

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ОБРАЗОВАНИЕ»  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ**

---

**Ю.П. ЛЯПИЧЕВ**

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ  
И ТЕХНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ГИДРОСООРУЖЕНИЙ**

**Учебное пособие**

**Москва**

**2008**

**«Создание комплекса инновационных образовательных программ  
и формирование инновационной образовательной среды,  
позволяющих эффективно реализовывать государственные интересы РФ  
через систему экспорта образовательных услуг»**

Экспертное заключение –

заведующий лабораторией грунтовых плотин (ОАО «НИИВОДГЕО»)  
доктор технических наук *Н.Н. Розанов*

**Ляпичев Ю.П.**

Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: Учеб.  
пособие. – М.: РУДН, 2008. – 222 с.

В пособии приводятся нормативные и инженерные методы качественной и количественной оценки безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) комплексных и энергетических гидроузлов. Рассматривается методика оценки уровня и определения критериев безопасности ГТС, включающая в себя два уровня критериальных значений диагностических показателей поведения ГТС. Дается вероятностная оценка риска аварий ГТС и стоимостная укрупненная оценка основных видов ущерба.

Для магистров, обучающихся по специализации «Гидротехническое строительство» в РУДН и других вузах РФ. Пособие будет также полезно инженерам-гидротехникам, занимающимся вопросами безопасности ГТС.

*Учебное пособие выполнено в рамках инновационной образовательной программы Российского университета дружбы народов, направление «Комплекс экспортноориентированных инновационных образовательных программ по приоритетным направлениям науки и технологий», и входит в состав учебно-методического комплекса, включающего описание курса, программу и электронный учебник.*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	7
<b>Глава 1. Проблемы безопасности гидротехнических сооружений</b> ...	8
1.1. Основные факторы риска аварий ГТС (плотин).....	8
1.2. Виды и последствия наводнений.....	19
1.3. Способы защиты от наводнений.....	23
1.4. Опасность наводнений при прорыве плотин.....	25
<b>Глава 2. Гидрологическая безопасность гидросооружений</b> .....	27
2.1. Понятие гидрологически опасных объектов.....	27
2.2. Аварии на гидрологически опасных гидросооружениях и возникновение наводнений.....	28
2.3. Риск и надежность при строительстве и эксплуатации плотин.....	34
2.4. Последствия гидрологических аварий плотин и затоплений НБ.....	36
2.5. Ликвидация последствий гидрологических аварий (ГЛА) плотин и затоплений НБ.....	41
2.6. Оценка обстановки при прохождении волны прорыва.....	42
2.7. Пример решения задачи по оценке обстановки при ГЛА.....	44
2.8. Задание на контрольную работу.....	45
<i>Приложение. Таблицы воздействий потока на здания и сооружения</i> ...	46
<b>Глава 3. Методика оценки уровня безопасности гидросооружений</b> .....	49
Введение .....	49
3.1. Термины и определения.....	50
3.2. Общие положения методики.....	50

3.3. Структура факторов безопасности гидросооружений.....	55
3.4. Таблицы для ранжированной оценки факторов безопасности и уровня безопасности эксплуатируемых гидросооружений.....	62
<i>Приложение А.</i> Определение приоритетности количественных и качественных значений факторов безопасности ГТС.....	65
<i>Приложение Б.</i> Сценарии развития возможных аварий ГТС.....	67
3.5. Информационно-диагностическая программа «Гидробезопасность» (опыт применения для оценки состояния Можайского гидроузла).....	68
<b>Глава 4. Методика определения критериев безопасности ГТС.....</b>	<b>75</b>
Введение.....	75
4.1. Основные понятия.....	78
4.2. Общие положения методики.....	84
4.3. Определение критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС.....	90
4.4. Прогнозные математические модели ГТС.....	93
4.5. Применение качественных характеристик состояния ГТС при определении критериальных диагностических показателей.....	99
4.6. Требования к организации натурных наблюдений.....	100
4.7. Применение критериальных значений диагностических показателей при принятии решений по обеспечению безопасности ГТС.....	103
<i>Приложение 1.</i> Порядок разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС.....	104
<i>Приложение 2.</i> Перечень контролируемых количественных и качественных показателей состояния, уровня воздействий и условий эксплуатации ГТС.....	106

<i>Приложение 3. Оценка уровня риска аварий эксплуатируемых ГТС....</i>	108
<i>Приложение 4. Методы определения критериальных значений показателей состояния гидросооружений.....</i>	111
<b>Глава 5. Примеры определения критериев безопасности ГТС.....</b>	113
5.1. Осадки бетонных плотин и гидросооружений.....	113
5.2. Горизонтальные перемещения гребня бетонных плотин.....	114
5.3. Напряжения в бетоне плотин.....	115
5.4. Положение пьезометрических уровней в основании бетонных плотин.....	116
5.5. Осадки грунтовых плотин.....	118
5.6. Горизонтальные смещения гребня грунтовой плотины.....	120
5.7. Трещинообразование в глинистых ядрах и экранах грунтовых плотин.....	121
5.8. Положение поверхности депрессии в грунтовых плотинах.....	124
5.9. Фильтрационная прочность грунтовой плотины и ее основании....	125
5.10. Фильтрационные расходы в грунтовой плотине и основании.....	128
5.11. Мутность воды, профильтровавшейся через плотину и ее основание.....	129
5.12. Определение критериев безопасности бетонной водосливной плотины Воткинской ГЭС.....	130
5.13. Определение критериев безопасности земляной плотины Воткинской ГЭС.....	141
5.14. Определение критериев безопасности бетонной водосливной плотины Волжской ГЭС.....	153
	162
<b>Глава 6. Оценка всестороннего ущерба от аварий ГТС .....</b>	
6.1. Термины и определения.....	162

6.2. Общие положения методики оценки ущерба.....	164
6.2.1. Назначение и условия применения методики.....	164
6.3. Исходные данные для расчета вероятного ущерба.....	166
6.3.1. Сценарии аварии ГТС при расчете вероятного ущерба.....	166
6.3.2. Нарушение водоснабжения (первая и вторая группы сценариев аварий ГТС).....	171
6.3.3. Определение вероятного вреда проводится для сценария наиболее тяжелой аварии ГТС.....	171
6.3.4. Перечень возможных аварий и предаварийных ситуаций на ГТС и их негативных воздействий.....	171
6.3.5. Оценка параметров негативных воздействий аварии ГТС.....	171
6.4. Методы ориентировочной оценки ущерба.....	177
6.5. Метод укрупненных показателей оценки ущерба.....	179
<i>Приложение 1. Декларация безопасности ГТС.....</i>	191
<i>Приложение 2. Форма акта преддекларационного обследования ГТС ..</i>	192
<i>Приложение 3. Методические основы анализа и оценки риска аварий ГТС.....</i>	199
<i>Приложение 4. Список программ расчетов, используемых для оценки безопасности ГТС на кафедре ГиГС РУДН.....</i>	210
<b>Литература.....</b>	211
<b>Описание курса и программа .....</b>	213

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие по методике оценки безопасности и риска аварии гидротехнических сооружений (ГТС) разработано для магистров, обучающихся по специализации «Гидротехническое строительство» в РУДН и других вузах России. Необходимость этого учебного пособия вызвана тем, что после 20 лет застоя в России, наконец, возобновилось гидротехническое строительство и появилась потребность в подготовке магистров или инженеров–исследователей в самой сложном виде строительства – гидротехническом. В настоящее время в России состояние многих крупных плотин и ГЭС не удовлетворяет возросшим требованиям безопасной эксплуатации. Наряду с известными причинами, увеличивающими риск аварии плотин, существует ряд факторов, таких, как превышение нормативных сроков эксплуатации целого ряда плотин и ГТС, отсутствие профилактических ремонтов в связи с финансовыми трудностями и другие.

Угрожает безопасности ГТС, плотин и ГЭС их старение. Большинство из них эксплуатируется более 30–40 лет. Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с введением в 1997 г. в действие Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений». Сейчас 12 ГЭС РФ уже перешли рубеж 50-летней эксплуатации, а 20 ГЭС перейдут его к 2010 г.

Автор в своем пособии обобщил разработанные в 2000–2007 годах в ОАО «НИИЭС» и «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» методики оценки безопасности гидросооружений ГЭС, эксплуатируемых в системе РАО «ЕЭС России». В пособии использовались также последние (2003 г.) рекомендации Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ), труды последних Международных конгрессов СИГБ и опыт гидроэнергетических компаний Канады, США и Западной Европы по оценке безопасности плотин.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Н.Н. Розанову за рецензирование рукописи и ценные замечания, которые помогли улучшить ее содержание.

## **Глава 1. Проблемы безопасности гидротехнических сооружений (ГТС)**

### **1.1. Основные факторы риска аварий ГТС (плотин)**

Плотины и водохранилища, построенные в разных странах, в разных природных условиях, зарекомендовали себя прочными и долговечными сооружениями, многие из них эксплуатируются сотни и даже тысячу лет.

Так, в Англии 50% плотин построено более 80 лет тому назад, в Испании 10 плотин функционируют более 1600 лет. На Рейне до сих пор эксплуатируется старейшая в Европе ГЭС Рейнфельден, построенная в 1880 г.

Большинство плотин построено после 1950 года современными методами и на основе современных проектов. Однако мировая статистика последних 20–30 лет говорит о том, что возможность их повреждений и разрушений исключить нельзя. Более того, вероятность аварий на ГТС и крупных техногенных аварий на других объектах имеет тенденцию роста, особенно после их эксплуатации более 40–50 лет.

По данным Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) к началу этого века в мире было построено около 46 тысяч больших плотин (согласно критериям СИГБ большой считается плотина высотой 15 и более метров, а также плотины высотой 5–15 м с объемом водохранилища более 3 млн. м<sup>3</sup>). Из этого числа плотин более 70% являются грунтовыми. Наибольшее их число в Нидерландах (100%) и Англии (67%), наименьшее – в Норвегии (1%) и Австрии (12%). Почти на 20% грунтовых плотин разного типа были зафиксированы повреждения, аварии и разрушения.

Самыми надежными оказались бетонные плотины, примерно в 3 раза менее надежны земляные плотины. Надежность плотин зависит также от их высоты, времени постройки и других факторов. Из общего числа аварий около 37% произошли на земляных и каменно-земляных плотинах вследствие перелива воды через их гребень и последующего их разрушения.

Катастрофические аварии за всю историю эксплуатации плотин наблюдались во многих развивающихся и развитых странах.

В историю гидротехники вошли огромные катастрофы, вызванные прорывом плотин на реках Хуанхе и Янцзы, Миссисипи и Миссури, на Дунае. Крупные аварии плотин произошли в США, Франции, Италии, Индии, Бразилии, Южной Корее и других странах. Наиболее трагические последствия от аварий плотин имели место в США (плотины Саут Форк, Каньон Лейк, Сан Френсис, Тетон). Ущерб от разрушения каменно-земляной плотины Тетон высотой 93 м в бассейне р. Колорадо превысил 1 млрд. долл.

Масштаб национальных бедствий приобрели крупные аварии плотин в Италии – Грено и Вайонт. В последнем случае в водохранилище обрушился старый оползень, вызвавший перелив волны высотой около 100 м через арочную плотину высотой 262 м (число жертв превысило 3200 человек).

Во Франции в 1959 г. из-за сдвига скального опорного массива была разрушена арочная плотина Мальпассе высотой 180 м, погиб 421 человек, уничтожена военно-воздушная база и ущерб составил 68 млн. долл.

Аварии с большими ущербами были на плотинах в Индии (Мачху-2), в Бразилии (Орос), в Южной Корее (Хаюкири). Перечисленные 10 крупных аварий плотин в разных странах привели к гибели свыше 16500 человек.

Сейчас в России эксплуатируется более 300 тыс. водохранилищ и несколько сотен накопителей стоков и промышленных отходов. Имеется 60 крупных водохранилищ с объемами более 1 км<sup>3</sup>. Топливо-энергетический комплекс располагает 350 ГТС, среди них 100 ГЭС с наиболее крупными водохранилищами. Для судоходства используются более 700 водохранилищ, в сельском хозяйстве – более 200 ГТС.

В России построено 9 высоких (свыше 100 м) бетонных плотин ГЭС, в том числе Саяно-Шушенская, Чиркейская, Бурейская, Братская, Красноярская и другие (табл. 1.1). Все они уникальны по своей конструкции, геологическим условиям основания, особенностям воздействий и условиям эксплуатации. Среди них одними из самых уникальных в мире высоких плотин, отличающихся сложностью конструкции, являются арочно-гравита-

ционная Саяно-Шушенская (242 м) и арочная Чиркейская (233 м) плотины.

Из 18 крупнейших по объему водохранилищ мира шесть расположены в России (Братское – 169 км<sup>3</sup>, Красноярское – 73, Зейское – 68, Усть-Илимское – 59, Куйбышевское – 58, Рыбинское – 25 км<sup>3</sup>).

Крупнейшие водохранилища мира: Оуэн Фоллс – 205 км<sup>3</sup> в Уганде на озере Виктории (бассейн р. Нила), Кариба – 180 км<sup>3</sup> на р. Замбези в Зимбабве. Братское – 169 км<sup>3</sup> на р. Ангара в России, Асуанское (озеро Наср) – 164 км<sup>3</sup> на р. Нил в Египте.

Плотины разной высоты, входящие в состав 97 ГЭС  
Минэнерго РФ (мощностью более 10 МВт)

Табл. 1.1

Плотины высотой более 100 м	Плотины высотой 50-100 м	Плотины высотой до 50 м
Саяно-Шушенская 242 м Чиркейская 232 м Бурейская 140 м Колымская 126 м Братская 125 м Красноярская 124 м Зейская 116 м Усть-Илимская 105 м Ирганайская 101 м	Богучанская 87 м Зарамагская 79 м Серебрянская-II 78 м Вилуйская-II 75 м Усть-Хантайская 65 м Серебрянская-I 62 м Курейская 63 м Вилуйская-I 55 м Верхнее-Туломская 55 м	55 плотин ГЭС, в том числе основные ГЭС Волжско-Камского каскада

Из 30 самых мощных ГЭС мира 6 построены в России, из них Саяно-Шушенская занимает 7-е место. По мощности ГЭС Россия – на 5-ом месте.

Плотины большинства ГЭС России мощностью более 10 мВт имеют большую высоту (50–100 м и более) и расположены в горных или предгорных районах, равнинные ГЭС имеют плотины высотой до 50 м (табл. 1.1).

Чрезвычайную опасность представляют аварии и разрушения больших плотин и водохранилищ, т.к. с увеличением высоты плотин и объемов водохранилищ повышается степень риска, которому подвергаются население, хозяйственные и природные объекты в НБ гидроузлов. Также велики, опасность и ущерб для ВБ, связанные с опорожнением водохранилищ.

Наиболее распространенное определение термина «риск» – это количественная мера опасности. В соответствии с этим риск включает в себя три составляющих – вероятность возникновения неблагоприятного события, возможный ущерб, нанесенный этим событием, и произведение вероятности этого события и размеров ожидаемого ущерба. В гидроэнергетике риск определяется как вероятностная мера опасности, установленная для конкретного гидроузла (ГЭС) в виде возможных потерь за срок его службы.

Для оценки безопасности ГЭС применяется стоимость риска: произведение двух величин – вероятности аварии ГЭС и ущербов от нее. Нормативные документы допускают применение вероятностных оценок (безопасности (надежности) при обосновании проекта его оптимизации. Применяют и детерминистические оценки безопасности ГЭС, учитывающие влияние не столько количественных, сколько качественных факторов (*глава 3*).

Риск аварий или разрушений различных ГЭС может быть локальным, региональным, национальным и глобальным.

Риск аварий крупных ГЭС (высоких плотин) можно отнести к национальным, так как последствия разрушения таких ГЭС могут затрагивать население, природные и хозяйственные объекты не только больших регионов, где эти ГЭС находятся, но и территории соседних регионов и стран.

Управление риском – это заблаговременное его предвидение, выявление влияющих факторов, разработка и принятие мер по его снижению до приемлемого уровня, т.е. осуществление превентивных мер. Иначе говоря, снижение риска аварий и катастроф предполагает три этапа действий – прогноз и предупреждение, реагирование и ликвидация последствий.

Анализ последней статистики СИГБ (2001 г.) аварий и повреждений плотин, даже построенных современными методами, свидетельствует о невозможности достижения их абсолютной безопасности. Вероятность аварий порядка 0,0001–0,00001 допускают современные, в том числе российские нормы, т.е. риск аварий ГЭС существует всегда и определенный уро-

вень риска заложен в нормы их безопасности (*глава 3*). Важно знать, какой уровень риска или безопасности допустим и обеспечивает достижение максимальной выгоды при минимальной опасности.

Нормирование безопасности ГТС осуществляется двумя путями. Первый предусматривает разделение ГТС (плотин) в зависимости от их капитальности на классы. Каждому классу соответствуют определенные требования по безопасности, которые обеспечиваются регламентацией нагрузок и воздействий на ГТС и системой нормативных коэффициентов (по нагрузкам, материалам и грунтам, условиям работы и т.д.). Это путь установления нормативной технической безопасности ГТС (плотин), т.е. отнесение ГТС к тому или иному классу гарантирует требуемый уровень безопасности.

Второй путь – регламентация риска как вероятности разрушения или аварии ГТС. Нормативное значение риска может устанавливаться в целом для отрасли. Например,  $10^{-7}$  (т.е. 0,0000001) аварий на один ядерный реактор в год в атомной энергетике,  $10^{-9}$  аварий на один час полета в авиации и т.д. В гидротехнике значения нормативного риска в целом согласуются со статистическими данными аварий ГТС (плотин), т.е. приведенные выше  $10^{-3} - 10^{-5}$  аварий в год в зависимости от типа ГТС и других факторов.

Число аварий плотин (в основном земляных) в мире за последние 10–20 лет имеет тенденцию роста наряду с ростом крупных техногенных аварий на других объектах. На рис. 1.1 приведены кривые социального риска, характеризующие частоту и количество связанных с разными техногенными авариями человеческих потерь. Из рис. 1.1 видно, что при разного рода катастрофах (в авиации, при пожарах, выбросах хлора, авариях реакторов АЭС), исключая дорожные происшествия (ДП), чаще всего чрезвычайные ситуации возникают в авиации, реже – при пожарах, третье место по частоте событий с летальными случаями занимают прорывы плотин, затем выбросы хлора и аварии на 100 реакторах АЭС. Наибольшее число летальных исходов – при прорыве плотин и выбросах хлора, затем при пожарах,

в авиационных катастрофах и авариях АЭС.

В России и бывшем СССР не было случаев разрушения крупных плотин, но аварийные ситуации возникали неоднократно, особенно на дамбах хвостохранилищ предприятий горно-металлургической промышленности.

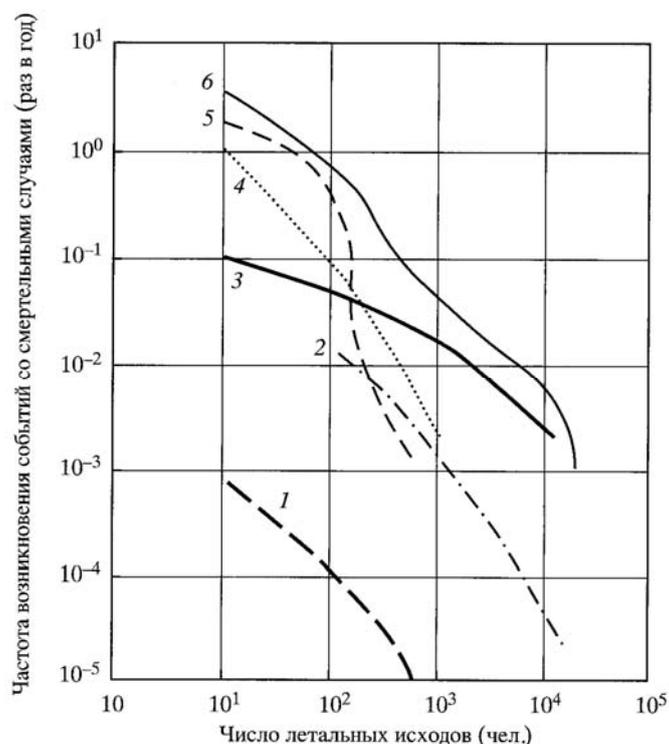


Рис. 1.1. Кривые социального риска при различных катастрофах в мире: 1 – 100 реакторов АЭС; 2 – выбросы хлора; 3 – прорывы плотин; 4 – пожары; 5 – аварии в авиации; б – интегральная кривая техногенных катастроф (без ДП)

В бывшем СССР известен прорыв в Таджикистане в 1987 г. Саргазонского хвостохранилища объемом 2,7 млн. м<sup>3</sup> и высотой плотины 23 м, вызвавший гибель 32 человек и нанесший большой материальный ущерб. Но в основном небольшие плотины разрушались на малых реках, поскольку они часто сооружались без требуемого обоснования данными гидрологических наблюдений и водосбросные сооружения часто были неспособны пропустить максимальные расходы. В последние годы произошли аварии на небольших плотинах водохозяйственного назначения в Башкортостане, Свердловской, Калужской и Волгоградской областях, Калмыкии, на плотинах малых ГЭС в Ленинградской области, на Алтае и других регионах.

Крупные гидроузлы в бывшем СССР создавались согласно четким нор-

мам (СНиП), отличавшимся высокими требованиями к расчетам максимальных расходов паводков различной обеспеченности и другим разделам проектов. В России сейчас состояние многих крупных плотин и ГЭС не удовлетворяет возросшим требованиям безопасной эксплуатации (глава 2).

