирующей способности потока

при размыве плотин из песчаных грунтов / П. М. Богославчик // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – Вып. 14. – 1985. – С. 48–52.

142 Богославчик, П. М. Исследование кривых свободной поверхности на моделях грунтовых плотин при их размыве переливом / П. М. Богославчик // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – Вып. 16. – 1987. – С. 71–75.

143 Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – М.: Росинформагротех, 2005. – 388 с.

144 Косиченко, Ю. М. Теоретическая оценка водопроницаемости противofильтрационной облицовки нарушенной сплошности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия высших учебных заведений. Технич. науки. – 2014. – № 3. – С. 68–74.

145 Богомолов, А. И. Гидравлика: учеб. для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд., доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

146 Гидравлические расчеты туннельных и трубчатых водосбросов гидроузлов: рекомендации / под ред. Ф. Г. Гунько. – Л.: Энергия, 1974.

147 Гидротехнические сооружения: справочник / В. П. Недриги [и др.]; под ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

148 Куранов, Н. П. Расчеты риска аварий гидротехнических сооружений / Н. П. Куранов, Н. Н. Розанов, Е. А. Тимофеева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 1. – С. 41–44.

149 Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин [и др.]; под ред. В. Н. Щедрина. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2010. – 88 с.

150 Попов, К. В. Мелиоративные каналы / К. В. Попов. – М.: Колос, 1969. – 184 с.

151 Королев, А. А. Каналы гидроэлектрических станций / А. А. Королев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 176 с.

152 Угинчус, А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов / А. А. Угинчус. – М.: Стройиздат, 1965. – 276 с.

153 Ибад-Заде, Ю. А. Водопроводные каналы / Ю. А. Ибад-Заде. – М.: Стройиздат, 1975. – 192 с.

154 Ибад-Заде, Ю. А. Транспортирование воды в открытых каналах / Ю. А. Ибад-Заде. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.

155 Лапшенков, В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / В. С. Лапшенков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 240 с.

156 Рабкова, Е. К. Методика расчета русловых переформирований для потока повышенной мутности. Речная гидравлика и гидротехника / Е. К. Рабкова. – М.: Изд-во УДН, 1973. – С. 91–104.

157 Рабкова, Е. К. Проектирование и расчет оросительных каналов в земляном русле / Е. К. Рабкова. – М.: Изд-во УДН, 1990. – 252 с.

158 Рабкова, Е. К. Метод расчета крупных каналов / Е. К. Рабкова // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 4. – С. 76–84.

159 Косиченко, Ю. М. Гидравлика мелиоративных каналов / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НИМИ, 1992. – 175 с.

160 Каналы систем водоснабжения и ирригация: рекомендации по проектированию и эксплуатации каналов / под ред. А. М. Латышенков. – М.: Стройиздат, 1972. – 220 с.

161 Железняков, Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек / Г. В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 312 с.

162 Алтунин, В. С. Особенности взвесенесущего потока в канале и расчет на-

дежности / В. С. Алтунин, Т. А. Алиев // Гидротехническое строительство. – 1989. – № 7. – С. 11–16.

163 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

164 Запороженко, Э. В. Инженерно-геологический опыт проектирования, строительства и эксплуатации первой очереди Большого Ставропольского канала / Э. В. Запороженко. – Ставрополь: Ставропольское кн. изд-во, 1974. – 78 с.

165 Ищенко, А. В. Повышение эффективности и надежности противофильтрационных облицовок оросительных каналов. – Ростов н/Д.: Изд-во журн. «Известия вузов, Северо-Кавказский регион», 2006. – 212 с.

166 Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

167 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.

168 Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1974. – 280 с.

169 Бакланова, Д. В. Расчетное обоснование вероятности разрушения потенциально опасных участков крупного канала от фильтрационных воздействий / Д. В. Бакланова // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 43–48.

170 Проблемы и перспективы использования водных ресурсов в агропромышленном комплексе России: монография / В. Н. Щедрин [и др.]; под ред. В.Н. Щедрина. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2009. – 342 с.

171 Байчоров, Ю. У. Применение пленочных противофильтрационных экранов для ремонтных работ Большого Ставропольского канала / Ю. У. Байчоров, Ю. М. Косиченко, Б. И. Сергеев // Гидротехническое строительство. – 1981. – № 6. – С. 40–43.

172 Рекомендации по безопасной эксплуатации Левого ветви Правоегорлыкского канала: рекомендации / под ред. В. А. Волосухина. – Новочеркасск: ИБГТС, 2009.

173 Терлецкая, М. Н. Каналы в водонеустойчивых грунтах аридной зоны / М. Н. Терлецкая. – М.: Колос, 1983. – 96 с.

174 Смирнов, А. Е. Канал Иртыш-Караганда / А. Е. Смирнов // Гидротехника и мелиорация. – 1974. – № 7. – С. 20–27.

175 Каганов, Г. М. Некоторые проблемы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений / Г. М. Каганов, В. И. Волков // Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. I. – М.: МГУП, 2006.

176 Анахаев, К. Н. Расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемом основании разной мощности / К. Н. Анахаев, Ж. Х. Шогенова, Б. Х. Амшонов // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 2. – С. 29–33.

177 Анахаев, К. Н. Свободная фильтрация из водотоков / К. Н. Анахаев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2004. – № 5. – С. 94–99.

178 Волосухин, В. А. Использование водных ресурсов и безопасность гидротехнических сооружений в бассейне р. Кубань / В. А. Волосухин, М. А. Волинов // Мелиорация и водное хоз-во. – 2007. – № 4. – С. 65–68.

179 Золотов, Л. А. Безопасность гидротехнических сооружений / Л. А. Золотов, И. Н. Иващенко // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 2. – С. 29–32.

180 Ищенко, А. В. Обоснование рациональных конструкций противофильтрационных устройств гидротехнических сооружений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.07 / Ищенко Александр Васильевич. – СПб., 2010. – 32 с.

181 Косиченко, Ю. М. Вопросы безопасности и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / Ю. М. Косиченко // Природообустройство. – 2008. – № 3. – С. 67–71.

182 Косиченко, Ю. М. Выбор противофильтрационных облицовок при реконструкции каналов в земляном русле / Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов, М. А. Чернов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. ст. / ФГНУ «РосНИИПМ» / Ю. М. Косиченко [и др.]; под ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: Геликон, 2007. – Вып. 38. – С. 48–53.

183 Косиченко, Ю. М. Гидравлические и экологические аспекты эксплуатации каналов: учеб. пособие / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2000. – 230 с.

184 Косиченко, Ю. М. Современное техническое состояние и уровень безопасности Донского и Пролетарского магистральных каналов / Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов, Г. Л. Лобанов // Инновационные технологии повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ГНУ ПНИИЭМТ. – Волгоград, 2010. – С. 239–245.

185 Косиченко, М. Ю. Гидравлическая эффективность и надежность функционирования каналов оросительных систем / М. Ю. Косиченко, Ю. И. Иовчу // Изв. вузов Северо-Кавказского региона. Техн. науки. – 2008. – № 1. – С. 75–79.

186 Косиченко, Ю. М. Критерии эксплуатационной надежности оросительных каналов / Ю. М. Косиченко, М. Ю. Косиченко, Ю. И. Иовчу // Природообустройство. – 2008. – № 1. – С. 70–74.

187 Павловский, Н. Н. Гидравлический справочник / Н. Н. Павловский. – М.; Л.: ОПТН, 1937. – 890 с.

188 Павловский, Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения / Н. Н. Павловский // Собр. соч. – М.; Л., 1956. – Т. 2. – 771 с.

189 Розанов, Н. Н. Моделирование работы гидротехнических сооружений / Н. Н. Розанова. – М.: Изд-во РУДН, 1998. – 108 с.

190 Румянцев, И. С. Проблемы гидротехнического строительства в России / И. С. Румянцев // Природообустройство. – 2008. – № 1. – С. 12–17.