Наряду с известными причинами, увеличивающими риск аварии плотин, существует ряд факторов, характерных в большей степени сейчас для России и стран СНГ и относящихся к разряду социально-политических и экономических. К этим факторам относятся превышение нормативных сроков эксплуатации целого ряда плотин и ГЭС, нарушение работы отдельных узлов и отсутствие профилактических ремонтов в связи с финансовыми трудностями, эксплуатация ГЭС в нерасчетных режимах и др.

Вероятность разрушения плотин в России выросла в период перестройки экономики, ликвидации некоторых органов управления водным хозяйством и в связи с отсутствием «хозяина» у некоторых водохранилищ и ГЭС.

В 2006 г. почти все ГЭС и ГЭС перешли в подчинение единой Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и ее Научно-техническому центру (НТЦ) «Энергобезопасность ГЭС». Небольшая часть ГЭС принадлежит частному сектору – некоторым предприятиям. Но большое число малых ГЭС, в основном в сельской местности и Министерстве природных ресурсов (МПР), стали бесхозными и перешли в управление местных органов власти, которые, как правило, не имеют достаточных средств для их требуемого обслуживания.

Бесхозные малые и средние водохранилища представляют серьезную опасность, т.к. велика угроза прорыва их плотин при интенсивном снеготаянии и продолжительных летне-осенних осадках. Незапланированный и несогласованный с общими мероприятиями в период половодий и паводков спуск этих водохранилищ может усугубить последствия наводнений.

Многие малые мелиоративные водохранилища Минсельхоза России находятся в плохом состоянии. По данным МЧС РФ (2002 г.) эти водохра-

нилища расположены в основном в Ульяновской, Волгоградской и Ростовской областях и Краснодарском, Красноярском и Приморском краях.

Безопасность гидроузлов, особенно малых, снижается также в связи с отсутствием у большинства собственников проектной документации, что мешает оценить состояние и безопасность ГТС, установить соответствие обеспеченности расчетных расходов водосбросов классу сооружений.

Особое беспокойство вызывают возможные аварии гидроузлов комплексного назначения, где шлюзы, дамбы обвалования, различные водозаборы принадлежат разным собственникам. Контроль за этими ГТС находится на низком уровне, что может привести к их аварии, прекращению работы ГЭС или снижению выработки энергии. Такие последствия отмечались в 1999 г. на шлюзах Волжско-Камского каскада, на Павловской, Цимлянской, Новосибирской, Волховской, Свирских ГЭС, дамбах обвалования и насосных станциях Чебоксарской ГЭС. Но самое плохое состояние дамб золошлаковых отвалов ТЭС. Низкое качество строительства, слабый контроль, плохое их обслуживание и др. создают высокий риск их аварий.

Угрожает безопасности ГТС, плотин и ГЭС их старение. Большинство из них эксплуатируется более 30-40 лет. Согласно данным СИГБ после 40–50 лет срока службы вследствие старения плотин заметно возрастает вероятность их аварий и повреждений. Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с введением в 1997 г. в действие Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» [1].

Сейчас 12 ГЭС России уже перешли рубеж 50-летней эксплуатации, а 20 ГЭС перейдут его к 2010 г. Эти 32 ГЭС имеют общую установленную мощность 94 млн. кВт и годовую выработку 40 млрд. кВт-ч, что составляет треть общего числа ГЭС, более 20% их мощности и более 25% общей выработки энергии. Эти обстоятельства требуют особенно тщательной проверки безопасности плотин и принятия необходимых мер.

Еще в 1994 г. было установлено, что у 60% ГЭС мощностью более 30

МВт гидросиловое оборудование выработало нормативный срок службы. Анализ разрушения камер рабочих колес, например, на Волжской, Угличской и Колымской ГЭС, показал, что оборудование этих ГЭС выработало не только нормативный срок службы, но и свой полный ресурс, т.к. аварии были вызваны усталостными явлениями в стали. Не менее изношено было механическое оборудование, особенно грузоподъемное на ряде ГЭС Волжского каскада. Однако финансовые трудности не позволили тогда произвести реконструкцию гидроузлов и ее заменили восстановительными ремонтами, продлевающими срок их службы всего на 10–15 лет, а не на 25–30, как требуется. Сейчас положение выправляется и начаты работы по реконструкции и модернизации старых ГЭС Волжско-Камского каскада.

Помимо возраста ГТС, на снижение их безопасности влияет несоответствие старых ГТС введенному в 2003 г. СНиП «Основные положения проектирования ГТС». Согласно этому СНиП во многих построенных гидроузлах и ГЭС, включая крупнейшую Саяно-Шушенскую ГЭС (6400 МВт), построенную в 1978 г., и достраиваемую сейчас в России крупнейшую Богучанскую ГЭС (3000 МВт) на р. Ангаре, занижены максимальные расчетные сбросные расходы, принятые 30–70 лет назад на основе коротких гидрологических рядов наблюдений, что обусловило неправильный выбор модели расчетного гидрографа и других гидрологических характеристик. Новые гидрологические данные, накопившиеся за время эксплуатации ГЭС, позволяют откорректировать значения максимальных расходов, в подавляющем числе случаев, в сторону их увеличения, что требует увеличения пропускной способности имеющихся водосбросов.

Результаты таких проверок показали, что 22 ГЭС имеют ограничения пропускной способности водосбросов, в том числе Саяно-Шушенская, Богучанская, Вилюйская, Усть-Хантайская, Саратовская, Майнская, Ириклинская, Миатлинская и Гергебильская ГЭС.

Повышение безопасности ГТС невозможно без изучения причин, при-

водящих к повреждению, аварии или разрушению ГТС.

В табл. 1.2 перечислены стихийные и антропогенные факторы, способные вызвать разрушения ГТС, основные виды их аварий, сопутствующие процессы, усиливающие или ослабляющие катастрофы, меры по предупреждению, предотвращению и устранению последствий аварий. Большинство из эти природных факторов риска вызывается климатическими процессами, проявляющимися в виде опасных природных явлений (ураганов, ливней, землетрясений и др.) и нынешнего цикла потепления климата.

Многие стихийные факторы связаны со сложными трудно прогнозируемыми геофизическими и атмосферными процессами. Поэтому перечисленные в табл. 1.2 эти процессы неопределённы по времени, неоднородны по последствиям и трудно предсказуемы. Но общими для них являются значительный размах по территории, сильное влияние на человека, окружающую природную среду и хозяйственные объекты, в том числе ГТС.

Общим является тенденция роста повторяемости и ущерба при всех видах стихийных бедствий (СБ) в связи с ростом численности и плотности населения и объектов повышенного риска, освоением регионов, наиболее часто подвергающихся СБ, и с хозяйственной деятельностью людей в труднодоступных районах, где сила и частота СБ выше, чем в освоенных.

Большую роль в профилактике аварий разных хозяйственных объектов, в том числе гидроузлов, играет прогноз опасных явлений, силы, характера и зоны распространения СБ и связанных с ними аварий.

Во всех случаях предпринимаемые меры должны включать три последовательных этапа – предупредительный, защитно-профилактический и необходимые мероприятия после катастроф, направленные на спасение людей и устранение последствий чрезвычайных ситуаций.

Наиболее опасные природные процессы и антропогенные факторы, угрожающие безопасности ГТС (факторы риска), а также последствия аварий ГТС (плотин) и меры их предупреждения сформулированы в табл. 1.2.

## Факторы риска, последствия разрушения ГТС и меры предупреждения

Факторы риска опасные явления	<p><b>Стихийные:</b> экстремальный сток, ледовые явления, нагоны, опасные метеорологические явления (бури, ураганы, ливни, снегопады, смерчи и т.д.), долговременные изменения климата, землетрясения, цунами, оползни, обвалы, снежные лавины и сели, подвижки ледников, вулканическое извержение.</p> <p><b>Антропогенные:</b> ошибки проектирования, несоблюдение строительных норм и правил эксплуатации ГТС, непрофессионализм, некомпетентность обслуживающего персонала, военные действия, террористические акты.</p>
Вид аварий	<p>Сверхнормативный сброс воды. Перелив через гребень плотины. Повреждение или размыв тела плотины и береговых сооружений. Нарушение фильтрационной прочности различных частей гидроузла. Нарушение устойчивости или чрезмерные перемещения сооружений. Неисправность, повреждение технологического оборудования.</p>
Последствия	<p>Формирование волн прорыва, затопление и подтопление местности в НБ. Опорожнение водохранилищ. Вытеснение воды из водохранилищ при оползнях и обвалах, заполнение их наносами. Потери на фильтрацию через тело плотины.</p>
Сопутствующие	<p>Активизация экзогенных процессов: интенсивная эрозия процессы в НБ и ВБ, обрушение берегов, деформация русел и пойм. Активизация и возникновение "местных" очагов сейсмической активности. Залповое поступление загрязняющих веществ и наносов из водохранилища, машинного зала, разрушенных волной прорыва складов, хранилищ токсичных веществ. Формирование застойных зон в мелководных зонах долин, возникновение экстремальных бактериологических ситуаций.</p>
Явления, усиливающие (ослабляющие) катастрофы	<p>Число факторов, интенсивность их проявления. Экологическое состояние региона. Тяжелые погодные и климатические условия. Уклон местности, ширина, геоморфологическое строение долины реки. Время прихода гребня волны прорыва (сезон года, время суток). Плотность населения. Степень хозяйственной освоенности района, наличие опасных технологических процессов, хранилищ токсичных веществ. Недооценка последствий стихийных бедствий, техногенных катастроф. Несовершенство системы обеспечения безопасности. Заблаговременность оповещения населения. Подготовленность населения, государственных служб и общественности к возможным катастрофам.</p>
Меры по предотвращению и ликвидации последствий катастроф	<p>Научные исследования, направленные на решение прикладных задач. Повышение профессионального уровня, подготовка специалистов в области стихийных бедствий и техногенных катастроф. Организация служб мониторинга за состоянием гидроузлов и ГТС. Прогноз факторов риска и возможных последствий аварий. Соблюдение норм безопасности, корректировка решений на всех этапах создания и эксплуатации гидроузлов. Усиление охраны ГТС. Разработка мер по предупреждению и оповещению населения, по защите населения, природных и хозяйственных объектов от катастроф. Обучение населения поведению и действиям при катастрофах. Разработка сценариев реагирования во время и после катастроф. Оказание помощи жертвам катастроф. Ликвидация последствий (возмещение материального ущерба, восстановление разрушений и т.д.).</p>

## 1.2. Виды и последствия наводнений\*

По данным ООН за 1963–1992 гг. наибольшее количество стихийных бедствий (СБ), вызывающих гибель 100 человек и более, связано с наводнениями (202 случая), тропическими штормами (153 случая), эпидемиями (133) и землетрясениями (102). В России за это время погибло от СБ около 3 тыс. человек, пострадало 540 тыс., из них – 30% от наводнений. Нет отраслей хозяйства, на которые не оказали бы влияния наводнения.

Прямой ущерб от наводнений зависит от высоты и скорости подъема уровней воды, продолжительности их стояния, времени года, степени освоенности и экономического развития территории, плотности населения, от своевременности прогноза и принятия предупредительных мер, от эффективности защитных противопаводковых ГТС включая дамбы.

Главным фактором постоянного роста ущерба от наводнений является в основном заселение паводкоопасных территорий и расширение на них хозяйственной деятельности. По разным оценкам на этих территориях площадью около 3 млн. км<sup>2</sup> проживает примерно 1млрд. человек.

В США недавнее катастрофическое затопление г. Нью-Орлеана было вызвано не столько прорывами морских волн от урагана Катрина в прибрежную полосу города, сколько размывами длинной противопаводковой земляной дамбы, защищающей город с противоположной стороны от крупного водохранилища. Высокие ветровые волны с этой стороны привели к переливу воды через защитную дамбу, которая оказалась совершенно не подготовленной к этому воздействию, хотя в 1962 году более слабый ураган уже вызывал повреждения и частичные размывы этой дамбы.

---

\* Данные по гидрологическим и другим условиям образования наводнений и связанным с ними чрезвычайным ситуациям, взяты из материалов ряда организаций, в том числе МЧС (обзорные сборники «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях»), изданий Минтопэнерго, РАО «ЕЭС России», ОАО «Институт Гидропроект», «НИИЭС» (журналы, научно-технический сборник БЭС, информационные обзоры и др.), монографии Малик Л.К. [2], трудов СИГБ [3–5], Интернета и архива автора.

Особенно сильные наводнения и ущербы наблюдаются в Китае, чему способствуют муссонный климат и плоский равнинный рельеф, большие реки в низовьях протекают по ложу, приподнятому над освоенной поймой, например, р. Хуанхе – на 12-15 м, подъемы уровней воды достигают 30 м.

В Западной Европе при катастрофических ливневых наводнениях затопливается около 4% территории. Самые катастрофические последствия имело наводнение летом 2002 г., когда погибло более 100 человек, а общий ущерб составил более 20 млрд. евро. Наводнения с большими потерями и человеческими жертвами охватили не только Центральную, но и Восточную Европу и целый ряд регионов Юго-Восточной Азии (Китай, Индию, Таиланд). В Китае и Индии число жертв превысило 1000 человек.

В России общая площадь земель, подвергающаяся затоплениям при наводнениях, составляет более 800 тыс. км<sup>2</sup> (около 5% территории страны). Угроза существует более чем для 40 крупных городов и нескольких тысяч других населенных пунктов. По данным МЧС РФ (2003 г.), ежегодно со стопроцентной вероятностью в России затопливаются около 50 тыс. км<sup>2</sup>. При этом среднестатистическая величина ущерба от наводнений по стране составляет в среднем около 100 млрд. руб. в год. В последние 9 лет особенно частые наводнения наблюдались в Архангельской, Оренбургской, Курганской, Екатеринбургской, Тюменской и Иркутской областях, Красноярском крае, республиках Башкортостан, Якутия–Саха и других.

Катастрофическим наводнениям летом 2002 г. подверглись Краснодарский и Ставропольский края, Дагестан, Ингушетия, Чечня, Северная Осетия. В Ставропольском крае за сутки выпало три месячные нормы осадков. Общее число погибших, по подсчетам МЧС, составило по Южному Федеральному округу 114 человек, материальный ущерб оценен в 15 млрд. руб.

Наиболее распространенным типом наводнений в России являются наводнения, вызванные интенсивным таянием снега и подъемами уровней воды на равнинных реках. Они приобретают катастрофический характер,

если сочетаются с весенними дождями и обильным предзимним увлажнением почвы. Одна из причин подобных наводнений, наряду с гидрометеорологическими факторами (высокие зимние осадки и раннее снеготаяние), бесконтрольное массовое сооружение небольших прудов и плотин.

Часты наводнения, вызванные затяжными дождями и интенсивными ливнями. Угрозе таких наводнений обычно подвержены обширные территории Дальнего Востока, юг Восточной Сибири до Читинской области, куда проникают тихоокеанские муссоны, Северный Кавказ и Закавказье.

Зажорные и заторные наводнения характерны для предгорных и равнинных участков рек. Зажорные подъемы уровней воды в реках, вызванные скоплениями шуги и внутриводного льда, несмотря на зимнее маловодье, могут превышать уровни весенне-летнего половодья, способствовать образованию в районах с суровым климатом сезонных речных наледей.

На реках, текущих на север в европейской части России, особенно на реках Сибири, крупные наводнения формируются в весенний период из-за заторов льда при вскрытии рек с верховьев. Наибольшая интенсивность, повторяемость и распространение заторных наводнений, сопровождающихся катастрофическими последствиями, наблюдается в бассейне р. Лены – от верховьев до дельты и на ее притоках. Длина заторов на р. Лене, может достигать 50–100 км, подъемы уровней – более 10 м. Самые высокие для России заторные уровни зафиксированы на р. Нижней Тунгуске в сужении русла, где они поднимались над меженью на высоту 35–40 м.

Следует отметить, что в Сибири наводнения охватывают слабо заселенные территории, где, однако, до 90% жителей и 75% сельскохозяйственных земель сосредоточены в долинах рек, подвергающихся наводнениям.

Наводнения, приобретающие характер селей, – частое стихийное явление на Северном Кавказе, связанное с ливневыми осадками. До 90% селевых наводнений в Дагестане – результат ливневых дождей с суточным максимумом 50–100 мм. Формированию селей способствуют и антропо-

генные факторы. Например, селевой паводок, сформировавшийся в июле 1958 г. в бассейне р. Садон (Северная Осетия) в результате ливневых дождей, смывших отвалы горнодобывающего предприятия.

Анализ причин наводнений весной 1998 г. в юго-западных районах России показал, что они были вызваны не только природными факторами – интенсивным ростом в феврале-марте температур воздуха, дождями, быстрым снеготаянием, резким подъемом уровней воды в реках. В значительной степени опасная паводочная ситуация была связана с бесконтрольным возведением плотин на реках с целью создания запасов воды для летнего засушливого периода и как следствие – невозможностью пропуска воды в период половодья, а также с высоким уровнем стояния грунтовых вод. В результате при дождливой весне грунтовые воды вышли на поверхность и подтопили большие территории – в Ростовской области 7675 домов (часть из них разрушена) и 95 тыс. га сельскохозяйственных земель. Чрезвычайной паводочной ситуации способствовал резкий рост неконтролируемого сброса воды из водохранилищ, в том числе с территории Украины.

Высокие паводки в августе 1998 г. на р. Амуре и реках Забайкалья имели серьезные последствия. Опасные гидроэкологические ситуации на реках Дальнего Востока и Хабаровского края, связанные с ливневыми дождями, наблюдались в мае 2000 г. в долине р. Биры (Еврейская автономная область), когда уровни воды были близки к категории особо опасных.

Большой ущерб экономике Приморского края нанесли дожди и наводнение конца июля 2002 г. Уже в первые дни было подтоплено 520 домов и 13 тыс. га сельскохозяйственных земель, без электроэнергии осталось 15 населенных пунктов. Одной из причин быстрого роста уровней являлись также сбросы воды из переполненных водохранилищ в Китае. Однако предупреждения об открытии водосбросов с китайской стороны не поступало.

В связи с обильными ливневыми осадками в октябре 2000 г. создалась экстремальная гидрологическая ситуация в Забайкалье, где на реках Ки-

ренга, Калар, Олекма, Чара, Витим и других сформировались дождевые паводки с высотой подъема уровней в 3–9 м и затоплением пойм до глубины более 4 м. Были разрушены мосты, подтоплены дома и дороги.

Высокие летние паводки во время ливневых дождей были характерны в 1998 г. для западных районов страны. На р. Волхове, например, в июле они обеспечили приток воды к Волховской ГЭС, в 6 раз превысивший норму. На Северном Кавказе экстремальные гидрологические ситуации из-за выпадения летних осадков наблюдались часто. В июле 2000 г. жаркая погода и ливневые дожди привели к бурному таянию льда в горах, высоким уровням р. Баксан и образованию пяти мощных селевых потоков в Тырнаузе.

### **1.3. Способы защиты от наводнений**

Одними из видов борьбы с наводнениями являются защитные дамбы. На территории бывшего СССР было создано более 200 систем обвалования общей протяженностью более 12 тыс. км, защищающих свыше 9 млн. га сельскохозяйственных земель. Обвалованы поймы рек Терека, Кубани, Куры, от амурских паводков защищены дамбами города Хабаровск, Благовещенск и Комсомольск-на-Амуре. Обвалования используют для защиты других городов, промышленных и сельскохозяйственных объектов.

Дамбы снижают иногда пропускную способность русел, способствуют образованию «пробок» из льда или приносимого водой материала, их высота бывает недостаточной для предотвращения от затоплений паводкоопасных территорий. Дамбы в районе г. Ленска были разрушены в период катастрофического половодья 2001 г., построены заново, но их высота оказалась недостаточной в половодье 2002 г. Кроме того, дамбы создают иллюзию у населения о полной безопасности, способствуют застройке обвалованных, но паводкоопасных территорий, что значительно увеличивает ущерб от катастрофических наводнений редкой повторяемости, натиска которых не выдерживают защитные сооружения.

Производятся также берегоукрепительные и русловыпрямительные ра-

боты, расчистка русла, отводы воды, регулирование стока малых рек, осуществляются лесомелиоративные и агротехнические мероприятия на водосборах. Все эти меры направлены на перевод поверхностного стока в грунтовой и рост подземной составляющей. Защитные дамбы и перечисленные мероприятия не решают полностью задачу борьбы с наводнениями.

Наиболее эффективным способом борьбы с высокими половодьями и паводками является перераспределение стока водохранилищами, возможности регулирования водных ресурсов определяются в основном отношением полезного объема к среднему годовому стоку реки.

Водохранилища для борьбы с наводнениями (обычно комплексного назначения) используются во всех странах мира, что позволяет на территориях ниже плотин полностью или частично избежать чрезвычайных ситуаций и бедствий, связанных с наводнениями, и значительно снизить затраты на строительство хозяйственных объектов.

Стоит напомнить о прохождении на р. Волге до зарегулирования стока катастрофических наводнений с громадными ущербами и людскими потерями. Таким было, в частности, наводнение в 1926 г., когда затопило 150 тыс. км<sup>2</sup> территории, а окончательное число жертв до сих пор неизвестно.

Водохранилища на Волге помогли снизить ущерб от наводнений 1994 г., оцениваемый более чем в 2 трлн. рублей. В 1979 г. благодаря Рыбинскому водохранилищу, пропускающему высокий паводок по каскаду Волжских водохранилищ, сброс в НБ Волжского гидроузла был снижен на 2000 м<sup>3</sup>/с, что сильно уменьшило ущерб на Средней и Нижней Волге.

Водохранилище на р. Зее спасает долину реки от наиболее разрушительных наводнений (например, в 2007 г.). Паводки, которые до строительства гидроузла повторялись каждые 2–4 года, сейчас наблюдаются лишь 1 раз в 10–100 лет. Дальнейшее снижение паводковой опасности на Дальнем Востоке планируется путем строительства водохранилищ в бассейне р. Амура.