191 Стефанишин, Д. В. Оценка надежности и безопасности гидротехнических объектов в рамках теории риска и системного анализа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.07 / Стефанишин Дмитрий Владимирович. – СПб., 1998. – 40 с.

192 Каганов, Г. М. Обследование гидротехнических сооружений при оценке их безопасности / Г. М. Каганов, В. И. Волков, О. Н. Черных. – М.: МГУП, 2001. – 60 с.

193 Курбанов, С. О. Развитие теории, методов расчетного обоснования и проектирования каналов и зарегулированных русел с полигональным поперечным сечением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.07 / Курбанов Сали-Гаджи Омарович. – М., 2013. – 55 с.

194 Латышенков, А. М. Вопросы гидравлики искусственно сжатых русел / А. М. Латышенков. – М.: Стройиздат, 1960. – 215 с.

195 Секисова, И. А. Разработка и апробация системы оценки состояния гидротехнических сооружений речных низконапорных гидроузлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Секисова Ирина Артуровна. – М., 2008. – 31 с.

196 Harford, D. Dam risk management in Canada – A Canadian approach to dam safety / D. Harford // Int. Workshop on risk-based dam safety evaluation. Trondheim. – 1997.

197 Allen, H. Making a business of dam safety / H. Allen. W. P. And D. C. – 1997. – P. 20–21.

198 Laffite, R. Classes of risk for dams / R. Laffite. – Issue 6: Hydropower and

Dam. – 1996. – P. 59–66.

199 TC 250/SC7/PT1. PT Version «g». Draft prEN 1997-1. «Eurocod 7: Geotechnical Design». – Part 1: General Rules. – 166 p.

200 Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 2002. – 21 с.

201 Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений: 210.02.НТ-04 // Одобрены решением Ученого совета ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», протокол № 12 от 19.11.04. – СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2004. – 110 с.

202 Каганов, Г. М. Приближенная оценка глубины затопления территории в нижнем бьефе при прорыве напорного фронта низконапорных гидроузлов / Г. М. Каганов, В. И. Волков, И. А. Секисова // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 4. – С. 22–26.

203 Каганов, Г. М. Сравнение параметров волны прорыва, определенных различными методами / Г. М. Каганов, В. И. Волков, И. А. Секисова // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 1. – С. 34–36.

204 Гольдин, Г. Р. Прогноз и профилактика повреждений каналов в просадочных грунтах, проложенных на косогорах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.12.89 / Гольдин Григорий Рувимович. – М., 1989. – 21 с.

205 Пономарчук, К. Р. Разработка методики оценки параметров процесса формирования прорывов при прорывах грунтовых плотин: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 22.01.02 / Пономарчук Карина Рюриковна. – М., 2001. – 23 с.

206 Ведерников, В. В. Влияние капиллярного поднятия на фильтрацию из каналов / В. В. Ведерников // Гидротехническое строительство. – 1935. – № 5. – С. 20–27.

207 Ведерников, В. В. Теория фильтрации и ее приближение в области ирригации и дренажа / В. В. Ведерников. – М.; Л.: Госстройиздат, 1939. – 248 с.

208 Ведерников, В. В. Фильтрация из каналов / В. В. Ведерников. – М.; Л.: Госстройиздат, 1934. – 67 с.

209 Косиченко, Ю. М. Определение вероятного риска аварии крупного канала вследствие фильтрационных деформаций [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2012. – № 1 (05). – 12 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=82&id=94>.

210 Косиченко, Ю. М. Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи и оценка риска аварийных ситуаций / Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион / Серия: Технич. науки. – 2012. – № 4. – С. 77–81.

211 Мирцхулава, Ц. Е. Надежность систем осушения / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Агропромиздат, 1985. – 239 с.

212 Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов: РД 03-607-03: утв. Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России» 01.08.03: введ. в действие с 01.08.03. – М.: 2003. – 28 с.

213 Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

214 Штеренлихт, Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. – М.: Колос, 2004. – 324 с.