#### **1.4. Опасность наводнений при прорыве плотин**

Спасая обширные территории от наводнений, гидроузлы сами могут стать источником катастрофических затоплений в НБ в случае аварии плотин и образования волны прорыва. По мировой статистике аварий плотин (СИГБ), самым частым видом аварий плотин, особенно земляных, является перелив воды через гребень плотины при пропуске паводковых расходов выше расчетных и недостаточной пропускной способности водосбросов.

В истории мирового плотиностроения есть много примеров разрушения плотин при пропуске паводков крайне редкой, неучтенной в проекте обеспеченности. Как уже упоминалось, в нашей стране не было разрушения крупных плотин благодаря высоким требованиям действующих норм по назначению расчетных максимальных расходов воды. Но небольшие плотины на малых реках разрушались вследствие превышения сбрасываемых паводковых расходов их проектных значений из-за неполноты гидрологических наблюдений в створе гидроузла. В последние годы произошли катастрофы на небольших водохозяйственных гидроузлах (Тирлянском, Кисилевском, Людиновском, Серовском и др.). В Калмыкии, например, в многоводном 1994 г. в паводок было разрушено 40 земляных плотин.

Особенно опасны наводнения, связанные зимними попусками из водохранилищ, формирующими подвижки льда и ледоход в НБ, сопровождающиеся подтоплением прибрежных участков. Зимой 1956–1957 гг. из Камского водохранилища были вдвое против нормативных увеличены попуски, вызвавшие ледоход на протяжении 60 км в НБ и затем образование затора. В районе г. Краснокамска лед был поднят и перемещен сплошным полем, наводнением был причинен большой ущерб.

Можно также вспомнить наводнение в июле 1988 г. в НБ Красноярской ГЭС, вызванным мощным циклоном и ливневыми осадками большой интенсивности и продолжительности, когда в июле количество осадков составило 110–230% нормы. Продолжавшиеся дожди способствовали интен-

сивному таянию горных снегов в верховьях р. Енисея. Резко поднялся уровень воды в р. Енисей и Красноярском водохранилище, и критическое положение при его переполнении заставило открыть пять из семи затворов водопропускных сооружений. Размеры сброса достигли 12 тыс. м<sup>3</sup>, около 3 тыс. м<sup>3</sup>/с сбрасывала недостроенная Саяно-Шушенская ГЭС. Уровень воды в НБ Красноярской ГЭС быстро поднялся на 4 м, что вызвало катастрофическое наводнение с большим материальным ущербом.

Пример этого и других наводнений еще раз свидетельствует о необходимости соблюдения главного правила – в НБ гидроузлов и на территориях, подвергающихся периодическим затоплениям паводочными водами, не должно быть незащищенных хозяйственных объектов и жилых построек, не должно быть объектов, стесняющих поток воды. Но нарастает тенденция роста застройки и заселенности НБ и паводкоопасных территорий, вопреки печальному опыту и предупреждению гидротехников. По данным Роскомвода, при прорыве плотин в г. Пензе в зоне затопления может оказаться 75 тыс. человек, в г. Челябинске – 170 тыс., а в случае прорыва плотин Волжского каскада - несколько миллионов человек.

По данным МЧС (1998 г.) во всем Приволжском регионе (от г. Воркуты до г. Астрахани), включающем большую часть бассейна р. Волги, в случае прорыва плотин будут затоплены территории площадью 8 тыс. км<sup>2</sup>, на которых проживает до 1,5 млн. человек.

Сейчас оперативный прогноз паводочной опасности осуществляет МЧС России, объединяющей более 30 организаций (головная – ВНИИ ГОЧС). Центр мониторинга располагает базой данных по опасным уровням, с которыми сравниваются наблюдаемые и прогнозные уровни конкретных водных объектов. Обстановка отслеживается с помощью средств космического и авиационного наблюдений. По данным космических снимков оценивается прямой ущерб от наводнений по методике, разработанной в МЧС.

## **Глава 2. Гидрологическая безопасность гидросооружений (ГТС)**

### **2.1. Понятие гидрологически опасных объектов**

Около 45 тыс. больших (высотой более 15 м) плотин, эксплуатирующихся сейчас в мире, из которых 43 тыс. возведены в XX веке, в том числе 37,4 тыс. с 1950 г., являются лучшей характеристикой плотиностроения в обеспечении устойчивого развития цивилизации за 5000 лет. Более 8000 км<sup>3</sup> речного стока, зарегулированного с их помощью, используется для орошения 270 млн. га земель, выработки почти 2460 млрд. кВт·ч (18,5% всей потребляемой в мире) электроэнергии, защиты от паводков, обеспечения потребности в технической и питьевой воде, создания зон отдыха и возможности судоходства на ранее недоступных участках рек.

Вместе с тем, наличие водохранилищных плотин, наряду с выгодами, влечет за собой создание различного рода рисков, вероятностных по своей природе, из которых наиболее известными по негативным последствиям являются социальные, материальные (экономические), конструктивные (гидрологические, геодинамические, технические), экологические и др. В широком смысле здесь понимается неспособность гидроузла обеспечить оптимальную выгоду в течение заданного периода времени.

Анализ катастрофических разрушений ряда плотин, их последствий, изучение причин и закономерностей различных рисков, их учет и регулирование имеют большое практическое значение. Обеспечение безопасности (надежности) – главное условие возведения плотин, являющихся гидрологически опасными объектами.

*Гидрологически опасный объект (ГОО)* – сооружение или природное образование, создающее разницу уровней воды до и после него. К ним относят напорные гидросооружения и природные образования (различные завалы, запруды), препятствующие свободному течению воды. Особенностью разрушения таких препятствий является образование волны прорыва.

Особенно опасно разрушение больших плотин, когда вода с большой вы-

соты и скоростью устремляется в нижний бьеф (НБ), сметая все на своем пути. Здесь действуют два фактора: волна прорыва и зона затопления, каждый из них имеет свои особенности и для людей представляет опасность.

## **2.2 Аварии на гидрологически опасных ГТС и возникновение наводнений**

*Гидрологическая авария (ГЛА)* – это чрезвычайное событие, связанное с разрушением ГТС (плотины) или его части и неуправляемым перемещением больших масс воды, что приводит к значительным разрушениям и затоплению больших территорий.

Разрушение (прорыв) плотин происходит в результате воздействия природных сил (катастрофических паводков, землетрясений, оползней в ВБ), вследствие конструктивных дефектов и грубых ошибок в проекте (например, недостаточной пропускной способности водосбросов), нарушений правил эксплуатации плотин и действий человека (диверсий, подрывов).

Прорыв плотины является начальной фазой ГЛА и представляет процесс образования прорана и неуправляемого потока воды от ВБ к НБ.

*Проран* – узкий проход (промоина) в теле (насыпи) плотины, через который выходит вода и образует *волну прорыва*. Волна прорыва образует *фронт волны и гребень*. При прорыве в плотине образуется проран, от размеров которого зависят объем, скорость падения воды и параметры волны прорыва – главного поражающего фактора аварии. Волна прорыва образуется при одновременном наложении двух процессов: падения воды с ВБ в НБ, порождающего волну, и резкого роста объема воды в месте падения, что вызывает быстрый подъем уровня воды и растекание ее в пониженные места. Действие волны прорыва на объекты подобно ударной волне воздушного атомного взрыва, но отличается от него в первую очередь тем, что главным воздействующим фактором здесь является вода.

Прорыв плотины приводит к резкому подъему уровня воды в НБ и затоплению местности и всего того, что на ней находится (наводнению). По-

этому строить жилые и производственные здания в этой зоне запрещено.

В зависимости от скорости опорожнения водохранилища (ВБ) различают два вида волны: волна попуска – медленное опорожнение ВБ и волна прорыва – быстрое опорожнение. По своей сущности волна прорыва (попуска) представляет собой неустановившееся движение потока воды, при котором глубина, ширина, гидравлический уклон, скорость течения в любом створе изменяются во времени. Поэтому она имеет зоны подъема и зоны спада. Передняя часть движущейся массы воды называется *фронтом волны* прорыва. Она может быть очень крутой (вблизи прорыва) и относительно пологой – на большом удалении от него. Вслед за фронтом волны прорыва высота воды быстро возрастает, достигая через некоторое время максимума (*гребень волны*), превышающего высоту берегов реки, в результате чего начинается затопление прилегающих территорий (наводнение).

После прекращения подъема уровней по всей ширине потока наступает относительно длительный режим движения, близкий к установившемуся (*хвост волны*). Он тем длительнее, чем больше объем водохранилища или ВБ – пока оттуда вся вода не вытечет. Последней фазой образования зоны затопления является спад уровней. После прохождения волны прорыва остается размытая пойма и сильно деформированное (размытое) русло реки.

Разрушительное действие волны прорыва заключается в основном в движении крупных масс воды с большой скоростью и таранного действия всего того, что перемещается вместе с водой (камни, доски, конструкции).

Основными оценочными параметрами волны прорыва являются:

- максимальная в данном створе высота волны  $h$  и глубина потока  $h_{г}$ , равная сумме высоты волны и глубины реки до прохождения по ней волны прорыва  $h_0$  (бытовая глубина);
- скорости движения фронта, гребня и хвоста волны и время добегания  $W_{фр}$ ,  $W_{гр}$ ,  $W_{хв}$  характерных точек волны до разных створов в НБ;
- длительность прохождения волны  $\tau_{зат}$  в выделенных створах, равная

сумме времени подъема и спада в них уровня воды;

- средние  $V$  и поверхностные  $V_{\text{пов}}$  скорости течения в различных створах;
- наибольшая ширина затопления речной долины  $F$ .

Высота и скорость волны прорыва зависят от гидрологических и топографических условий. Высота волны прорыва (глубина потока волны) зависит от размеров прорана  $B$ , высоты плотины  $H_{\text{п}}$ , уклона реки  $i$ , высоты места объекта  $h_m$ . Для равнинных рек  $h=2-10$  м, скорость волны равна 3–25 км/ч. Для горных и предгорных рек скорость достигает 100 км/ч. Лесистые участки замедляют скорость и уменьшают высоту волны. Время прихода фронта волны прорыва  $t_{\text{фр}}$  всегда меньше времени прихода гребня  $t_{\text{гр}}$ .

За последние 70 лет в мире произошло свыше тысячи аварий крупных ГТС (плотин). Анализ аварий ГТС за 70 лет показывает, что основными их причинами являются: разрушение основания и недостаточная пропускная способность водосбросов, то есть перелив воды через гребень плотин. Процентное соотношение основных причин аварий ГТС дано в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Соотношение причин аварий больших плотин

Причины разрушения	Частота, %
Разрушение основания	40
Недостаточность водосброса	23
Слабость конструкции	12
Неравномерная осадка	10
Высокое давление на плотину	5
Военные действия	3
Оползание откосов	2
Дефекты материала	2
Неправильная эксплуатация	2
Землетрясение	1

За период с 1902 по 1977 гг. из 300 аварий в различных странах в 35% случаев причиной было превышение расчетного максимального сбросного расхода, то есть перелив воды через гребень плотины.

Процентное соотношение аварий разных типов плотин дано в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Соотношение аварий плотин различных типов

Тип плотины	Частота аварий, %
Земляная	53
Защитные дамбы из местных материалов	4
Бетонная гравитационная	23
Арочная железобетонная	3
Плотины других типов	17

При прорыве плотин значительные участки местности через 15–30 мин обычно оказываются затопленными слоем воды толщиной 0,5–10 м и более. Время, в течение которого территория может находиться под водой, колеблется от нескольких часов до нескольких суток.

Кроме техногенных факторов, на режим рек и возникновение катастрофического затопления оказывают влияние природные факторы. *Катастрофическое затопление* – гидрологическое бедствие, заключающееся в быстром затоплении местности и возникновении наводнения. Среди других стихийных бедствий в России по повторяемости, площади распространения и материальному ущербу наводнения стоят на первом месте.

Природно-географическими условиями возникновения наводнений являются: выпадение осадков (дождя), таяние снега и льда, цунами, тайфуны.

Наиболее часто наводнения бывают дождевого-речного типа. Другой тип – затопление побережья в результате поднятия уровня воды при шторме (нагоны). Наводнения возникают при обильном таянии снега, в связи с заторами при ледоходе, таянием льда при оттепелях. Причиной наводнения может стать недостаточная пропускная способность водосбросов при грозных ливнях. Выпадающие на большой территории ливневые дожди могут сильно повысить уровень рек, если дожди сопровождаются внедрением теплых масс или воздействием штормового фронта. При этом от разлива реки может быть затоплена вся ее пойма.

При таянии снега вода от снега суммируется с дождевой, что может вызвать наводнение, особенно при внезапной оттепели, ускоряющей таяние снега. Тем не менее, паводки от таяния снега развиваются медленнее, чем дождевые, что позволяет принять упреждающие меры. Положение со снеговыми паводками усугубляется тем, что площадь лесов, являющихся естественным «буфером» водного баланса биосферы, в связи с интенсивными вырубками сильно снижается. При резкой оттепели после холодной зимы лед почти не размягчается и его ломка происходит замедленно. Ледяной слой проламывает вздущаяся река, и большие глыбы льда образуют заторы у мостов и в узких местах русла, что приводит к возникновению запруд. Выше затора происходит разлив, а при преодолении водой затора волна прорыва, распространяясь вдоль реки, вызывает разрушения.

На возникновение наводнений большое влияние оказывают геологические факторы. Поэтому важно располагать данными о геологии бассейна, откуда поступает вода в зону затопления. Эти сведения могут быть взяты из геологических и гидрологических данных, включая аэрофотосъемки.

Прочные изверженные породы, метаморфические и плотные осадочные размываются медленно. При этом ГТС, возведенные на этих породах, редко оказываются подмытыми. Рыхлые отложения, выветренные и химически измененные породы менее устойчивы к воздействию воды, и ГТС, возведенные на таких основаниях, могут терять устойчивость.

Наиболее часто на территории России наводнения представляют собой повышение уровней и расходов воды в реке за счет роста ее притока. В зависимости от времени года, источника притока воды в русло и его интенсивности наводнения подразделяют на весеннее половодье и паводок.

Весеннее половодье сопровождается обычно сильным повышением уровней и расходов воды в реке за счет таяния снега. Воды полностью заполняют меженное русло и заливают пойму. В крупных водохранилищах при постоянно залитой пойме весенний паводок может проходить более

сглажено. Длительность половодья для малых рек составляет несколько дней, для больших рек – 1–3 месяца. Наибольшая высота уровня весеннего паводка зависит от следующих факторов: а) величины запасов воды в снеге в бассейне к началу таяния и характера их распределения в бассейне; б) интенсивности и одновременности весеннего таяния снега по бассейну; в) промерзания почв бассейна перед таянием снега; г) насыщенности водой почв бассейна перед таянием снега; д) количества и интенсивности осадков перед весенним наибольшим подъемом уровня воды в реке.

Подъем уровня воды в реках от дождей достигает наибольших размеров при ливневых осадках. В это время реки обладают большой энергией и несут большую массу воды и наносов. Деформируя дно и берега, они представляют серьезную угрозу наводнений в прилегающих районах и промышленных центрах, расположенных обычно вблизи водных объектов. Большие массы воды грозят разрушением плотин, мостов и других сооружений в береговой зоне, вызывают эрозию незащищенных склонов. Весеннее половодье на ряде водохранилищах уносит до 1 и более метров крутых береговых склонов, сложенных из несвязных грунтов.

Паводковые наводнения обычно скоротечны, возникают внезапно и наносят большой ущерб народному хозяйству. Длительность ливневых паводков доходит до нескольких дней. Особую опасность представляют наводнения от весеннего половодья и одновременно возникшего паводка.

Применительно к наводнениям поверхность любого речного бассейна состоит из множества площадок суши с различными углами наклона к горизонту и отделенными друг от друга микроводоразделами с продольными понижениями разной формы и глубины. Система этих понижений образует гидрографическую сеть, имеющую свой водообмен, зависящий от расположения водного объекта. Гидрографическая сеть собирает воду со склонов и транспортирует ее вниз по уклону к замыкающему створу.

Между площадью водосбора реки  $S$ , км<sup>2</sup> и ее длиной  $L$ , км существует следующее приближенное соотношение:

$$S = e^{1,69 \ln(L)} \quad (2.1)$$

Суммарный сток за половодье обычно выражается в виде равномерного слоя воды  $Y$ , мм на поверхности бассейна:

$$Y = 86,4 \cdot \sum Q_i / S, \quad (2.2)$$

где  $\sum Q_i$  – сумма средних суточных расходов за половодье, м<sup>3</sup>/сут.

Максимальный расход  $M_{max}$ , м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>), половодья выражается в виде

$$M_{max} = Q_{max} / S. \quad (2.3)$$

Приведенные выражения на основе данных по кривой расхода для конкретной реки  $Q_{max}$  позволяют установить возможные уровни половодья или наводнения. Данные для таких расчетов можно найти в литературе [6, 7].

### **2.3. Риск и надежность при строительстве и эксплуатации плотин**

*Социальный риск* во все времена являлся главным критерием оценки надежности – безопасности плотин. Катастрофы являлись своеобразными вехами при пересмотре критериев проектирования и выборе более эффективных способов контроля безопасности плотин, так что использование критерия социального риска в проектной практике давно назрело. Ежегодная частота человеческих жертв при авариях на ГОО имеет постоянный рост, приближающийся к 1000 чел. Однако повышение безопасности плотин ведет к заметному снижению величин этого риска. Если за критерий допустимого социального риска из-за аварии плотин в России принять  $10^{-7}$ , то расчеты показывают, что государственной системой обеспечения безопасности должны быть охвачены не только водохранилища с объемом более 1 млн. м<sup>3</sup>, но и объекты, находящиеся в зоне действия волны прорыва и катастрофического затопления в НБ с населением выше 1500 человек.

Социальный риск определяется как отношение разности погибших людей до и после чрезвычайного происшествия к количеству людей, которые могут быть подвержены данному фактору риска (негативные факторы, воз-

никающие при разрушении ГТС) на 1000 чел. Величина социального риска и все факторы, требующие рассмотрения уже на стадии проектирования, определяются вероятностью разрушения плотины; заселенностью НБ в различные периоды после постройки плотины; наличием системы аварийного оповещения и планов действий в условиях чрезвычайной ситуации.

*Материальный (экономический риск)* является весьма существенной величиной. Иногда убытки от разрушения плотины могут быть на порядок выше затрат на строительство и эксплуатацию плотины.

Социальный и экологический риски, как правило, возникают в результате реализации *технического (конструктивного) риска*, поэтому в первую очередь следует учитывать все факторы, обеспечивающие требуемую надежность ГТС. Под техническим риском понимается свойство ГТС претерпевать отказы при внешних воздействиях и реакции ГТС на них при невыполнении требований техдокументации.

Характерными моделями технического риска являются следующие:

1. *Начальное наполнение ВБ* (примерно 80% от общего числа аварий). При этом основными факторами риска являются: чрезмерная проницаемость и деформационная неоднородность плотины и ее основания, трещинообразование в плотине и ее основании при воздействии напора воды;
2. *Гидродинамический риск* – размыв крепления НБ и его основания;
3. *Сейсмический риск* – реализуется в снижении устойчивости и прочности плотины, ее трещинообразовании, разжижении песчаных элементов плотины и основания и т.п. при высоком сейсмическом воздействии;
4. *Геотехнический риск* – низкие геотехнические (физико-механические) характеристики грунтов плотины и ее основания (плотность, прочность на сдвиг, сжимаемость, водопроницаемость, суффозионность и др.).

Оценка надежности и риска в вероятностной постановке требует рассмотрения одинаковых по реакции на воздействие типов ГТС, одними из которых являются разные типы крупных бетонных плотин, общее количе-

ство которых во всем мире превысило сейчас 7 тыс., а в России – 55. Расчетные и натурные данные показывают, что в настоящее время величина суммарного риска аварий на ГТС в ряде случаев почти на порядок превышает допустимый уровень индивидуального риска  $5 \cdot 10^{-4}$  (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Риск реализованных отказов бетонных плотин на скальном основании

Реакция сооружения	Внешнее воздействие				
	Начальная эксплуатация	Паводки	Землетрясения	Другие	Всего
Чрезмерная проницаемость	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,11 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-5}$	$0,38 \cdot 10^{-5}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$
Деформационная неоднородность	$0,79 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-5}$	$0,57 \cdot 10^{-5}$	$0,38 \cdot 10^{-5}$	$0,92 \cdot 10^{-4}$
Недостаточная прочность на сдвиг	$0,45 \cdot 10^{-4}$	$0,57 \cdot 10^{-5}$	$0,75 \cdot 10^{-5}$	$0,94 \cdot 10^{-5}$	$0,68 \cdot 10^{-4}$
Размываемость в НБ	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	0	$0,19 \cdot 10^{-5}$	$0,58 \cdot 10^{-4}$
Другие	$0,57 \cdot 10^{-5}$	0	$0,19 \cdot 10^{-5}$	0	$0,76 \cdot 10^{-5}$
Всего	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$

Эти данные Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) характеризуют средние риски бетонных плотин в мире, для которых, кроме приведенных факторов, большое значение имеет географическое расположение (страна) плотины, ее возраст. Модель риска для конкретной плотины, кроме этих факторов, определяется нагрузками (особенно, сейсмическими), человеческим фактором (опытом проектировщиков, строителей и работников эксплуатирующей организации) и др. Расчет риска аварий бетонных плотин можно выполнить по программе *CADAM* (Канада) [8].

#### 2.4. Последствия гидрологических аварий плотин и затоплений НБ

Основными последствиями гидрологических аварий (ГЛА) являются:

- а) долговременное разрушение ГТС, что влечет дефицит электроэнергии и спад производства;
- б) гибель людей, разрушение сооружений, зданий, дорог, мостов и других элементов прилегающей инфраструктуры прошедшей волной прорыва;
- в) загрязнение окружающей среды (воды, местно-

сти), возможность возникновения эпидемий; г) катастрофическое затопление больших территорий; д) остаточные последствия затопления (наносы, порча материальных ценностей, загрязнение окружающей среды и др.).

Ущерб от ГЛА определяется по следующим показателям: а) численность населения, объектов народного хозяйства в зоне затопления; б) число погибших, раненых и оставшихся без крова людей; в) площадь затопления; г) общий прямой и косвенный ущерб.

Обстановка в населенных пунктах сильно зависит от его морально-психологического состояния и инженерной обстановки. На это состояние населения влияют степень и сроки его оповещения о предстоящем наводнении, уровень заблаговременной подготовки людей к действиям в период наводнения, частота наводнений, время года и суток, скорость подъема воды и другие факторы. Если наводнение наступает внезапно и заблаговременная подготовка населения не проводилась, то возникает паника, неорганизованное бегство от стихии, которые приводят к заторам и пробкам на путях эвакуации, и, как следствие, к дополнительным жертвам. Усугубляют эту обстановку холодная, ненастная погода и темное время суток.

При заблаговременном оповещении и подготовке населения идет оперативная организованная эвакуация населения и материальных ценностей, принимаются меры по борьбе со стихией, мобилизуются органы управления и спасательные команды с техникой.

В населенных пунктах, подвергающихся относительно частому затоплению, население, как правило, готово к приходу стихии, проводит заблаговременные организационно-технические мероприятия, направленные на защиту от стихии и снижение возможного ущерба. Паника в таких случаях возникает редко, эвакуация населения и спасение материальных ценностей производится планомерно с достаточной эффективностью.

Поражающее действие наводнения выражается в затоплении жилищ, промышленных и хозяйственных объектов, полей с урожаем, разрушении

зданий и сооружений или снижения их капитальности, повреждении и порче оборудования предприятий, разрушении ГТС и коммуникаций.

В перечень основных причин разрушения зданий при затоплениях входит водонасыщение и размыв грунта основания. Водонасыщение приводит к разжижению грунта, потере им прочности. Повреждение газовых и электрических коммуникаций может вызвать взрывы и пожары.

Волна прорыва при движении по руслу реки наносит колоссальный ущерб народному хозяйству. В первую очередь она представляет серьезную опасность для населения в результате внезапного затопления жилых построек и административных зданий. Поэтому вопрос своевременного прогнозирования последствий воздействия волны прорыва и катастрофического затопления чрезвычайно важен.

Эрозионное действие потока зависит от динамики его формирования и спада уровня потока (после прохождения волны прорыва или прекращения ливневых дождей). Эти данные можно прогнозировать на основе физического или математического моделирования.

При физическом моделировании прототип сохраняет физическую природу объекта полностью и часто является его уменьшенной копией. При математическом моделировании прототип полностью заменяется функциональными зависимостями, реализуемыми на ЭВМ. Самым экономичным и эффективным является последний вид моделирования, который быстрыми темпами развивается сейчас. Например, на ЭВМ успешно моделируется динамика формирования пластового потока, стекающего по склону местности и действующего на подстилающие породы. Но повреждения от затоплений средних и крупных зданий определяются не столько энергией водного пластового потока, сколько тем, что вода заливает подвалы и фундаменты домов. Поэтому здесь становится важен режим затопления. Данные прогноза позволяют достаточно достоверно определить глубину (высоту) волны прорыва, ее скорость и продолжительность затопления.

Отдельным вопросом является оценка воздействия волны прорыва на инженерные сооружения, пересекающие русло реки, – мосты и дороги.

Воздействие волны на мостовые переходы может быть следующим:

а) удар движущегося фронта волны; б) длительное гидравлическое давление на элементы моста (опоры, береговые устои и пролетные строения); в) размыв грунта между опорами (общий размыв) и подмыв опор (местный размыв), разрушение регуляционных сооружений и земляных насыпей; г) медленное затопление местности, сооружений и дорог без существенного их разрушения на подходах к мостовому переходу; д) удары больших плывущих предметов по опорам и пролетному строению; е) образование затопов плывущих предметов и образование стеснений потока, что создает дополнительный подпор с верховой стороны моста.

Качественной оценкой при прогнозе последствий волны прорыва на мосты могут стать данные табл. 2.4, из которой видно, что самыми уязвимыми являются сам мост и его защитные элементы. Меньше повреждаются подходы к мостам. Главная причина всех видов разрушений – размыв грунтов.

Таблица 2.4

Статистические данные по разрушению мостов от волн прорыва

Наименование повреждений	Доля, %
<b>Всего по мостам</b>	<b>44</b>
Общий размыв русел из-за недостаточности отверстия (включая пойменные участки, перекрытые эстакадами)	18
Местные размывы опор	24
Подтопление пролетных строений	2
<b>Всего по подходам к мостам</b>	<b>23</b>
Подтопление и перелив через насыпи	10
Размыв основания и откосов насыпи	12
Фильтрация через насыпь и ее оползание	1
<b>Всего по регуляционным сооружениям</b>	<b>33</b>
Местный размыв основания регуляционных сооружений и конусов	23
Перелив через дамбы и траверсы	4
Повреждение регуляционных сооружений продольным течением	3
Фильтрация и оползание тела сооружения	3
<b>Итого</b>	<b>100</b>

Оценку параметров разрушений сооружений и зданий от волны прорыва

можно получить по табл. 1–3, а плотин и дамб – по табл. 4 *Приложения*.

Размер ущерба при затоплениях зависит от исходной капитальности здания (сооружения), которому соответствует определенное значение расчетной обеспеченности  $P$ , %. Расчетная обеспеченность – это вероятность наступления максимальных уровней воды с определенными величинами. Проектирование зданий ведется с учетом значений максимума уровней определенной повторяемости. Поэтому ожидаемая величина ущерба может быть оценена по проектному классу капитальности здания. По капитальности жилые здания подразделяют на шесть классов, общественные – на девять классов, которым соответствуют нормативные сроки службы (долговечность) основных конструкций (лет). Для первых четырех классов долговечность такова:

Класс капитальности:	I	II	III	IV
Жилые здания	150	125	100	–
Общественные здания	175	150	125	100

Различают *прямой и косвенный ущерб* от действия волны прорыва.

К *прямому ущербу* относят: а) повреждения и разрушения жилых, общественных и производственных зданий, железных и автомобильных дорог, линий электропередач и связи, мелиоративных систем; б) гибель скота, урожая сельскохозяйственных культур; в) уничтожение и порчу сырья, топлива, продуктов питания, кормов и удобрений; г) затраты на временную эвакуацию людей и перевозку ценностей в незатопленные места; д) смыв плодородного слоя почвы и замыв ее песком.

К *косвенному ущербу* относят: а) затраты на приобретение и доставку в пострадавшие районы продуктов питания, строительных материалов и т.п.; б) сокращение выработки продукции и замедление темпов развития экономики района; в) ухудшение условий жизни населения; г) невозможность рационального использования земель; д) увеличение амортизационных

расходов по содержанию зданий в нормальном состоянии.

*Подробно методика определения прямого, косвенного и других видов ущерба, включая социальный, по укрупненным единичным показателям при прорыве напорного фронта гидроузла рассмотрена в главе 6 пособия.*

Материальный ущерб от наводнений в городе связан, в основном, с площадью, глубиной и, отчасти, длительностью затопления. Для сельского хозяйства главное значение имеют время (сезон) и длительность затопления.

При катастрофических затоплениях, когда водой заливаются огромная территория (тысячи км<sup>2</sup>) с расположенными на ней населенными пунктами, распределение составляющих ущерба может выглядеть следующей:

промышленность	17 %;
транспорт и связь	9 %;
сельское хозяйство	60 %;
другие отрасли	14 %.

Прямой и косвенный ущерб находятся в соотношении 70/30%.

В табл. 5 *Приложения* указаны возможные изменения количества поврежденных объектов (%) в городах на затопленных территориях при длительности воздействия воды от 1 часа до 2-х суток. Данные приведены для скорости потока  $V=3-4$  м/с. Для экстраполяции процента разрушений при других скоростях потока можно использовать переводной коэффициент:

$$K_c = 0,27 \cdot V + 0,07 \quad (2.4)$$

при условии, что произведение  $K_c$  и процента разрушений не выше 100%.

Возможные размеры зон поражения и объемы ущерба при затоплении волной прорыва в зависимости от высоты подъема и длительности стояния воды для малых и больших рек даны в табл. 6 и 7 *Приложения*. Объем ущерба фиксируется по снижению класса капитальности сооружений и зданий в зависимости от значений поражающих факторов затоплений.

## **2.5. Ликвидация последствий гидрологических аварий плотин и затоплений НБ**

Борьба с авариями ГТС и ликвидация их последствий делятся на 3 этапа.

**I этап:** а) прогноз стихийного бедствия и организация работ по снижению

возможных чрезвычайных ситуаций; б) оповещение руководителей учреждений, членов постоянной чрезвычайной комиссии (ПЧК), командиров воинских частей, населения; в) приведение в готовность ПЧК, органов управления ГО и воинских частей; анализ обстановки; г) проведение подготовительных мероприятий по снижению потерь и ущерба (обвалование сооружений, укрепление дамб и мостов), приведение в готовность аварийно-технических средств, уточнение расчета сил и средств на возможную эвакуацию, определение маршрутов эвакуации, организация взаимодействия.

**II этап:** а) проведение мероприятий по спасению населения – укрепление дамб и других ГТС; наведение переправ; эвакуация в незатопленные районы детских и лечебных учреждений, населения; вывоз материальных и культурных ценностей; поиск и спасение людей и животных; б) жизнеобеспечение населения – снабжение имуществом и продуктами пострадавших; восстановление поврежденных коммуникационных систем (водо-, газо-, тепло-, электроснабжение, связь, транспортные магистрали и мосты).

**III этап:** а) восстановление жилищного фонда; б) ввод в строй объектов социальной сферы, сетей водо-, тепло-, газо- и электроснабжения взамен утраченных; в) уборка остатков урожая; г) восстановление дорог и мостов.

Объем мер по уменьшению ущерба от затоплений и воздействия волн прорыва, а также эффективность мероприятий по ликвидации последствий в большой степени определяется достоверностью прогноза. В основу планирования мер по уменьшению ущерба должны быть положены научно-обоснованные выводы специалистов-гидрологов, гидравликов, гидротехников, гидрометеорологов и других специалистов водного хозяйства.

## **2.6. Оценка обстановки при прохождении волны прорыва**

Детальные расчеты образования прорана при прорыве плотин и распространение волны прорыва по территории НБ можно выполнить с помощью имеющихся на кафедре ГиГС программ *MIKE 11* и *21* [9, 10].

Ниже приведен упрощенный метод оценки волны прорыва МЧС РФ.

Последовательность оценки обстановки при прохождении волны прорыва (паводка) и катастрофическом затоплении может быть следующей:

1. По данным об основных параметрах прохождения волн прорыва, полученных в результате гидрологических расчетов и справочных материалов (топографических карт, справочных пособий по рекам, гидрографических региональных атласов и т.д.), производится оценка изменения гидрологического режима реки – скорости волны, глубины (высоты) и ширины во времени по всему расчетному участку. Исходные данные включают:

$L$  – удаленность створа объектов от ГТС, км;

$B$  – ширина прорыва, км или площадь водосбросного отверстия при максимальной отметке уровня воды,  $m^2$  (площадь сечения реки, рассчитываемая как трапеция, высотой  $h_{max}$ , шириной основания  $b_{max}$  и углами откоса, определяемыми по гидравлическому уклону нормально течению реки);

$h_0, h_{max}$  – средняя и максимальная глубина реки (в период максимального паводка) в НБ, м (по данным измерений или отметке на карте);

$b_0, b_{max}$  – средняя и максимальная ширина реки (в период максимального паводка) в НБ, м (по данным измерений или отметке на карте);

$i$  – гидравлический уклон местности ( $i=10^{-3}$  соответствует превышению в 1 м на  $L=1000$  м и определяется по карте по отметкам уровней местности);

$h_m$  – высота места, м (определяется с помощью карты по изолиниям, на которых расположен объект, для которого производится прогноз);

$H_p$  – высота плотины, м (разность отметок НБ и гребня плотины).

Порядок упрощенного прогноза параметров волны прорыва (паводка):

1. Определяем гидравлический уклон и расстояние от объектов прогнозирования до ГТС с использованием топографической карты местности ниже гидроузла. Если происходит движение паводковой волны, то ее движение определяют гидрометеопосты, расположенные выше по течению.

2. Определяем время прихода фронта  $t_{фр}$  и гребня  $t_{гр}$  волны прорыва к объектам по формулам:

$$t_{\text{фр}} = \exp\{K_{if} \cdot \ln L - [(0,19H_p + 11,6)]^{1/2}\}, \quad (2.5)$$

где  $K_{if}$  – коэффициент гидравлического уклона для определения времени прихода фронта волны, равный:

$$K_{if} = -0,06 \cdot \lg(i) + 1,26 \quad (2.6)$$

$$t_{\text{гр}} = K_{ig} \cdot L - 32/H_p + 1,25, \quad (2.7)$$

где  $K_{ig}$  – коэффициент гидравлического уклона для определения времени прихода гребня волны, равный:

$$K_{ig} = \exp[0,19H_p/\lg(i) - 0,5], \quad (2.8)$$

3. Определяем время полного затопления по формуле:

$$\tau_{\text{п.зат}} = t_{\text{гр}} - t_{\text{фр}} \quad (2.9)$$

4. Находим высоту  $h$ , м, и скорость  $V$ , м/с, волны прорыва по формулам:

$$h_i = A_v h / (B_h + L)^{1/2}; \quad V = A_v / (B_v + L)^{1/2}; \quad (2.10)$$

где  $A_h, B_h, A_v, B_v$  – коэффициенты, зависящие от  $H_p, i, B$  (табл. 8 *Приложения*).

5. Вычисляем длительность затопления территории объекта по формуле

$$\tau_{\text{зат}} = \beta (t_{\text{гр}} - t_{\text{фр}}) (1 - h_m/h), \quad (2.11)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от высоты плотины  $H_p$ , глубины реки в НБ  $h_0$ , гидравлического уклона  $i$  и расстояния до объекта  $L$ .

$$\beta = -2,27 \ln(iL/H_p) + 0,13H_p/h_0 + 7,9 \quad (2.12)$$

6. Находим степень поражения наземных и причальных сооружений (табл. 1 *Приложения*).

7. Определяем мероприятия по защите людей, техники и объектов в порядке очередности.

## 2.7. Пример решения задачи по оценке обстановки при ГЛА

Условие задачи: на ГТС (плотине) в результате непредвиденного перелива воды через гребень земляной плотины образовался проран. На расстоянии 40 км вниз по течению находится город и машиностроительный завод. Высота плотины 40 м, высота местности 2 м, гидравлический уклон  $10^{-3}$ , проран размером 0,5 км, глубина воды в НБ 4 м.

Оценить степень разрушения зданий в городе и объектов на заводе (корпуса цеха, пирс, кирпичные здания).

### Решение

1. Рассчитываем время прихода гребня  $t_{\text{гр}}$  и фронта волны прорыва  $t_{\text{фр}}$  по

формулам 2.5 и 2.7:  $t_{гр} = 7$  час;  $t_{фр} = 2$  час.

2. Вычисляем высоту  $h$  и скорость  $V$  волны прорыва по формуле 2.10.

Для  $B = 0,5$  км  $H = 40$  м,  $i = 10^{-3}$ ;  $A_h = 124$ ;  $B_h = 89$ ;  $A_v = 32$ ;  $B_v = 44$ .

$$h = 124/(89 + 40)^{1/2} = 11 \text{ м}; \quad V = 32/(44 + 40)^{1/2} = 3,4 \text{ м/с}.$$

3. Выясняем продолжительность затопления территории города и завода.

Для определения коэффициента  $\beta$  по формуле 2.12 вначале находим:

$$iL/H = [10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^4]/40 = 1$$

Для  $H = 10h_0$  и  $iL/H = 1$ :  $\beta = 9$ ;  $\tau_{зат} = 9(7-2)(1-2/11) \approx 36$  час.

4. Находим время полного затопления:  $\tau_{п.зат} = t_{гр} - t_{фр} = 7 - 2 = 5$  час.

5. Определяем степень поражения наземных и причальных сооружений по табл. 1 *Приложения*. Волна прорыва, высотой 11 м производит полное разрушение зданий и сооружений в городе и на заводе.

6. Намечаем мероприятия по защите людей и техники: За 2 часа произвести эвакуацию населения и материальных ценностей на повышенные участки местности. Организовать спасательные команды, оснащенные плавучими средствами, выезд команд через 7 час.

## 2.8. Задание на контрольную работу

На земляной плотине, расположенной выше по руслу реки от города N, в результате перелива плотины в паводок образовался проран.

Оценить степень разрушения зданий в городе (микрорайоны 1-8) и объектов на заводе (корпус цеха, речной пирс, кирпичные здания, очистные сооружения). Принять решение по защите людей, окружающей среды и материальных ценностей.

Варианты заданий

Информация	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Размер прорана, м	100	200	300	400	500	600	700	1000
Микрорайон	1	2	3	4	5	6	7	8

*ПРИЛОЖЕНИЕ. Таблицы воздействий потока на здания и сооружения*

Характеристика степени разрушений различных сооружений от волны прорыва

Табл. 1

Объекты	Сильные		Средние		Слабые	
	<i>h</i> , м	<i>V</i> , м/с	<i>h</i> , м	<i>V</i> , м/с	<i>h</i> , м	<i>V</i> , м/с
Кирпичные здания	4,0	2,5	3	2,0	2,0	1,0
Корпуса цехов	7,5	4,0	6	3,0	3,0	1,5
Пирсы	5,0	6,0	3	4,0	1,5	1,0
Плавучие доки	8,0	2,0	5	1,5	3,0	1,5
Плавучие краны	7,0	2,0	5	1,5	2,5	1,5
Суда высотой более 2 м	5,0	2,0	4	1,5	2,0	1,5
Металлические мосты и путепроводы с пролетом до 100 м	2,0	3,0	1,0	2,0	0	0,5
То же с пролетами длиной >100 м	2,0	2,5	1,0	2,0	0	0,5
Железобетонные мосты	2,0	3,0	1,0	2,0	0	0,5
Деревянные мосты	1,0	2,0	1,0	1,5	0	0,5
Шоссейные асфальтированные дороги	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0
Дороги с гравийным покрытием	2,5	2,0	1,0	1,5	0,5	0,5

Предельно допустимые скорости водного потока, м/с, при которых обеспечивается сохранность объектов при переливе воды через проезжую часть

Табл. 2

Наименование объекта	Глубина потока, м					
	0,4	1	2	3	4	5
Железнодорожные пути	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,6
Шоссейные дороги асфальтированные	2,1	2,5	2,9	3,1	3,2	3,2
Дороги с гравийным покрытием	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,6

Предельно допустимые скорости воды, м/с, при которых сохраняются элементы мостового перехода при отсутствии перелива воды через проезжую часть

Табл. 3

Наименование элемента укрепления	Скорость течения, м/с	Высота волны прорыва, м
Железобетонные плиты омоноличенные по стыкам	8	3
Сборные железобетонные разрезные плиты	6	1,5
Монолитные железобетонные плиты	8	3,5
Сборные бетонные плиты	4	0,7
Каменная наброска (размер камня 0,1–0,3 м)	2–3	0,5–1,2
Хворостяные тюфяки	3	1,5
Продольные лесопосадки	3	2,5
Дерновка плашмя	0,9–1,4	0,2
Засев трав	0,5	0,2

Зависимость разрушения плотин и дамб от толщины слоя переливающейся воды  $H$  и длительности перелива  $T$

Табл. 4

Наименование объектов	$H$ , м	$T$ , ч
Плотины из местных материалов с защитным покрытием повышенной надежности*	4	3
Плотины из местных материалов с нормальным или облегченным покрытием откосов**	2.5	2
Земляные дамбы с защитным покрытием	2	2
Земляные дамбы без покрытия	1.5	1

*Примечание.\**

На верхнем откосе – бетонные и железобетонные плиты, асфальтирование; на низовом – одерновка, слой гравия или одиночное мощение камнем; ширина гребня 10–12 м с асфальтобетонной дорогой по гребню.

\*\* На верхнем откосе – каменная наброска или каменное мощение; на низовом – посев трав на слое растительного грунта; ширина гребня 6-8 м.