215 Руководство по проектированию стен сооружений и противофильтрационных завес / под ред. А. А. Арсеньева; НИИОСП им. Н. М. Герсевича; ВНИИГС. – М.: Стройиздат, 1977. – 128 с.

216 Замарин, Е. А. Гидротехнические сооружения / Е. А. Замарин, В. В. Фандеев. – М.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1965. – 623 с.

217 Замарин, Е. А. Проектирование гидротехнических сооружений / Е. А. Замарин. – М.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1961. – 452 с.

218 Основания гидротехнических сооружений: СП 23.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.02-1985): утв. Минрегионом России 28.12.10: введ. в действие с 20.05.11. – М.: Минрегион России, 2010. – 111 с.

219 Олейник, А. Я. Геогидродинамика дренажа / А. Я. Олейник. – Киев: Наукова думка, 1981. – 283 с.

220 Веригин, Н. Н. Движение влаги в почве / Н. Н. Веригин // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 89. – № 2. – С. 229–232.

221 Михалев, М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений / М. А. Михалев. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 443 с.

222 Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.

223 Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1973. – 536 с.

224 Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – 8-е изд., переработ. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

225 Зегжда, А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей / А. П. Зегжда. – М.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.

226 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

227 Басниев, К. С. Подземная гидравлика / К. С. Басниев [и др.]; под ред. К. С. Басниева. – М.: Недра, 1986. – 303 с.

228 Костяков, А. Н. Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – 6-е изд., доп и переработ. – М.: Сельхозгиз, 1960. – 660 с.

229 Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – М.: Колос, 1982. – 236 с.

230 Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

231 Нумеров, С. Н. Приближенный способ расчета напорной фильтрации в основании гидротехнических сооружений / С. Н. Нумеров // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: сб. науч. тр. / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Л., 1953. – Т. 50. – С. 12–19.

232 Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

233 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

234 Веников, В. А. Теория подобия и моделирования: учеб. пособие для вузов / В. А. Веников. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.

235 Колганов, А. В. Планирование эксперимента в гидромелиоративных исследованиях / А. В. Колганов, А. М. Питерский, А. Т. Лисконов. – М.: Мелиоводинформ, 1999. – 214 с.

236 Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных /

Д. К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

237 Хартман, К. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.

238 Кавешников, Н. Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений / Н. Т. Кавешников. – М.: Агропромиздат, 1989. – 272 с.

239 Barra, J.-R. Notions fondamentales de statistique mathématique / J.-R. Barra. Dunod. – Paris, 1971. – 276 p.

240 Box, G. E. P. The 2^{k-p} fractional factorial designs / G. E. P. Box, J. S. Runter P.1.2 – Technometrika, 1961. – V. 3. – P. 311–351; P. 449–458.

241 Draper, H. R. The construction of saturated 2^{k-p} designs / H. R. Draper, T. J. Mitchell // Ann. Math. Statist. – 1967. – V. 38. – P. 1110–1126.

242 Хованский, Г. С. Основы номографии / Г. С. Хованский. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

243 Шаров, Н. И. О планировании эксперимента при определении эксплуатационных характеристик сельскохозяйственных машин / Н. И. Шаров // Труды МИИСП. – Вып. 1. – Ч. 1. – М., 1973. – Т. 10. – С. 206–212.

244 Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 384 с.

245 Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

246 Тищенко, А. И. Применение размерностно-регрессионного метода к определению фильтрационных характеристик земляных дамб [Электронный ресурс] / А. И. Тищенко, Д. В. Бакланова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2012. – № 4 (08). – 10 с. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=131&id=140>.

247 Багров, М. Н. Оросительные системы и их эксплуатация / М. Н. Багров, И. П. Кружилин. – М.: Агропромиздат, 1988. – 255 с.

248 Гурин, К. Г. Неоднородная шероховатость частично облицованных русел крупных каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Гурин Константин Георгиевич. – Новочеркасск, 2001. – 28 с.

249 Долгушев, И. А. Повышение надежности оросительных каналов / И. А. Долгушев. – М.: Колос, 1975. – 135 с.