Доля поврежденных объектов на затопленных территориях (в %) при скорости водного потока 3-4 м/с

Табл. 5

Объекты	Часы				Сутки	
	1	2	3	4	1	2
Затопление подвалов	10	15	40	60	85	90
Нарушение дорожного движения	15	30	60	75	95	100
Разрушение уличных мостовых	0	0	3	6	30	45
Остановка службы в портах	0	50	75	90	100	100
Прекращение переправ	5	30	60	100	100	100
Повреждение защитных дамб	0	0	0	0	10	25
Разрушение и смыв деревянных строений	0	7	70	90	100	100
Разрушение малых кирпичных зданий	0	0	10	40	50	60
Повреждения блочных бетонных зданий и промоины фундаментов	0	0	0	0	5	10
Понижение капитальности на одну ступень: зданий классов 1–3	0	0	0	0	3	6
зданий классов 3 и выше	0	10	20	30	45	60
Прекращение электроснабжения	75	80	90	100	100	100
Прекращение телефонной связи	75	85	100	100	100	100
Повреждение систем газо- и водоснабжения	0	0	7	10	30	70
Гибель урожая	0	0	0	0	3	8

Распределение индексов объема ущерба при затоплениях различного масштаба  
Табл. 6

Затопление	Площадь, км <sup>2</sup>	Количество населенных пунктов, %	Высота подъема воды, м	Продолжительность стояния воды					
				Малые реки (сутки)			Большие реки (месяцы)		
				1	2	3	1	2	3
Малое	10	15-20	1,5-2	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Среднее	10-100	20-40	2-4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Крупное	100-1000	40-95	4-6	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Катастрофическое	выше 1000	95-100	6-14	P1	P2	P3	P4	P5	P6

Снижение капитальности зданий и сооружений за периоды затоплений при исходных классах капитальности  $K$

Табл. 7

Объекты	$K$	Классы капитальности от воздействия по индексам М, С, К, Р					
		M1/C1/K1/P1	M2/C2/K2/P2	M3/C3/K3/P3	M4/C4/K4/P4	M5/C5/K5/P5	M6/C6/K6/P6
Жилые здания	1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/2/2	1/2/2/3
	2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/3	2/2/3/3	2/3/3/4
	3	3/3/3/3	3/3/3/3	3/3/3/4	3/3/3/5	3/3/4/5	3/4/4/6
	4	4/4/4/4	4/4/4/5	4/4/4/5	4/5/5/6	5/5/5/6	5/6/6/6
Общественные и промышленные здания	1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/2	1/1/2/3
	2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/3/3	2/2/3/4	2/3/4/5
	3	3/3/3/3	3/3/3/3	3/3/4/4	3/3/4/5	3/3/5/6	3/4/5/7
	4	4/4/4/5	4/4/4/5	4/5/5/6	4/5/6/6	5/5/6/7	5/6/7/8
Электростанции	1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/1/1	1/1/2/2	1/2/2/2
	2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/3	2/2/3/3	2/3/3/4

Коэффициенты  $A$  и  $B$  для определения высоты и скорости волны прорыва

Табл. 8

$H_n$ , м	$B$ , км	Значение коэффициентов при уклонах															
		$i=10^{-5}$				$i=10^{-4}$				$i=10^{-3}$				$i=10^{-2}$			
		$A_h$	$B_h$	$A_v$	$B_v$	$A_h$	$B_h$	$A_v$	$B_v$	$A_h$	$B_h$	$A_v$	$B_v$	$A_h$	$B_h$	$A_v$	$B_v$
20	1					100	90	9	7	40	10	16	21				
40						280	150	20	9	110	30	32	24				
80						720	286	39	12	300	60	62	29				
20	0,75					114	147	10	9	48	30	17	30				
40						310	241	19	11	117	59	32	34				
80						782	437	37	14	305	93	61	40				
20	0,5					128	204	11	11	56	51	18	38				
40						340	332	19	14	124	89	32	44				
80						844	588	34	17	310	166	61	52				
20	0,25					140	192	8	21	40	38	15	43				
40						360	388	13	21	108	74	30	50				
80						880	780	23	21	316	146	61	65				
20	0,1					145	146	6	40	34	11	14	45				
40						358	400	9	34	104	56	29	53				
80						907	978	13	24	320	69	60	70				

### **Глава 3. Методика оценки уровня безопасности гидросооружений**

#### **Введение**

Настоящая глава составлена на основе методики с аналогичным названием [11], разработанной Центром безопасности и натурных наблюдений сооружений ГЭС (ЦБН) ОАО «НИИЭС» согласно требованиям Федерального закона 1997 г. «О безопасности гидротехнических сооружений» [1] и апробированной в течение последних 10 лет при декларировании безопасности гидросооружений ГЭС, работающих в РАО «ЕЭС России».

В этой главе использовались также последние (2003 г.) рекомендации Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) [12] и крупная научная монография (2004 г.) ученых и специалистов ряда гидроэнергетических компаний Канады, США и стран Западной Европы под названием «Риск и неопределенность в оценке безопасности плотин» [13].

В настоящей методике установлен порядок, сформулирована терминология и основные методические положения оценки уровня безопасности гидросооружений (ГТС) разных типов и классов в период их эксплуатации.

Эта методика предназначена для *детерминированной оценки* возможного риска аварий и состояния ГТС при эксплуатации и может применяться при составлении деклараций безопасности ГТС и проведении их обследований.

Основной целью этой методики было обеспечение оперативности и воспроизводимости получаемых оценок уровня безопасности ГТС и учета количественных и качественных факторов при проведении анализа состояния эксплуатируемого ГТС.

Все учитываемые факторы безопасности разделены на 9 групп. Первые 6 групп характеризуют состояние эксплуатируемого ГТС, а последние 3 группы характеризуют значимость ущерба от возникновения возможной аварии. Таким образом, уровень безопасности ГТС определяется в зависимости от факторов, оказывающих наибольшее влияние на возникновение и последствия возможной аварии ГТС.

### **3.1. Термины и определения методики**

Федеральным законом «О безопасности гидросооружений» [1] определены следующие два понятия, имеющие прямое отношение к этой методике:

*Чрезвычайная ситуация* — обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии гидросооружения, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или ущерб окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

*Безопасность гидротехнических сооружений* — свойство гидросооружений, позволяющее обеспечить защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйствующих субъектов.

Кроме того, в этой методике используются также следующие понятия:

*Авария гидротехнического сооружения (ГТС)* — разрушение или повреждение ГТС, вызванное непредвиденными (не предусмотренными проектом и правилами безопасности) ситуациями и сопровождаемое неконтролируемым сбросом воды из водохранилища.

*Уровень безопасности ГТС* — детерминированный показатель, в обобщенной форме определяющий степень отклонения состояния эксплуатируемого ГТС от положений проекта и требований норм.

### **3.2. Общие положения методики**

1. В случае оценки риска аварии или текущего состояния эксплуатируемых ГТС при отсутствии необходимых исходных данных для проведения расчетов прочности, устойчивости или вероятностных расчетов риска возможной аварии, а также сложности учета качественных факторов, оказывающих большое влияние на безопасность ГТС, следует оценить уровень безопасности ГТС в детерминированной форме, используя данную методику. Для эксплуатируемого ГТС детерминированные оценки уровня безопасности определяют его текущее состояние и используются для уточне-

ния конечного значения уровня риска аварии. Оценки уровня безопасности ранжируются в диапазоне от «нормального» до «недопустимого».

2. Оценку уровня безопасности в детерминированной форме следует проводить для эксплуатируемых гидроузлов и отдельных ГТС с использованием всей доступной количественной и качественной информации. Количественная оценка уровня безопасности является формализованным и оперативным способом оценки, позволяющим учесть в едином показателе влияние большого числа качественных и количественных факторов, имеющих не только разную природу и значимость, но и разные масштабы.

2.1. Рекомендуемый перечень факторов безопасности представлен в виде иерархической структуры на рис. 3.1. Эта структура факторов безопасности, а также перечень факторов и степень детализации их структуры может уточняться с учетом особенностей эксплуатируемого ГТС.

2.2. Приведение факторов к единому масштабу (*ранжирование*) выполняется на основе единой непрерывной шкалы, значения которой изменяются от 0 до 6. Итоговая оценка уровня безопасности представляется в таком же масштабе. Ранжирование качественных значений отдельных факторов, как и уровня безопасности  $I$  для ГТС в целом, осуществляется на основе таблиц раздела 3.4.

2.3. После процедуры ранжирования факторов безопасности следует уточнить их количественные оценки с учетом приоритета факторов для данного сценария аварии на основе одного из известных методов обработки экспертных оценок (например, на основе *метода попарных сравнений факторов*, представленного в *Приложении А*).

2.4. Оценка уровня безопасности ГТС включает следующие этапы:

- определение «сценариев» возможных аварий;
- определение факторов безопасности, соответствующих «сценариев»;
- построение иерархической структуры факторов безопасности;
- учет взаимовлияния факторов безопасности;

- оценку уровня безопасности ГТС в целом.



Рис. 3.1. Структура факторов безопасности и схема оценки их влияния на безопасность эксплуатируемых ГТС

Нормальное состояние ГТС и условий эксплуатации определяется количественными значениями итоговой оценки уровня безопасности от 0 до 3. В ряде случаев эти значения не могут быть ниже трех, а именно:

для факторов группы a1:

- величины коэффициентов устойчивости и прочности ГТС ниже нор-

мальных;

- заложения откосов грунтовых плотин меньше установленных в проекте;
- при изменении класса ответственности ГТС коэффициенты запаса устойчивости и прочности становятся меньше нормативных значений,

для факторов группы а2:

- увеличение расчетных максимальных расходов воды, превышающих пропускную способность водосбросов;

- рост расчетных сейсмических и статических нагрузок, что снижает коэффициенты запаса устойчивости и прочности ниже нормативных,

для факторов группы а4, а5:

- превышение диагностическими показателями состояния установленных критериев безопасности уровня  $K1$  согласно методике главы 3 Пособия;

- при превышении уровня  $K2$  количественное значение фактора безопасности не может быть ниже четырех,

для факторов группы аб:

- неудовлетворительные условия эксплуатации гидромеханического и подъемного оборудования, основных затворов паводковых водосбросов;

- отсутствие плана противоаварийных мероприятий;

- грубые отступления от проектных режимов эксплуатации (например, превышение ФПУ, не предусмотренное проектом; эксплуатация ГТС с превышением нормативных нагрузок и режимов).

2.5. Количественную оценку факторов безопасности более высокого уровня (в том числе оценку уровня безопасности  $I$ ) следует осуществлять с учетом взаимовлияния различных (приведенных к единому масштабу) факторов безопасности более низкого уровня. Такой учет следует выполнять согласно иерархической структуре факторов, показанной на рис. 3.1, на каждом уровне иерархии. При этом используются следующие формулы:

$$I = (I_{max} + q) - \prod_i^n [(I_{max} + q) - I_i] / [(I_{max} + q) - I_{min}]^{n-1} \quad (3.1)$$

$$I = \max I_i (i=1,2,\dots,n) \quad (3.2)$$

$$I = \left( \sum_1^n I_i \right) / n, \quad (3.3)$$

где:  $I_i$  – значения факторов безопасности одного иерархического уровня;  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальное и минимальное количественные значения интервала в табл. 3.1 (раздел 3.4), в который попадают качественные оценки факторов;  $q$  – величина, вводимая на экспертной основе, которую следует принимать  $q = 0,1$ ;  $\Pi$  – знак произведения.

2.6. Итоговая количественная и качественная оценка безопасности ГТС производится согласно табл. 3.4.

2.7. В расчетах по формулам (3.1), (3.2), (3.3) оценку на каждом уровне иерархии следует осуществлять по факторам, попавшим в интервал (поддиапазон) количественной шкалы, который соответствует наиболее опасному состоянию ГТС. Вычисления ведутся в следующем порядке:

- 1) среди факторов, стоящих на одном уровне иерархии, выбирают те, которые имеют самые опасные качественные значения (табл. 3.4);
- 2) для независимых факторов (из числа выбранных по п. 1) выполняются вычисления по формуле (3.1);
- 3) для факторов, которые не могут быть независимыми, применяют формулу (3.2);
- 4) осреднение оценок по формуле (3.3) применяется в основном на самых низких уровнях иерархии, например в случае оценки отклонения показателей состояния ГТС от требований ПТЭ (группа факторов  $I$ ) по датчикам, установленным в локальной зоне контроля.

2.8. После завершения расчетов для всех уровней иерархии (рис. 3.1) и определения уровня безопасности ГТС в целом следует:

- выполнить анализ вклада отдельных факторов и групп факторов;
- при необходимости внести коррективы в набор учитываемых факторов, их иерархию, ранжирование, оценку факторов низших уровней иерархии, выбор расчетных формул;

- повторить процедуру оценки уровня безопасности с использованием уточненных исходных данных и локальных характеристик безопасности;
- сформулировать (при необходимости) выводы о причинах низкого уровня безопасности для разработки организационно-технических мер по предотвращению аварий и разрушения эксплуатируемого ГТС.

2.9. В общем случае вычисление значения фактора «Оценка состояния эксплуатируемого ГТС» следует выполнять на основе оценок этого фактора, полученных для различных «сценариев» аварий или разрушения. При этом итоговая оценка вычисляется по формуле (3.1).

### **3.3. Структура факторов безопасности ГТС**

1. Рекомендуемый для использования при обследованиях и оценке уровня безопасности ГТС перечень факторов безопасности представлен в виде иерархической структуры на рис. 3.1.

2. По аналогии с классической схемой оценки риска при оценке уровня безопасности  $I$  эксплуатируемого ГТС следует учитывать две основные группы факторов безопасности, характеризующих: состояние эксплуатируемого ГТС (фактор  $I_1$ ) и ущерб от возможной аварии ГТС (фактор  $I_2$ ).

3. Оценка состояния эксплуатируемого ГТС зависит от изменения оценок его состояния  $I_{1.1}$ , выполненных согласно требованиям действующих норм (по сравнению с нормативными оценками, положенными в основу первоначального проекта), а также от отклонений контролируемых показателей состояния и условий эксплуатации сооружения  $I_{1.2}$  от требований правил технической эксплуатации (ПТЭ).

4. Оценку состояния эксплуатируемых ГТС (фактор  $I_1$ ) следует выполнять с учетом следующих количественных и качественных показателей:

**a1** – *соответствия конструктивно-компоновочных решений и условий эксплуатации положениям действующих норм и правил, а также современным методам расчетов и методам оценки состояния гидротехнических сооружений*; указанное соответствие определяется влиянием по-

казателей более низкого уровня иерархии:

a1.1 – изменениями положений норм, методов расчета и методов оценки состояния сооружений, а также изменениями нормативных требований к уровню безопасности сооружений в связи с хозяйственным освоением территорий в нижнем бьефе и повышением ответственности сооружений напорного фронта (оценивается с учетом показателей а7, а8, а9);

a1.2 – изменениями принятых в проекте конструктивно-компоновочных решений (согласованных и несогласованных с проектной организацией);

a1.3 – изменениями условий работы гидроузла (работа в каскаде, особенности использования гидроузла, организация транспортных потоков и др.);

a1.4 – наличием ошибок, допущенных при строительстве и эксплуатации, и других факторов (кроме природных воздействий), неучтенных в проекте.

**a2** – *опасности превышения принятых в проекте расчетных уровней возможных природных воздействий:*

a2.1 – расчетных максимальных расходов воды (из-за изменения гидрологических характеристик реки и изменения методов их назначения);

a2.2 – расчетных сейсмических воздействий (вследствие более глубокого понимания природы землетрясений и накопления данных сейсмологических наблюдений, включая проявление «наведенной» сейсмичности);

a2.3 – селевой опасности;

a2.4 – гидростатических, ветроволновых и температурных воздействий, фильтрационных сил, нагрузок ото льда и наносов (с учетом данных наблюдений за период эксплуатации) и других нагрузок, а также в связи с изменением методов определения и назначения указанных величин (оценивается с учетом показателей а5.4, а5.9, а5.11, а5.14).

**a3** – *изменения расчетных значений механических и фильтрационных характеристик материалов ГТС и свойств оснований, определяемых:*

a3.1 – изменением методов определения и назначения расчетных значений указанных характеристик;

а3.2 – обнаружением в основании или в береговых примыканиях: открытых трещин, трещин, заполненных эродируемым материалом, тектонических нарушений, слоев (зон) сильно растворимых или сильно деформируемых пород и т.п., а также иных изменений, связанных, в частности, с воздействием на основание нагрузок от сооружения и водохранилища (оценивается с учетом показателей а3.5 и а5.8);

а3.3 – установленной при эксплуатации опасностью «разжижения» рыхлых несвязных или слабо связных водонасыщенных грунтов тела плотин, дамб и их основания при интенсивных динамических воздействиях;

а3.4 – наличием выявленных при эксплуатации дефектов конструкции, как следствия применения некачественных материалов или недостаточного контроля за производством работ (оценивается с учетом показателя а5.11);

а3.5 – неблагоприятным изменением во времени («старением») материалов напряженных элементов ГТС и изменением пород в основании вследствие физических (в том числе длительных вибрационных и других динамических нагрузок) и химических процессов, эрозионного или растворяющего действия воды, солнечной радиации, многократного повторения циклов замерзания-оттаивания (оценивается с учетом показателей а5.8, а5.10).

**а4** – *соответствия критериям безопасности показателей состояния, контролируемых средствами измерений:*

а4.1 – изменения методов определения критериальных значений диагностических показателей;

а4.2 – фактических значений параметров напряженно-деформированного состояния сооружения и его основания (осадок, перемещений, деформаций, усилий, напряжений, поровых давлений);

а4.3 – фактических значений параметров фильтрационного режима (величин противодавления, градиентов напора и фильтрационных нагрузок, положения кривой депрессии, фильтрационных расходов, мутности дренажных вод и наличия механических выносов из дренажей).

**а5** – соответствия критериям безопасности показателей состояния, оцениваемых на экспертной основе (в том числе контролируемых визуально); при оценке данного фактора безопасности, имеющего важное значение в особенности для «старых» ГТС, должны быть учтены следующие факторы более низкого уровня иерархии:

а5.1 – засорение подходов к водосбросным ГТС (вследствие, например, оползания склонов или смыва ливнем грунта берегового откоса водохранилища, перемещения наносов от неразобранной грунтовой перемычки к водосбросу, разрушения крепления подводящего канала и др.); уменьшение пропускной способности водосбросных и водоспускных ГТС (вследствие выхода из строя гидроагрегатов, опасного изменения подпора с НБ, высокой осадки напорных ГТС, низкого уровня заливки вертикальных шпонок температурно-осадочных швов секций бетонных ГТС и др.);

а5.2 – повреждения затворов (деформации обшивки и других элементов конструкции, разрушения опорно-ходовых частей, уплотнений, порогов и пазов затворов, заметной коррозии обшивки и др.); неисправности гидромеханического и электрического оборудования, обеспечивающего работу водосбросных и водопропускных отверстий;

а5.3 – возможность перелива воды через гребень плотины, дамбы из-за обрушения крупных массивов пород (или ледников, селевых потоков) в водохранилище; наличие потенциально опасных оползневых зон по бортам водохранилища, появление опасных трещин на склоне и уступов в зоне переменного уровня, включая влияние гидрогеологических изменений;

а5.4 – возможность превышения расчетных нагрузок на ГТС как следствие дефектов и повреждений основания, некачественной обратной засыпки, дефектов горизонтального и вертикального дренажа бетонных ГТС и потерн, элементов противопрофильтрационного контура, размещенных за и под бетонными ГТС;

а5.5 – дефекты и повреждения оснований бетонных и грунтовых ГТС;

а5.6 – дефекты соединений и уплотнений, конструкций противофильтрационных устройств температурно-осадочных швов секций бетонных ГТС, раскрытие трещин;

а5.7 – повреждения бетонных конструкций вследствие физических и химических воздействий (кавитация, абразивное и иное механическое повреждение поверхности водным потоком, льдом, абразивными материалами; многократное воздействие циклов замерзания-оттаивания, воздействие сульфатов на цементный камень, щелочная реакция заполнителя; неравномерные осадки секций, трещины на поверхности бетона);

а5.8 – нарушения в теле грунтовых плотин, дамб и на пойме (наличие зон рыхлого или слабо уплотненного грунта в примыканиях к бетонным конструкциям и в береговых примыканиях, а также усадочных трещин, вызванных длительными перерывами в укладке связных грунтов; неравномерные осадки в зонах контакта с бетоном и скальными бортами, а также на границе зон, выполненных из разных грунтов; просадки, воронки, трещины; нарушения структуры и засорение фильтров; неблагоприятные изменения фильтрационного режима – увеличение или уменьшение (скачком) фильтрационных расходов, выход фильтрующей воды на откос, развитие суффозии, выветривание каменной наброски в упорных призмах грунтовых плотин при замерзании-оттаивании и др.);

а5.9 – разрушения крепления верховых откосов и гребня фунтовых плотин и дамб (смещения элементов крепления, вынос составляющих фильтра и грунта основания крепления, разрушение шовных уплотнений плитных креплений, появление трещин на плитах);

а5.10 – дефекты и повреждения дренажа плотин, дамб, водоводов и водосбросных ГТС (кольматация обратного фильтра, просадки и смещения откоса у дренажа, смещения секций дренажных галерей или трубчатого дренажа, заиливание сечения трубы дренажа, промерзание зимой и др.);

а5.11 – разрушения, повреждения и опасные деформации крепления НБ

(водобоя, транзитной части быстротока, рисбермы, ковша), облицовок каналов и туннелей, а также чрезмерные размывы русла и берегов реки в НБ, опасные с точки зрения как устойчивости ГТС, так и надежной работы водосбросных и водопропускных ГТС;

а5.12 – коррозионные, кавитационные, вибрационные и иные механические повреждения стальных конструкций (затворов, трубопроводов и т.п.);

а5.13 – повреждения асфальтобетона, резины, пластмасс под воздействием солнечной радиации, колебаний температур и уровня воды в водохранилище с последующей потерей упругости и нарушением сплошности.