250 Иовчу, Ю. И. Методы и вероятностные модели оценки гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности оросительных каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Иовчу Юлия Ивановна. – Москва, 2010. – 24 с.

251 Карасев, И. Ф. Русловые процессы при переброске стока / И. Ф. Карасев. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.

252 Колганов, А. В. Гидравлическая эффективность и надежность оросительных каналов / А. В. Колганов, Ю. М. Косиченко. – М.: Изд-во «Рома», 1997. – 160 с.

253 Лобанов, Г. Л. Неразрываемые русла земляных каналов и разработка рекомендаций по их гидравлическому расчету: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / Лобанов Георгий Леонидович. – Новочеркасск, 1995. – 24 с.

254 Лятхер, В. М. Оценка надежности гидросооружений / В. М. Лятхер, Л. А. Золотов, И. Н. Иващенко, В. Б. Янгер // Гидротехническое строительство. – 1985. – № 2. – С. 6–12.

255 Мелиорация и водное хозяйство. Сооружения. Строительство: справочник / под ред. А. В. Колганова, П. А. Полад-Заде. – М.: Ассоциация «ЭкоСт», 2002. – 601 с.

256 Полякова, Н. Ю. Гидравлические сопротивления и пропускная способность бетонных русел каналов при их эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук:

05.23.16 / Полякова Наталья Юрьевна. – Новочеркасск, 2000. – 28 с.

257 Сазаев, А. А. Обоснование параметров эксплуатационной надежности облицованных каналов в условиях предгорной зоны: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Созаев Ахмед Абдулкеримович. – Новочеркасск, 2008. – 28 с.

258 Чернов, М. А. Противофильтрационные конструкции каналов и водоемов с применением геомембран из полиэтилена высокого и низкого давления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Чернов Михаил Александрович. – Новочеркасск, 2011. – 24 с.

259 Чернов, М. А. Оценка эксплуатационной надежности конструкций бетоно-пленочных облицовок каналов / М. А. Чернов // Известия вузов. Сев.-Кав. регион, Технич. науки. – 2011. – № 1. – С. 136–139.

260 Чернов, М. А. Расчетное обоснование надежности облицовок каналов с применением геомембран / М. А. Чернов // Природообустройство. – 2011. – № 4. – С. 80–84.

261 Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу. – М.: Стройиздат, 1969. – 308 с.

262 Ачкасов, Г. П. Технология и организация ремонта мелиоративных гидротехнических сооружений / Г. П. Ачкасов, Е. С. Иванов. – М.: Колос, 1984. – 174 с.

263 Надежность накопителей промышленных отходов / С. В. Сольский, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, С. Г. Шульман. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2006. – 299 с.

264 Пат. 2562487 Российская Федерация, МПК Е 02 В 3-12. Способ заделки очага фильтрационных деформаций в дамбе канала / Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Бакланова Д. В., Баев О. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ЮжНИИГиМ». – № 2013149777; заявл. 06.11.2013; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 14. – 7 с.: ил.

265 Винокуров, А. А. Совершенствование элементов системы противопаводковой защиты в верховьях реки Кубань: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Винокуров Андрей Александрович. – Новочеркасск, 2011. – 22 с.

266 Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года: постановление Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р: по состоянию на 18 сентября 2015 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный Ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

Научное издание

Щедрин Вячеслав Николаевич
Косиченко Юрий Михайлович
Бакланова Дарья Викторовна
Баев Олег Андреевич
Михайлов Евгений Дмитриевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
И НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Подписано в печать 12.07.2016. Формат 60×84 1/8
Усл. печ. л. 32,78. Тираж 500 экз. Заказ № 61

ФГБНУ «РосНИИПМ»
346421, Ростовская область, г. Новочеркасск,
Баклановский проспект, 190

Отпечатано с готового оригинал-макета
ИП Белоусов А. Ю.
346421, Ростовская область, г. Новочеркасск,
Баклановский проспект, 190 «Е»