**а6** – *нарушения необходимых условий эксплуатации вследствие:*

а6.1 – плохого выполнения общих мер безопасности (невыполнение графика декларирования безопасности, отсутствие необходимых лицензий; отсутствие утвержденного перечня или неполной комплектации необходимой технической и нормативно-методической документации, отсутствие или неудовлетворительное качества утвержденных местных инструкций по эксплуатации ГТС и механического оборудования, неудовлетворительная организация охраны ГТС и территории, неудовлетворительное обслуживание контрольных и эксплуатационных систем и др.);

а6.2 – отступлений (ошибок) от установленных режимов работы ГТС и их элементов (создание неблагоприятных гидравлических режимов работы водосбросных ГТС, нарушение регламентированной интенсивности опорожнения и наполнения ВБ, длительная форсировка подпорного уровня воды в ВБ или превышение форсированного уровня и т.д.);

а6.3 – плохой организации режима работы водосбросных, водопропускных и дренажных сооружений и устройств, в т.ч. зимой (неблагоприятные гидравлические режимы работы, нецелевое использование сооружений, отсутствие запаней, отсутствие полыней перед ГТС, не рассчитанными на давление льда, ненадежная работа систем обогрева и утепления аэрационных отверстий зимой, ошибки в управлении принудительным дренажом,

низкая надежность систем автоматического удаления дренажных вод, а также водомерных приспособлений на дренажных устройствах, систем обогрева, освещения и вентиляции смотровых галерей, неэффективная работа очистных механизмов и устройств на подходе к водосбросным сооружениям, а также низкая надежность систем контроля (и сигнализации) перепада на сороудерживающих решетках и т.п.);

аб.4 – плохих условий эксплуатации затворов, подъемно-транспортного и электрооборудования (эксплуатация устройств и механизмов, выработавших нормативный ресурс, несоблюдение графика профилактических мероприятий, отсутствие дублирующих источников питания, отсутствие или неисправность контрольных устройств и т.п.);

аб.5 – плохой оснащенности ГТС средствами контроля, в т.ч. и несоответствие состава КИА проекту (состав и типы КИА не позволяют обеспечить надежный контроль за состоянием ГТС);

аб.6 – отсутствия утвержденных в установленном порядке или неудовлетворительного качества критериев безопасности ГТС;

аб.7 – плохой организации контроля за состоянием ГТС и недостаточного состава и квалификации персонала (например, из-за отсутствия систематической тренировки к действиям в экстремальных ситуациях и непривычной обстановке), недостаточного объема проводимых наблюдений, неполной обработки данных наблюдений, отсутствия первичной оценки состояния ГТС, оценки достоверности показаний и работоспособности КИА;

аб.8 – плохой организации технического обслуживания и ремонта ГТС (ремонтные работы не ведутся в объеме, опережающем процесс «старения» ГТС; отсутствует контроль за документацией и технологией ремонта; не выполняется план реконструкции ГТС);

аб.9 – низкого уровня (или отсутствия) плана противоаварийных мероприятий и плана действий в условиях аварии; отсутствие сил и средств, предназначенных для предотвращения аварии, ликвидации ее последствий

и защиты людей; отсутствия надежной схемы оповещения об аварийных и чрезвычайных ситуациях и службы медицинского обеспечения в случае аварийной или чрезвычайной ситуации.

5. Оценка ущерба от возможной аварии (фактор  $I_2$ ) осуществляется с учетом следующих показателей:

**а7** – последствий нарушения эксплуатации ГТС с учетом структуры и масштаба потребления энергии и воды организацией, использующей ГТС;

**а8** – уровня освоения зоны возможного затопления в НБ при прорыве напорного фронта;

**а9** – возможного в результате аварии нарушения природных условий.

6. Приведенный перечень контролируемых количественных и качественных показателей состояния, уровня внешних воздействий и условий эксплуатации ГТС, а также детализация их структуры должны уточняться с учетом особенностей обследуемого ГТС.

### 3.4. Таблицы для ранжированной оценки факторов и уровня безопасности эксплуатируемых гидросооружений

*Ранжирование уровня безопасности сооружения (фактор  $I$ ); оценок состояния сооружения (фактор  $I_1$ ); оценок ущерба от возможной аварии сооружения (фактор  $I_2$ ); изменений нормативных оценок состояния сооружения (фактор  $I_1.1$ ); отклонений контролируемых показателей состояния сооружения и (или) условий его эксплуатации от требований правил технической эксплуатации (фактор  $I_1.2$ ).*

Табл. 3.1

Количественная шкала	Качественные значения факторов			
	$I$	$I_1$	$I_2$	$I_1.1; I_1.2$
$0 < I < 1$	Нормальный	Нормальное	Малый	Отсутствуют
$1 < I < 2$	Нормальный	Нормальное	Малый	Незначительные
$2 < I < 3$	Пониженный	Нормальное	Малый	Слабые
$3 < I < 4$	Допустимый (Низкий)*	Потенциально опасное	Большой	Средние
$4 < I < 5$	Предельный (Низкий)*	Потенциально опасное	Очень большой	Сильные
$5 < I < 6$	Недопустимый (Опасный)*	Предварийное	-	Очень сильные

(\*) *Примечание.* В скобках приведены определения состояния ГТС согласно Правилам декларирования безопасности ГТС. Соответствие для определений состояния ГТС согласно различным документам приведено в табл. 3.5.

**Ранжирование факторов группы П.1** (**a1** – соответствие конструктивно-компоновочных решений и условий эксплуатации современным методам расчетов и методам оценки состояния ГТС и положениям действующих норм и правил; **a2** – опасность превышения принятых в проекте расчетных уровней возможных природных воздействий: сейсмических, гидрологических, метеорологических, оползней в водохранилище и др.; **a3** – неблагоприятное изменение свойств материалов ГТС и пород основания).

**Ранжирование факторов группы П.2** (**a4** – соответствие критериям безопасности показателей состояния, контролируемых средствами измерений; **a5** – соответствие критериям безопасности показателей состояния, оцениваемых на экспертной основе, в том числе контролируемых визуально; **a6** – нарушения условий эксплуатации ГТС).

Табл. 3.2

Количественная шкала	Качественные значения факторов					
	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>a4</b>	<b>a5</b>	<b>a6</b>
<b>0 &lt; a &lt; 1</b>	Полное	Очень низкая	Отсутствует	Полное	Полное	Отсутствуют
<b>1 &lt; a &lt; 2</b>	Практически полное	Низкая	Незначительное	Практически полное	Практически полное	Незначительные
<b>2 &lt; a &lt; 3</b>	Приемлемое	Низкая	Слабое	Приемлемое	Приемлемое	Слабые
<b>3 &lt; a &lt; 4</b>	Допустимое	Средняя	Среднее	Допустимое	Допустимое	Средние
<b>4 &lt; a &lt; 5</b>	Предельное	Средняя	Сильное	Предельное	Предельное	Сильные
<b>5 &lt; a &lt; 6</b>	Несоответствие	Высокая	Очень сильное	Несоответствие	Несоответствие	-

*Примечание.* Значения (**a4** или **a5**) < 3 соответствуют условиям непревышения первого (предупреждающего) уровня (**K1**) контролируемых показателей состояния, тогда как значения (**a4** или **a5**) < 5 – условиям непревышения второго уровня (**K2**), соответствующего достижению допустимого уровня риска аварии. Превышение **K1** и **K2** свидетельствует о наступлении потенциально опасного и предаварийного состояния, соответственно.

**Ранжирование факторов группы П.2** (**a7** – последствия нарушения эксплуатации ГТС с учетом структуры и масштаба потребления продукции эксплуатирующей организации; **a8** – уровень освоения зоны возможного затопления в НБ при образовании волны прорыва; **a9** – возможные нарушения природных условий).

Табл. 3.3

Количес- венная шкала	Качественные значения факторов		
	<i>a7</i>	<i>a8</i>	<i>a9</i>
$0 < a < 1$	Незначи- тельные	Необжитая зона	Отсутствуют
$1 < a < 2$	Малые	Малые поселки (до 1000 жите- лей), сельское хозяйство	Практически отсутствуют
$2 < a < 3$	Средние	Малые города (до 50000 жите- лей), сельское хозяйство	Малые
$3 < a < 4$	Большие	Средние города (50-100 тысяч жителей), промышленность	Средние
$4 < a < 5$	Очень большие	Большие города (свыше 100 тыс. жителей), промышленные пред- приятия, химическая промыш- ленность, ядерные установки	Большие

*Примечание.* Факторы **a6**, **a7**, **a8**, **a9** следует учитывать при оценке уровня безопасности ГТС в случае их значительного изменения (изменения диапазона их качественной оценки) по сравнению с проектными предположениями.

Итоговая ранжированная оценка уровня безопасности эксплуатируемого ГТС

Табл. 3.4

Количе- ственная шкала оценки	Качественная шкала оценки уровня безо- пасности	Оценка безопасности гидросооружения  Рекомендации эксплуатационному персоналу
$0 < I < 3$	Нормальный	Безопасность ГТС полностью соответствует требова- ниям современных норм и правил. Следует проанали- зировать факторы безопасности, имеющие оценки бо- лее 2, а также факторы, оценки которых имеют тен- денцию к увеличению.
$3 < I < 4$	Допустимый (низкий)	Безопасность ГТС находится на уровне, отвечающем границе нормативных требований. Следует проверить правильность оценок факторов безопасности, для ко- торых получена оценка 3,5. Необходимо привлечь экспертов для анализа безопасности ГТС.
$4 < I < 5$	Предельный (низкий)	Безопасность ГТС не обеспечена. Следует ввести ог- раничения на эксплуатации; перейти на частый график визуальных и инструментальных наблюдений и кон- троль факторов, имеющих оценки более 4; привлечь экспертов. Главный инженер контролирует ситуацию и принимает решение о выполнения аварийных работ.
$5 < I < 6$	Недопусти- мый (опасный)	Главный инженер принимает решение о предотвра- щении аварии.

*Примечание.* Соответствие уровня безопасности (определяемого по данной методике) эксплуатационным состояниям ГТС, приведенным в Методике определения критериев безопасности ГТС, а также уровням безопасности, приведенным в Правилах декларирования безопасности ГТС, находящихся в ведении, собственности или эксплуатации организаций топливно-энергетического комплекса РФ рекомендуется устанавливать на основе следующей табл. 3.5.

*Табл. 3.5*

Уровень безопасности ГТС (Раздел 2.4)	Уровень безопасности ГТС	Эксплуатационное состояние ГТС (РД 153-34.2-21.342-00.)
Нормальный	Нормальный; Пониженный	Нормальное
Допустимый; Предельный	Неудовлетворительный	Потенциально опасное
Недопустимый	Опасный	Предаварийное

### ***Приложение А***

#### *Определение приоритетности качественных и количественных значений факторов безопасности ГТС с помощью метода попарных сравнений*

Ранжированные оценки факторов безопасности при проведении анализа назначаются с учетом их влияния на развитие сценария аварии. Первоначально часто бывает сложно оценить, какой из факторов является более приоритетным, поэтому применяется метод попарных сравнений, и приоритетность отдельных факторов определяется последовательным приближением экспертных оценок.

Факторы, имеющие более высокий приоритет при попарном сравнении, помещают в квадратичную матрицу на пересечении соответствующих строк и столбцов (табл. А.1). Здесь же приведено общее количество пар (приоритет) по каждому фактору и вес фактора, при этом большим значениям приоритета и веса соответствует большая значимость фактора. Оценку приоритетности факторов следует проводить в следующем порядке.

1. Проводят попарное сравнение факторов по выбранному сценарию согласно матрице-таблице А.1. Пара факторов выбирается на пересечении столбца и строки матрицы-таблицы и проводится экспертное сравнение этих двух факторов между собой по значимости для данного сценария ава-

рии. Если по мнению эксперта, один из факторов является предпочтительнее другого, то он заносится в ячейку таблицы. Если влияние факторов представляется одинаковым, то в ячейку заносится знак (=). Не допускается выбирать равным влияние более чем половины факторов.

Пример матрицы приоритетов факторов при попарном сравнении

Табл. А.1

фактор	a1.1	a1.2	a5.7	a6.3	a6.5	a6.6	a6.7
a1.1	a1.1	a1.2	a1.1	a6.3	a6.5	a6.6	a6.7
a1.2		a1.2	a1.2	a1.2	a1.2	a1.2	a1.2
a5.7			a5.7	a6.3	a6.5	a6.6	a6.7
a6.3				a6.3	a6.5	a6.3	a6.3
a6.5					a6.5	a6.5	a6.5
a6.6						a6.6	a6.6
a6.7							a6.7
Кол-во пар (приоритет)	2	7	1	5	6	4	3
«Вес»	0,5	1,75	0,25	1,25	1,5	1	0,75

2. В случае, если возникают сомнения в приоритетности какого-либо фактора, следует собрать дополнительную информацию о влиянии этого фактора на состояние ГТС (провести поиск аналогичных ситуаций на ГТС, проанализировать расчетные зависимости, определяющие влияние этого фактора, уточнить соответствие нормам и критериям безопасности и др.). Следует также привлечь экспертов для оценки влияния этих факторов.

3. В заполненной матрице-таблице попарного сравнения определяют количественное значение приоритета каждого из факторов (суммарное количество появления данного фактора в матрице). При равенстве влияния факторов (знак [=]) в данной ячейке таблицы значение влияния равно 0,5.

4. Вычисляется значение относительного «веса» для каждого из факторов, что поможет определиться с величиной ранга при оценке уровня безопасности. Для определения «веса» факторов рассматривается верхний угол матрицы, включая главную диагональ.

## **Приложение Б. Сценарии развития возможных аварий ГТС**

Анализ предаварийных и аварийных ситуаций, наиболее часто встречающихся на гидроузлах, показывает, что для их описания достаточно ограниченное количество стандартных сценариев развития аварии ГТС. Кроме того, каждый сценарий может быть описан системой присущих ему правил поэтапного развития аварии. Это позволяет создать компактную библиотеку сценариев возможных аварийных ситуаций. Описание каждого сценария такой библиотеки должно содержать возможные этапы развития сценария аварии, а так же методы проведения анализа состояния ГТС, оценку уровня опасности и необходимые мероприятия по предотвращению возможной аварийной ситуации на каждом этапе развития аварии. Библиотека сценариев, для грунтовых плотин гидроузлов на равнинных реках представлена в *табл. Б1*. Адаптация системы на объекте с использованием библиотеки сценариев должна заключаться в выборе необходимых сценариев, привязке их к определённым объектам с соответствующей необходимой корректировкой правил, а также созданием, при необходимости, сценариев аварийных ситуаций, не предусмотренных в библиотеке.

*Табл. Б.1*

№ № п.п.	Возможное поэтапное развитие сценария аварии	Необходимо проверить:	Оценка уровня опасности	Специальные методы анализа	Необходимые мероприятия	Примечания
1	2	3	4	5	6	7
I	<b>Грунтовые плотины</b>					
1	<b>Сценарий: Повышение уровня в пьезометре величины критериального значения</b>					При повышении уровня в пьезометре в зоне дренажа. <b>См. сценарий 2</b>
1.1	Повышение кривой депрессии без высачивания воды на низовой откос	Уровень во всех пьезометрах створа и соседних створах, расходы в водовыпусках дренажей	Допустимый <b>2&lt;K3</b>		1. Создание пункта визуальных наблюдений. 2. Контроль по ИУ 1 раз в неделю	При повышении кривой депрессии и в сопредельных створах возможно повышение оценки уровня опасности
1.2	Повышение кривой депрессии с высачиванием воды на низовой откос. Увеличение расходов в водовыпусках дренажей	То же, что и п. 1.1 – состояние дренажной системы	Предельно-допустимый <b>3&lt;K4</b>		Контроль по ИУ 1 раз в сутки	При подобных явлениях в сопредельных створах возможно повышение оценки уровня опасности до предельного
1.3	То же, что п. 1.2. Появление на откосе грифонов воды с выносом частиц грунта.	То же, что и п. 1.2 – коэффициент устойчивости откоса – проверка свойств грунта откоса	Предельный <b>4&lt;K5</b>	Проверка устойчивости откоса. Лаборатор. исследования физико-механич. свойств грунта	1. Контроль по ИУ 4 раза в сутки. 2. Подготовка к проведению противоаварийных мероприятий	При подобных явлениях в сопредельных створах возможно повышение оценки уровня опасности. <b>См. сценарий 6</b>
1.4	То же, что п. 1.3. Появление в плотине трещин, образующих зону оползания откоса		Недопустимый <b>5&lt;K6</b>		Проведение противоаварийных мероприятий	<b>См. сценарий 4</b>

### **3.5. Информационно-диагностическая программа «Гидробезопасность»**

Информационно-диагностическая программа «Гидробезопасность» представляет собой экспертную систему оперативной численной оценки состояния ГТС на основе анализа данных инструментальных наблюдений и визуальных обследований. Программа включает следующие разделы:

1. Раздел «Организация технической эксплуатации ГТС» с подразделами «Паспорт ГТС» и «Архив данных по эксплуатации ГТС» согласно нормам РФ: приказы эксплуатации, ремонтным работам, паспорта приборов и др.

2. Блок «Графические данные», включающий архив чертежей по ГТС, планы ГТС с размещением контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), сечения ГТС в измерительных створах.

3. Блок «Уровни воды», обеспечивающий создание архива данных по уровням воды ВБ и НБ и по оценке их измерения; блок регистрации качества воды.

4. Блок «Чрезвычайные события» для регистрации чрезвычайных воздействий на ГТС: штормов, паводков, дождей, промышленных взрывов, аварий и др. Программа может выполнять корреляционный анализ и совмещать время этих событий с показаниями приборов ГТС и уровнями воды.

5. Систему визуального цветного представления результатов натурных измерений в различных масштабах и системах координат в форме, удобной для их анализа и ксерокопирования.

6. Разработанную форму Акта оценки состояния ГТС как официального документа подведения итогов очередного цикла инструментальных и (или) визуальных наблюдений.

Программа «Гидробезопасность» основана на принципах рекомендаций СИГБ [12], получивших дальнейшее развитие в методиках «ОАО НИИЭС» [11, 14]. Показание каждого измерительного прибора и результаты визуальных обследований оцениваются по единому масштабу на основе непрерывной шкалы, значения которой изменяются от 0 до 6. Большие значения

оценок свидетельствуют о более низком уровне безопасности ГТС.

Данная методика была использована в виде программы «Гидробезопасность» для анализа, прогноза и оценки состояния ГТС *Можайского гидроузла*. Оценка состояния ГТС выполнялась на основе анализа результатов визуальных обследований и следующих инструментальных наблюдений: а) за уровнем воды ВБ; б) за положением кривой депрессии в грунтовой плотине; в) за осадками сооружений и их оснований; г) за фильтрационным расходом в дренаже.

Можайский гидроузел на р. Москве эксплуатируется с 1960 года и включает в себя земляную плотину, быстроток, здание ГЭС с башенным водоприемником и донными галереями. Земляная плотина высотой 25 и длиной 900 м, оснащена пьезометрами, глубинными и поверхностными марками, размещенными в 7 измерительных створах. Оснащены марками также быстроток, здание ГЭС, башенный водоприемник и донные галереи.

#### *Контроль уровня воды*

Контроль уровня воды ВБ является одним из оперативных и интегральных методов оценки состояния ГТС, их оснований и береговых примыканий [4]. Оценка  $a_{41}$  состояния ГТС по уровню воды ВБ (УВБ) базируется на следующих положениях. При УВБ от уровня сработки (УСВ) до (НПУ) ГТС отвечают нормам и ранжируются оценкой от 0 до 4. При УВБ от НПУ до ФПУ или от УСВ до минимального рабочего уровня (МРУ) оценка  $a_{41}$  изменяется от 4 до 5. При УВБ выше ФПУ и ниже МРУ оценка  $a_{41}$  изменяется от 5 до 6. Уточнение оценки  $a_{41}$  основано на сравнении скорости изменения УВБ с максимальными зафиксированными скоростями наполнения ВБ  $v_n = 0,5$  м/сутки и его сработки  $v_c = 0,05$  м/сутки (табл. 3.6).

#### *Контроль деформаций*

Измерение осадок  $S$  ГТС геодезическими методами сетью поверхностных и глубинных марок является важным методом контроля состояния ГТС и прогноза его изменения в будущем. Оценка состояния каждого ГТС

по измерениям осадок марок базируется на следующих положениях [15].

Для описания хода изменения во времени  $t$  осадки  $S$  любой марки подбиралась модель процесса в виде функций:

$$S = t/(a + bt); \quad S = a \{1 - \exp[-t/(b + ct)]\} \quad (3.4)$$

где  $t$  – время в месяцах, считаемое от момента установки марки на ГТС;  
 $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты, параметры математической модели осадки очередной марки. Из двух функций в качестве модели выбирается такая, которая давала наименьшее среднеквадратическое отклонение  $S$  результатов измерения от расчётных значений.

Ранжирование оценки  $a_{41}$  по (УВБ) и скорости его изменения  $V$

Табл. 3.6

Количественная шкала оценки $a$	Качественная оценка	Значения факторов
$0 \leq a < 1$	Полное соответствие	$УСВ \leq УВ \leq НПУ$ ; и $0 \leq v_c < 0,01V_C$ или $0 \leq V_H < 0,01V_H$
$1 \leq a < 2$	Практически полное соответствие	$УСВ \leq УВ \leq НПУ$ ; и $0,01V_C \leq v_c < 0,1V_C$ или $0,01V_H \leq V_H < 0,1V_H$
$2 \leq a < 3$	Приемлемое	$УСВ \leq УВ \leq НПУ$ ; и $0,1V_C \leq v_c < 0,5V_C$ или $0,1V_H \leq V_H < 0,5V_H$
$3 \leq a < 4$	Допустимое	$УСВ \leq УВ \leq НПУ$ ; и $0,5V_C \leq v_c < V_C$ или $0,5V_H \leq V_H < V_H$
$4 \leq a < 5$	Предельное	$НПУ < В \leq ФПУ$ или $МПУ \leq УВ < УСВ$
$5 \leq a < 6$	Несоответствие	$УВ > ФПУ$ ; или $УВ < МПУ$ или $v_c > V_C$ ; или $v_H > V_H$

Обозначения: УВ – уровень воды в ВБ; ФПУ – форсированный подпорный уровень;  $v_c$  – скорость сработки ВБ, м/сут;  $V_H$  – скорость наполнения ВБ, м/сут;  $V_C$  и  $V_H$  – максимальная скорость сработки и наполнения ВБ,  $V_H = 0,5$  м/сут.

Математическая модель осадки каждой марки позволяет прогнозировать значение осадки на любой момент времени в будущем и определять численную оценку  $a_{42}$  результата измерения осадки по табл. 3.7. Пример моделирования хода осадки марки МП-05 представлен на рис. 3.2.

#### *Контроль фильтрации воды пьезометрами*

Данные измерений уровня воды в пьезометрах позволяют определить положение кривой депрессии и градиенты напора фильтрационного пото-

ка, проницаемость тела плотины и основания и характер развития процесса кольматации или фильтрационных деформациях грунтов.

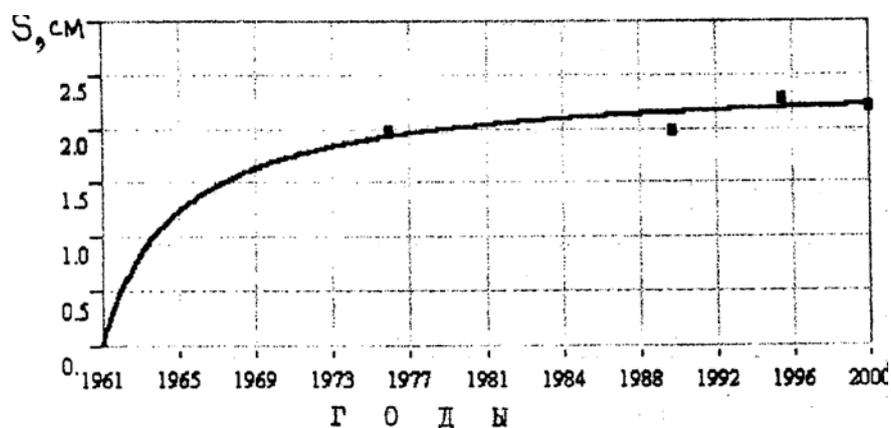


Рис. 3.2. Осадка поверхностной марки МП-05

Для контроля напора фильтрационного потока, работоспособности самого пьезометра и для оценки состояния ГТС по показаниям пьезометра была использована, как наиболее подходящая, линейная математическая модель зависимости уровня воды в пьезометре  $V\Pi$  от уровня воды ВБ ( $V\text{УВБ}$ ):

$$y = a + b x, \quad (3.5)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, параметры математической модели;  
 $x = V\text{УВБ}$  – геодезическая отметка уровня воды ВБ;  
 $y = V\Pi$  – геодезическая отметка уровня воды в пьезометре.

Математическая модель (3.5) позволяет прогнозировать уровень воды в пьезометре, определять среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  результатов измерений от расчетных значений и давать численную оценку  $a_{43}$  результата очередного измерения по таблице 3.8. Пример определения модели (3.2) для пьезометра П-04 приведен на рис. 3.3.

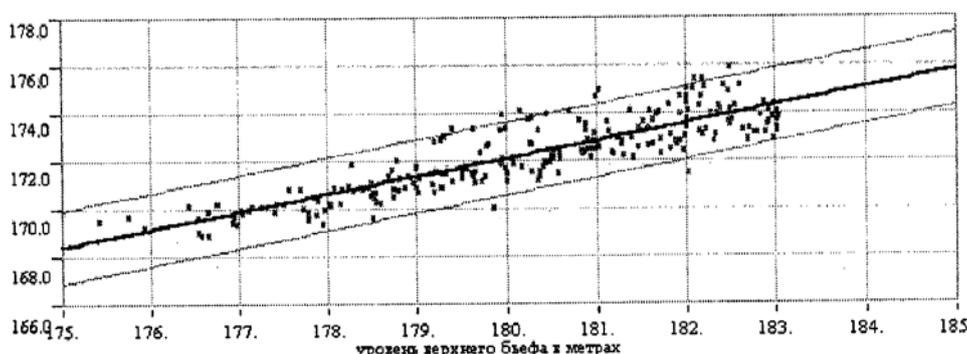


Рис. 3.2. П-04. Зависимость уровня воды в пьезометре от УВБ за 1962-1977 годы

Ранжирование оценок по результатам измерения осадок поверхностных и глубинных марок, уровня воды в пьезометрах и расхода фильтрации

Табл. 3.8

Количественная шкала оценки $a$	Качественная оценка	Равнение результатов измерений $S_i$
$0 \leq a < 1$	Полное соответствие	$ S_i - S_n  \leq \sigma$
$1 \leq a < 2$	Практически полное соответствие	$\sigma <  S_i - S_n  \leq 1,5\sigma$
$2 \leq a < 3$	Приемлемое	$1,5\sigma <  S_i - S_n  \leq 2\sigma$
$3 \leq a < 4$	Допустимое	$2\sigma <  S_i - S_n  \leq 3\sigma$
$4 \leq a < 5$	Предельное	$S_n + 3\sigma < S_i < S_\infty + 2\sigma$
$5 \leq a < 6$	Несоответствие	$S_i < S_\infty + 2\sigma$ или $S_i < S_n - 3\sigma$

$S_i$  – измеренная величина параметра (осадка, уровень воды в пьезометре, расход фильтрации);  $S_\infty$  – предельная величина параметра;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение измеренных величин от прогнозируемых  $S_n$ .

#### *Контроль фильтрационных расходов*

Величина расхода фильтрующейся воды является оперативным и интегральным показателем состояния грунтовой плотины. На Можайском гидроузле имеется один измерительный створ для контроля расхода фильтрующейся воды через левобережную часть грунтовой плотины. Величина расхода  $Q$  зависит от напора  $H = V_{УВБ} - V_{УНБ}$ , то есть от разности уровня воды ВБ ( $V_{УВБ}$ ) и НБ ( $V_{УНБ}$ ). Математическая модель зависимости расхода  $Q$  от напора  $H$  была представлена в виде:

$$Q = a H^b, \quad (3.6)$$

где  $a, b$  – эмпирические коэффициенты – параметры математической модели.

После обработки результатов наблюдений математическая модель (3.6) приняла следующий вид:  $Q = 0,0018H^{2,96}$  л/с, при  $\sigma = 1,265$  л/с.

Полученная математическая модель позволяет прогнозировать результаты очередного измерения расхода фильтрации в зависимости от напора  $H$ , определить среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  результатов наблюдений от расчетных значений и оценить результат очередного измерения расхода  $Q$  по табл. 3.8. Пример определения модели (3.6) приведен на рис. 3.4.

### Визуальный контроль

Визуальные обследования являются оперативным и действенным методом контроля состояния ГТС. Более двух третей всех дефектов на ГТС выявляются визуально при выполнении осмотров. Эффективность визуального контроля зависит от опыта и квалификации наблюдателя, который должен иметь ясное представление о том, что и где он может обнаружить.

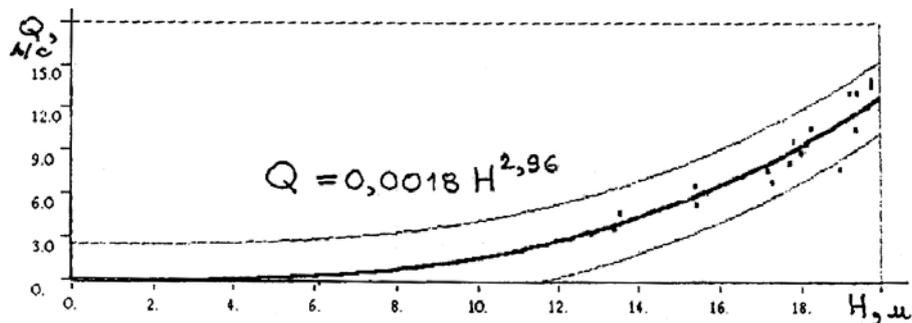


Рис. 3.4. Зависимость расхода фильтрации  $Q$  от напора  $H$

Данная методика численной оценки результатов визуального контроля состояния ГТС Можайского гидроузла основана на следующих принципах:

1. Каждое ГТС (земляная плотина, быстроток) разбивается на объекты диагностирования, для которых приняты определенные виды нарушений.
2. Для каждого объекта диагностирования создается каталог возможных нарушений и аварий, причин их развития.
3. Для каждой аварии и причины составляется сценарий развития опасных процессов от первых признаков проявления до развития их в аварию.
4. Для каждого сценария развития аварии создается перечень качественных признаков и количественных параметров, контролируемых визуально.
5. Составляются таблицы численных оценок состояния объектов диагностирования и ГТС в зависимости от появления новых признаков и степени их развития.

Для земляной плотины качественными признаками ее состояния являются:

- 1) увлажнение откосов; 2) выход воды на поверхность ГТС или его основания; 3) изменение мутности фильтрующейся воды; 4) изменение характера растительности на откосах.

Количественными параметрами состояния земляной плотины, контролируемые визуально, являются: 1) трещины в земле; 2) локальные промоины; 3) деформации поверхности откосов и гребня; 4) пустоты под креплением откосов и его коробление.

Для бетонных ГТС качественными признаками для оценки их состояния являются наличие сколов, каверн, качество поверхности бетона, а количественными параметрами: 1) трещины, их протяженность и направление распространения, величина раскрытия; 2) глубина и площадь каверн; 3) площадь каверн с обнажением арматуры; 4) раскрытие швов и др.

Например, для бетонных ГТС Можайского гидроузла была принята следующая шкала оценок. Для нормально работающих бетонных ГТС (оценки от 0 до 4) допускаются локальные сколы и каверны без обнажения арматуры (оценки от 0 до 3) и с локальным обнажением арматуры (оценки от 3 до 4). При больших площадях обнажения арматуры (от 3–5% до 25–30% площади) оценки от 4 до 5 баллов. При площадях обнажений арматуры более 25–30% и образовании сквозных трещин – оценки свыше 5 баллов.

Для эксплуатационного персонала гидроузла разработаны рекомендации по выполнению численных оценок и действий персонала по предотвращению аварий и своевременного выполнения ремонтных работ.

Данная методика используется на Можайском гидроузле в течение 10 лет и показала свою эффективность.

## **Глава 4. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений (ГТС)**

### **Введение**

Настоящая глава составлена на основе методики с аналогичным названием [14], разработанной Центром безопасности и натурных наблюдений сооружений ГЭС (ЦБН) ОАО «НИИЭС» согласно требованиям Федерального закона 1997 г. «О безопасности гидротехнических сооружений» [1] и апробированной в течение последних 10 лет при декларировании безопасности гидросооружений ГЭС, работающих в системе РАО «ЕЭС России».

В этой главе использовались также последние (2003 г.) рекомендации Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) [12] и крупная научная монография (2004 г.) ученых и специалистов ряда гидроэнергетических компаний Канады, США и стран Западной Европы под названием «Риск и неопределенность в оценке безопасности плотин» [13].

В этой методике установлен порядок, сформулирована терминология и основные методические положения определения критериев безопасности гидросооружений (ГТС) разных типов и классов в период их эксплуатации.

Методика определения критериев безопасности ГТС рекомендуется для применения при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов гидроэнергетики РФ организациями, выполняющими разработку, утверждение и применение критериев безопасности ГТС всех классов.

Действие методики распространяется на все типы гидросооружений: плотины, здания ГЭС, водосбросные, водоспускные, водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы; сооружения, предназначенные для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, берегов и дна русел рек; устройства от размывов на каналах и другие сооружения, предназначенные для использования водных ресурсов и предотвращения вредного воздействия воды, повреждения которых могут привести к возникновению чрезвычайной ситуации.

Методика определяет основные понятия, регламентирует процедуру и последовательность действий при выборе контролируемых и диагностических показателей состояния ГТС при проектировании и эксплуатации, определении их критериальных значений, разработке прогнозных математических моделей, применении качественных характеристик и определяет порядок разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС и общие правила оценки риска аварии эксплуатируемых ГТС в детерминированной и вероятностной формах.

Отличительной особенностью этой методики является введение двух уровней критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС. Превышение первого уровня сигнализирует о наступлении потенциально опасного состояния и требует от эксплуатирующей организации оповещения об этом органа надзора и принятия оперативных мер по переводу ГТС в нормальное состояние. В отличие от первого, превышение второго уровня критериальных значений предусматривает ввод ограничений на режим эксплуатации ГТС (вплоть до снижения действующих нагрузок).

Контроль за ГТС при его эксплуатации может выявить факторы, влияющие на его безопасность, но неучтенные в проекте и при строительстве. Требуемая оперативность и объективность эксплуатационного контроля достигается решением ряда методологических и технических задач, первой из которых является определение критериев безопасности.

Методика контроля безопасности эксплуатируемых ГТС, основанная на сопоставлении отдельных показателей их состояния (диагностических показателей), определяемых по результатам натурных наблюдений, с критериальными значениями контролируемых показателей (критериями безопасности), получила наибольшее распространение в мире [12] и РФ [14].

Наиболее опасные зоны ГТС, состав количественных и качественных показателей, контролируемых при строительстве и эксплуатации, и состав количественных диагностических показателей и их критериальные значе-

ния должны быть определены при разработке проекта согласно требованиям норм по проектированию и должны быть уточнены перед вводом в эксплуатацию и при эксплуатации ГТС. При этом назначаемые в составе проекта критериальные значения диагностических показателей должны быть увязаны со сценариями возможных аварий, опасными зонами ГТС и основными возможными формами их разрушения.

Перечень диагностических показателей должен обеспечивать возможность оперативной оценки эксплуатационного состояния на конкретном ГТС и оперативного принятия мер по обеспечению безопасности с учетом организационно-технических возможностей эксплуатирующей организации. На основе анализа работы ГТС на начальной стадии эксплуатации состав диагностических показателей дополняется рядом новых, неучтенных на стадии проекта, эксплуатационных диагностических показателей состояния, существенных для данного ГТС и условий его эксплуатации.

Определение критериальных значений диагностических показателей для эксплуатируемых ГТС следует осуществлять на основе многофакторного анализа следующей информации:

- результатов сопоставления критериальных значений, разработанных в составе проекта, с контролируемыми на эксплуатируемом ГТС показателями при максимальных фактических силовых воздействиях основного и особого сочетания нагрузок;
- результатов поверочных расчетов наиболее ответственных элементов ГТС с использованием данных о фактических физико-механических характеристиках материалов ГТС и пород основания;
- результатов анализа статистических моделей и расчетов по ним, построенных по данным натурных наблюдений и фактических нагрузок.

Для определения критериальных значений диагностических показателей следует использовать расчеты:

- напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «сооруже-

ние-основание»; в зависимости от типа и конструкции могут решаться задачи теории упругости, ползучести, пластичности, механики хрупкого и пластического разрушения и разделов механики твердых и сыпучих тел;

- устойчивости бетонных ГТС и их оснований на сдвиг;
- температурного НДС состояния ГТС и основания;
- устойчивости откосов плотин из грунтовых материалов;
- по определению пьезометрических уровней и расходов фильтрации;
- по определению пропускной способности водосбросных ГТС;
- запаса отметки гребня ГТС и т.д.

Для повышения эффективности детерминистических расчетов следует осуществлять идентификацию («калибровку») параметров математической модели, т.е. сравнение данных расчетов и натурных наблюдений на предшествующих стадиях эксплуатации и корректировку параметров модели.

Осуществление контроля безопасности ГТС только на основе анализа контролируемых показателей часто затруднительно (в особенности когда ни один из них не достиг предельно допустимого уровня, а процесс накопления повреждений тем не менее развивается). Принципиально более правильной является оценка состояния ГТС на основе применения обобщенных показателей, использующих всю доступную количественную и качественную информацию о состоянии как отдельных элементов ГТС, так и ГТС в целом. Наиболее правильной (с точки зрения теоретической разработки и обоснования) формой обобщенного показателя состояния ГТС (его надежности) является вероятность его безотказной работы за весь срок эксплуатации. Главным преимуществом этой формы является возможность контроля состояния ГТС с учетом его возможной сопротивляемости наступлению разных видов предельного состояния и еще нереализованных экстремальных воздействий (сильное землетрясение, паводок, ветер и т.п.).

#### **4.1. Основные понятия**

*Чрезвычайная ситуация* – обстановка на определенной территории, сло-

жившаяся в результате аварии гидротехнического сооружения, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или ущерб окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение жизнедеятельности людей».

Таким образом, согласно определению, принятому в Федеральном законе [1] и «Методике» [7], чрезвычайная ситуация (ЧС) есть следствие аварии.

**«Безопасность гидротехнических сооружений (ГТС) – свойство гидросооружений, позволяющее обеспечить защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов».**

Определение безопасности ГТС именно как «свойства ГТС» подразумевает возможность количественных оценок безопасности так же, как это делается в отношении таких, например, свойств, как «надежность ГТС».

*Оценка безопасности эксплуатируемого ГТС включает:*

- оценку технической исправности путем сравнения значений диагностических показателей (параметров) с их прогнозируемыми и критериальными значениями (п. 2.5 «Методики»);
- оценку уровня риска аварии (п. 2.13 «Методики»).

«Безопасность ГТС», в отличие от «надежности ГТС», является более общим свойством, так как учитывает последствия возможных аварий ГТС, подразумевает не только исправность, техническую и экологическую надежность ГТС, но и социальную приемлемость для общества определенных человеческих и материальных потерь в результате аварии. Любое гидротехническое сооружение вносит изменения в окружающую среду и может нарушить интересы какой-то группы людей.

**«Критерии безопасности гидросооружения – предельные значения количественных и качественных показателей состояния гидросооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии гидросооружения и утвержденные в установленном порядке федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государ-**

ственный надзор за безопасностью гидросооружений».

В «Методике» критерии безопасности определяются как «значения», выраженные в количественной (или словесной) форме. Учитывая погрешности, неизбежные как при расчетных, так и экспериментальных методах оценки состояния ГТС, при определении безопасности назначается интервал критериальных значений.

*«Авария гидротехнического сооружения – разрушение или повреждение ГТС, вызванные непредвиденными (не предусмотренными проектом и правилами безопасности) ситуациями и сопровождаемые неконтролируемым сбросом воды из водохранилища».*

Согласно «Методике» [14] под аварией на гидросооружении ГЭС понимается событие, приводящее к прорыву напорного фронта гидроузла. В рамках принятого в [1] определения аварии повреждение гидросооружения или его отказ, не приводящие к прорыву напорного фронта, не квалифицируются как авария. Прорыв напорного фронта возможен при нарушении устойчивости, фильтрационной или механической прочности ГТС, входящих в состав напорного фронта. Таким образом, согласно «Методике» [14] под аварией ГТС понимается ситуация, при которой нарушается устойчивость, механическая или фильтрационная прочность ГТС и его основания, а также не обеспечивается пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений что приводит к неконтролируемому сбросу воды.

*«Допустимый уровень риска аварии гидросооружения – значение риска аварии гидросооружения, установленное нормативными документами».*

Современные нормативные документы не устанавливают конкретное значение допустимого уровня риска аварии ГТС. Однако определенная доля риска аварии ГТС остается даже при выполнении всех требований нормативных документов. Указанный уровень риска присущ ГТС, запроектированным в соответствии с требованиями норм.

*«Уровень риска аварии ГТС – характеристика безопасности ГТС, кото-*

рая может быть представлена в вероятностной форме либо в форме детерминистического показателя (уровня безопасности ГТС), характеризующего степень отклонения состояния ГТС и условий его эксплуатации от требований нормативных документов».

Уровень риска является обобщенным, интегральным показателем безопасности ГТС в целом. Этот показатель позволяет также сравнивать между собой уровень безопасности различных сооружений.

Вероятностная форма оценки безопасности ГТС в большей мере применима для стадии разработки проекта. На стадии эксплуатации большое значение имеют оценки состояния ГТС, выполняемые на основании данных инструментальных и визуальных натуральных наблюдений, данных об условиях эксплуатации и т.п., которые трудно (если не невозможно) представить в вероятностной форме.

*«Контролируемые показатели – измеренные на данном ГТС с помощью технических средств или вычисленные на основе измерений количественные характеристики, а также качественные характеристики его состояния».*

Контроль безопасности (технической исправности) ГТС осуществляется путем организации натуральных измерений и наблюдений. Техническое обеспечение натуральных измерений составляют: контрольно-измерительная аппаратура (КИА), устанавливаемая на сооружениях, а также средства автоматизированного сбора показаний КИА. Наряду с техническим обеспечением на ГТС имеется информационное и программное обеспечение контроля – базы данных для хранения результатов наблюдений, измерений и программные средства для обработки и анализа данных измерений. Требования к техническому, информационному и программному обеспечению натуральных наблюдений приведены в разделе 6 «Методики» [14].

Установленная на ГТС контрольно-измерительная аппаратура (КИА) в циклическом режиме (или в режиме реального времени) измеряет текущие значения ряда показателей (перемещений, деформаций, напряжений, тем-

ператур, расходов фильтрации, пьезометрических напоров и т.д.).

По измеренным показателям вычисляются градиенты температур и пьезометрических напоров, интенсивность изменения фильтрационных расходов, величина противодействия, напряжения и т.п.

*«Контролируемые показатели – совокупность всех наблюдаемых, а также измеренных с помощью технических средств и вычисленных по ним количественных показателей состояния ГТС, а также качественных показателей, полученных наблюдениями на сооружениях».*

*«Диагностические показатели – наиболее значимые для диагностики и оценки безопасности состояния ГТС контролируемые показатели, позволяющие дать оценку безопасности и состояния системы «сооружение – основание – водохранилище» в целом или отдельных ее элементов».*

Диагностические показатели назначаются из числа контролируемых (как количественных, так и качественных) показателей состояния. Для крупных ГТС, имеющих несколько сотен, а то и тысяч измерительных устройств и пунктов наблюдений, доля диагностических показателей составляет обычно не более 10–20% от общего числа контролируемых показателей. Диагностические показатели назначаются в наиболее ответственных (или «опасных») зонах ГТС. Перечень диагностических показателей может изменяться в процессе эксплуатации ГТС.

Диагностические показатели выбираются из совокупности контролируемых показателей в соответствии с рекомендациями п. 2.11 «Методики» [14]. Для диагностических показателей определяются критериальные значения. Анализ остальных контролируемых показателей производится при обнаружении отклонений от нормальной работы ГТС, зафиксированных при помощи диагностических показателей.

#### **Критерии состояния ГТС:**

*K1* – первый (предупреждающий) уровень значений диагностических показателей, при достижении которого устойчивость, механическая и

фильтрационная прочность ГТС и его основания, а также пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений еще соответствуют условиям нормальной эксплуатации.

В условиях нормальной эксплуатации выполняются все основные требования нормативных документов и правил технической эксплуатации в течение длительного времени, сопоставимого со сроком службы сооружения.

$K_2$  – второй (предельный) уровень значений диагностических показателей, при превышении которых эксплуатация ГТС в проектных режимах недопустима.

Проектные режимы определяют, прежде всего, сочетания (основное и особое) воздействий и нагрузок, предусмотренные проектом. При превышении измеренными значениями диагностических показателей состояния ГТС их критериальных значений  $K_2$  недопустима эксплуатация при любом из предусмотренных проектом сочетаний воздействий.

Величины  $K_1$  и  $K_2$  должны контролироваться согласно условиям эксплуатации ГТС и действующими нагрузками при этих условиях.

#### **Эксплуатационные состояния сооружений:**

- *нормальное* – состояние ГТС, при котором ГТС соответствует требованиям действующих нормативных документов и проекта, при этом значения диагностических показателей состояния ГТС не превышают своих критериальных значений  $K_1$ ;

- *потенциально опасное* – состояние, при котором значение хотя бы одного диагностического показателя стало больше (меньше) 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 ГТС может ограниченное время эксплуатироваться согласно указаниям п. 7.2 «Методики» [14];

- *предаварийное* – состояние, при котором значение хотя бы одного диагностического показателя стало больше (меньше) второго (предельно допустимого) уровня критериальных значений (значений  $K_2$ ); в этом случае эксплуатация ГТС в проектных режимах недопустима без оперативного проведения мероприятий по восстановлению требуемого уровня безопасности и без разрешения органа надзора (п. 7.3 «Методики» [14]).

Таким образом, согласно «Методике» [14] допустимых групп возможных состояний ГТС три – нормальное, потенциально опасное, предаварийное. Недопустимой группой состояний ГТС является аварийное состояние.

Практика эксплуатации ГТС такова, что, несмотря на наличие неисправностей, они продолжают эксплуатироваться и обнаруженные неисправности устраняются. Поэтому для ГТС более правильным являются принятые в «Методике» [14] три, а не две группы возможных состояний.

#### **4.2. Общие положения методики**

*«2.3. В соответствии со ст. 9 Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» собственник ГТС и эксплуатирующая организация обязаны: «систематически анализировать причины снижения уровня безопасности ГТС и своевременно осуществлять разработку и реализацию мер по обеспечению технически исправного состояния ГТС и его безопасности, а также по предотвращению аварии ГТС».*

Введение не одного, а двух уровней критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС обеспечивает возможность своевременного принятия мер по ликвидации потенциально опасного и предотвращению предаварийного (и аварийного) состояний сооружения.

*«2.5. Оперативную оценку эксплуатационного состояния ГТС и его безопасности следует осуществлять путем сравнения измеренных (или вычисленных на основе измерений) количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями  $K_1$  и  $K_2$  и с прогнозируемым интервалом изменения диагностических показателей».*

Таким образом, согласно [1], критериальные соотношения имеют вид:

а) состояние сооружения нормальное (исправное), если

$$F_{\text{изм}} \leq K1 \quad (4.1)$$

б) состояние сооружения потенциально опасное, если

$$K1 < F_{\text{изм}} < K2 \quad (4.2)$$

в) состояние сооружения предаварийное, если

$$F_{\text{изм}} > K2 \quad (4.3)$$

где  $F_{\text{изм}}$  – измеренное значение диагностического показателя;  $K1, K2$  – числа (критерии), достижение которых хотя бы одним диагностическим показателем будет означать переход из одного состояния в другое.

Кроме процедуры сравнения измеренных (вычисленных) показателей с их критериальными значениями, диагностический контроль включает сравнение измеренного диагностического показателя с прогнозируемым его значением. То есть кроме проверки выполнения (или невыполнения) условий (4.1)–(4.3), следует контролировать попадание диагностического показателя в доверительный интервал, прогнозируемый для реально действующих на момент проверки нагрузок:

$$F_{\text{прог}} - \delta \leq F_{\text{изм}} \leq F_{\text{прог}} + \delta, \quad (4.4)$$

где  $F_{\text{изм}}$  – измеренное значение диагностического показателя;  $F_{\text{прог}}$  – значение диагностического показателя, прогнозируемого для реальных нагрузок и воздействий детерминистической или статистической прогнозной моделью;  $\delta$  – допускаемая погрешность прогнозной модели.

*Примечание.* Обе проверки – сравнение с критериями (4.1)–(4.3) и критерием (4.4), меняющимся в зависимости от реальных нагрузок и воздействий, – должны быть обязательными. Они являются необходимыми и достаточными условиями безопасности. Действительно, при использовании лишь критерия (4.4), как это иногда предлагается, возможна ситуация, когда построена весьма точная прогнозная модель для диагностического показателя (например, для необратимого наклона плотины в НБ). Благодаря точности модели измеряемый показатель (наклон) будет попадать в прогнозируемый интервал. Однако может наступить момент, когда при «сбывающемся» прогнозе плотина наклонится настолько, что потеряет устойчивость и опрокинется. От этого могут гарантировать только условия типа (4.1)–(4.3). Использование только критериев (4.1)–(4.3) также не может гарантировать безопасности. Предположим, что угол наклона верховой грани плотины ограничен из условия устойчивости на опрокидывание:  $K2 = \varphi = 1^\circ$  (примем, что при УМО  $\varphi = 0$ ). Такой угол поворота можно допустить только при экстремальных воздействиях (например, при нагрузках и воздействиях особого сочетания при УВБ, равном ФПУ). Предположим, что при диагностическом контроле измеренный угол составил  $\varphi_{\text{изм}} = 0,9^\circ$ , т.е. условие

(4.2) соблюдено:  $0,9^\circ < 1,0^\circ$ , и формально состояние плотины будет оценено как нормальное. Однако не исключено, что  $\phi_{\text{изм}}=0,9^\circ$  было замерено при УВБ более низком, чем ФПУ, например, при половине гидростатического давления ВБ. Очевидно, что при дальнейшем росте УВБ условие (4.2) может быть нарушено. При половинной нагрузке и линейно упругой работе сооружения ожидаемый угол должен быть не более  $0,5^\circ$ . Только наличие проверки (4.4) может гарантировать от ошибочной диагностики при использовании только критериев (4.1)–(4.3). Проверка (4.4) позволяет обнаружить отклонения от нормальной (прогнозируемой) работы до достижения нагрузками и воздействиями максимальных значений и принять меры по устранению возможных неисправностей.

*«2.6. Для сооружений четвертого класса, а также при специальном обосновании для сооружений третьего класса допускается устанавливать один уровень критериальных значений  $K2$ ».*

Наличие первого (предупреждающего) уровня критериальных значений диагностических показателей обеспечивает повышение уровня безопасности сооружений, т.к. дает возможность своевременного осуществления мероприятий по предотвращению аварий. Однако реализация двухуровневой системы критериев безопасности требует более высокой квалификации эксплуатационного персонала, что обычно не обеспечивается на ГТС.

*«2.7. Количественные значения  $K1$  и  $K2$  диагностических показателей следует устанавливать на основе расчетов и оценок реакции сооружения при основном и особом сочетании нагрузок, соответственно. Состав нагрузок в сочетаниях и способ их определения должны быть установлены для конкретного сооружения нормативными документами и проектом и уточнены на стадии эксплуатации с учетом изменений в требованиях нормативных документов».*

Данным пунктом определен лишь способ назначения критериальных значений  $K1$  и  $K2$ . События, соответствующие особому сочетанию воздействий, более редки и применительно к ним нормами допускаются некоторые нарушения условий нормальной эксплуатации сооружений. Как правило, реакция сооружения на действие нагрузок особого сочетания более значительна и, соответственно, значения  $K2$  являются определяющими по

сравнению с  $K1$ . Однако применительно к конкретному сооружению возможны ситуации (в том числе из-за различных сочетаний нормативных коэффициентов надежности, используемых в расчетах на основное и особое сочетание воздействий), когда  $K1$  оказывается определяющим по сравнению с  $K1$ . В этих случаях следует в качестве  $K2$  принимать более опасное для сооружения значение диагностического показателя.

*«2.9. В период эксплуатации для корректировки состава и критериальных значений  $K1$  и  $K2$  диагностических показателей следует использовать, кроме результатов расчетов, данные натурных наблюдений за время строительства и эксплуатации, а также результаты анализа опыта эксплуатации данного ГТС и аналогичных по конструкции и условиям эксплуатации ГТС. В целях прогноза изменения показателей и возможно более точной их корректировки статистическими и детерминистическими методами должна быть разработана математическая модель ГТС».*

Основным способом назначения критериальных значений  $K1$  и  $K2$ , в соответствии с данной «Методикой», является расчетное определение реакции сооружения в заданных для контроля точках сооружения. При наличии достаточно представительного ряда натурных наблюдений эти данные используются как для корректировки результатов расчета, так и для построения статистических моделей. В случае ограниченного объема данных натурных наблюдений на конкретном сооружении для построения статистических моделей могут при соответствующем обосновании дополнительно привлекаться результаты наблюдений на сооружениях-аналогах.

*«2.11. Измеряемый (вычисляемый по результатам измерений) контролируемый показатель, выбранный в качестве диагностического показателя, должен отвечать следующим условиям:*

- *диапазон изменения значений показателя при нормальном эксплуатационном состоянии должен в несколько раз превосходить погрешность измерительной системы;*

- *диагностический показатель должен поддаваться прогнозу с помощью детерминистических или статистических прогнозных моделей».*

При выборе диагностических показателей из всей имеющейся совокупности контролируемых показателей рекомендуется, чтобы диагностические показатели обладали следующими свойствами:

- диагностический показатель должен быть достаточно «чутким» к изменению внешних воздействий на сооружение (например, если контролируемый показатель «не реагирует» на изменение УВБ и температур окружающей среды, то вряд ли он пригоден в качестве диагностического);

- в диапазоне изменения внешних воздействий при нормальной эксплуатации сооружения (например, при изменении УВБ от УМО до НПУ) амплитуда (размах) изменения показателя, выбранного в качестве диагностического, должен в несколько раз превосходить погрешность измерения (вычисления) этого показателя; в противном случае замер будет соизмерим с погрешностью, и диагностика будет недостоверной;

- состав диагностических показателей должен быть, по возможности, полным, таким, чтобы контролировать все возможные сценарии повреждений и отказов;

- во избежание ложной тревоги желательно, чтобы один и тот же диагностический показатель измерялся не одним, а двумя независимыми измерительными преобразователями.

*«2.12. Порядок разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей представлен в Приложении 1. Перечень контролируемых количественных и качественных показателей состояния и условий эксплуатации ГТС, а также перечень контролируемых нагрузок на сооружение, приведен в Приложении 2».*

*«2.13. Наряду с оценкой безопасности на основе сравнения измеренных значений диагностических показателей с их критериальными и прогнозируемыми значениями, оценка безопасности ГТС включает оценку уровня*

*риска аварии. Для этой цели должна быть построена иерархическая система факторов безопасности и выполнена оценка уровня риска аварии в детерминистической и (или) вероятностной форме (Приложение 3). Как правило, оценка уровня риска аварии должна выполняться при составлении декларации безопасности ГТС».*

Диагностика состояния эксплуатируемого ГТС на основе сопоставления диагностических показателей состояния с их критериальными значениями – это наиболее распространенный в России метод диагностики. Однако более обоснованное суждение о состоянии ГТС может быть составлено на основе привлечения всего комплекса имеющейся информации. Комплексная оценка состояния ГТС может быть выполнена в форме оценки уровня риска аварии в детерминистической и (или) вероятностной постановке.

Выбор количественного показателя, определяющего уровень риска аварии ГТС, а также вычисление выбранного показателя для конкретного ГТС являются сложными задачами, не получившими общепринятого решения. Имеется ряд предложений по вычислению уровня риска аварии ГТС, два из которых рекомендованы в Приложении 3 «Методики» [14].

Первый из рекомендованных способов дает экспертную оценку уровня безопасности ГТС в безразмерной (балльной) шкале. Для каждого сценария возможной аварии определяется перечень действующих факторов безопасности, эти факторы ранжируются по значимости, экспертным путем определяется значение каждого фактора и по определенному правилу (формуле) строится общая балльная оценка уровня безопасности ГТС. Детальный комплексный анализ всей доступной информации о состоянии ГТС практически всегда возможен (и должен быть выполнен) при диагностике «нормального» и «потенциально опасного» состояния, т.е. в тех случаях, когда еще имеется (в отличие от случая диагностики «предаварийного состояния») запас времени для такого анализа, принятия и реализации технических и организационных мероприятий по предотвращению аварии.

### 4.3. Определение критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС

3.1. Проектное обоснование прочности и устойчивости ГТС и их оснований должно быть выполнено из условия недопущения предельных состояний» согласно СНиП 33-01-2003, другим СНиП и пособию [16-20]:

$$\gamma_{lc} F \leq \gamma_c R / \gamma_n, \quad (4.5)$$

где  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения;

$\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетаний нагрузок;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;

$F$  – расчетное значение обобщенного силового воздействия;

$R$  – расчетное значение обобщенной несущей способности.

«3.2. На стадии проекта состав и критериальные значения диагностических показателей  $K1$  и  $K2$  следует определять на основе анализа результатов расчетов и экспериментальных исследований фильтрационного, гидравлического и температурного режимов, НДС, прочности и устойчивости ГТС на основное и особое сочетания нагрузок (Приложение 4), а также анализа прочностных, деформационных и фильтрационных характеристик материала».

Основными причинами аварий на ГТС являются:

- нарушение механической прочности сооружений напорного фронта или их оснований;
- превышение допустимых величин деформаций;
- нарушение фильтрационной прочности;
- потеря устойчивости;
- недостаточная пропускная способность водосбросных сооружений.

В соответствии с действующими нормами при проектировании рассматриваются две группы сочетаний нагрузок и воздействий: основные, особые отдельно для строительного и эксплуатационного периодов. Рекомендуемый перечень нагрузок и воздействий и образуемых ими сочетаний приведен в соответствующих нормах для расчетного и ремонтного случаев. «Основные сочетания включают постоянные, временные длительные и

кратковременные нагрузки и воздействия. Особые сочетания включают постоянные, временные длительные и кратковременные нагрузки и воздействия и одну (одно) из особых нагрузок и воздействий» (п. 5.2 в [11]). К особым относятся нагрузки и воздействия более редкой повторяемости.

Возможным, но недопустимым состоянием ГТС является аварийное состояние. Недопустимость аварийного состояния при проектировании обеспечивается системой расчлененных коэффициентов надежности. Система этих коэффициентов осуществляет переход от нормативных нагрузок и физико-механических свойств материалов к расчетным нагрузкам и свойствам материалов. Таким образом, в проектных расчетах фигурируют не нормативные, а немного завышенные (расчетные) нагрузки и немного заниженные (расчетные) значения несущей способности. Под нормативными приняты нагрузки и физико-механические параметры материалов, полученные статистической обработкой лабораторных или натуральных данных.

Левая часть формулы 4.5, представляющая значение обобщенной несущей способности, представляет собой систему критериальных значений  $K1$  и  $K2$  воздействий на ГТС в виде гидростатической нагрузки, температуры, противодействия, пьезометрических уровней и т.д. Правая часть этого неравенства представляет собой реакцию ГТС на эти воздействия (напряжения в бетоне, контактные напряжения, вертикальные (осадки) и горизонтальные перемещения, расходы фильтрации и др). Критериальные значения  $K1$  и  $K2$  одного и того же показателя могут быть разными для разных зон сооружения. При этом максимальные значения их не должны превышать расчетных значений сопротивления материала ГТС с учетом коэффициентов условий работы и надежности. Например, максимальные критериальные значения сжимающих напряжений в бетоне определяются как:

$$R_{сжс}(K1) = R_{сжс}/\gamma_n \text{ и т.д.,} \quad (4.6)$$

где  $R_{сжс}$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности.

*«3.3. На основе анализа результатов натуральных наблюдений и опыта*

эксплуатации ГТС должны быть осуществлены корректировка и дополнение критериальных значений  $K1$  (а в случае необходимости и  $K2$ ) диагностических показателей с использованием:

- результатов прогноза, который выполнен на основании статистических моделей, сформированных по данным натурных наблюдений;
- поверочных расчетов по «откалиброванным» на основе натурных наблюдений детерминистическим математическим моделям, применительно к уточненным расчетным схемам ГТС, уточненным расчетным значениям параметров свойств материалов и пород оснований, а также параметров основного и особого сочетаний нагрузок».

«3.4. На основе анализа работы ГТС на стадии эксплуатации следует также определить состав и критериальные значения  $K1$  и  $K2$  (аналогичных по назначению критериям  $K1$  и  $K2$ ) качественных диагностических показателей состояния ГТС (раздел 5)».

«3.5. Для ГТС, измеренные значения диагностических показателей которых оказались значительно ниже расчетных значений, определенных на стадии проекта, и в случае отсутствия результатов уточненных расчетов эксплуатируемого ГТС критериальные значения показателей следует принимать по прогнозным статистическим моделям. При этом эти статистические модели следует применять, как правило, в пределах диапазона нагрузок и воздействий, испытанных ГТС в процессе эксплуатации».

Указания данного пункта «Методики» особенно актуальны для ГТС, построенных с большими запасами по отношению к реальным воздействиям, действующим при эксплуатации (ГТС, возведенные не на полную высоту и эксплуатируемые в таком состоянии; ГТС, запроектированные для особых условий, включая специальные воздействия и др.).

В этих случаях прогнозные статистические модели следует применять, прежде всего, для назначения критериальных значений  $K1$ . Для назначения  $K2$  следует обычно применять детерминистические расчетные модели.

*«3.6. В случае превышения одним или несколькими диагностическими показателями критериального значения  $K_1$ , определенного на стадии проекта и уточненного расчетом на стадии эксплуатации (и в случае отсутствия указанных уточненных расчетных данных), допускается на период проведения мероприятий, предусмотренных п. 7. 2 «Методики», осуществлять прогноз поведения ГТС на основе статистических моделей».*

Формулировка «допускается на период проведения мероприятий ... осуществлять прогноз поведения ГТС на основе статистических моделей» связана с тем, что часто превышение уровня  $K_1$  может быть вызвано действием нагрузок, ранее не испытанных ГТС. При этом реакция на действие этих нагрузок не вполне точно отражена статистической моделью.

С другой стороны, превышение уровня  $K_1$  в ряде случаев (включая «смелые» проектные решения) сопровождается необратимыми процессами в теле ГТС и его основании, которые не всегда точно могут быть описаны современными методами расчета ГТС (детерминистические методы расчета). В этом случае также могут быть полезны статистические модели.

*«3.7. Диагностику «потенциально опасного» и тем более «предаварийно-го» эксплуатационного состояния ГТС следует осуществлять на комплексной основе, с привлечением измерений всех диагностических показателей, в особенности таких, как параметры фильтрационного режима (расходы, величины противодавления, положение поверхности депрессии, градиенты напора) и характеристики трещинообразования в бетонных плотинах, а также с привлечением статистических прогнозных моделей и качественных диагностических показателей».*

Здесь подразумевается уточнение диагностики состояния ГТС, осуществляемом после принятия решений по предотвращению возможной аварии.

#### **4. 4. Прогнозные математические модели ГТС**

*«4.1. Для целей диагностики, прогноза состояния и определения эксплуатационных ситуаций следует использовать три типа математических*

моделей: статистические; детерминистические; смешанные».

«4.2. Статистические прогнозные модели следует применять для всех измеряемых диагностических показателей при наличии достаточного временного ряда измерений в диапазоне нагрузок, ранее испытанных ГТС».

«4.3. При построении статистической модели должны быть осуществлены следующие действия:

- из временного ряда измерений формируется базовая последовательность измерений  $\{F_{\text{изм}}\}$ ;
- выбирается прогнозирующая функция  $F_{\text{прог}}$  (например, в случае прогноза НДС бетонной плотины, в виде  $F_{\text{прог}}=F(Z, T, t)$  – как правило, многочлена с неопределенными коэффициентами, где:  $Z$  – отметка УВБ;  $T$  – наружная температура;  $t$  – время, отсчитываемое от начала измерений);
- методом наименьших квадратов вычисляют коэффициенты многочлена;
- определяется погрешность прогноза  $\delta=k\sigma$  (где  $\sigma$  – среднеквадратичная погрешность прогноза,  $k=1, 2, 3$  – целые числа; при  $k=3$  вероятность попадания  $F_{\text{изм}}$  в интервал значений  $F_{\text{прог}}\pm \delta$  составляет 99%);
- оценивается значимость коэффициентов многочлена и отбрасываются малозначимые члены;
- построенная прогнозная статистическая модель проверяется на данных измерений, не входивших в базовую последовательность, и, в случае необходимости, осуществляется корректировка модели».

«4.4. Модель следует передать эксплуатирующей организации в виде формулы для вычисления  $F_{\text{прог}}$ , либо в виде таблиц, графиков или компьютерных программ, с помощью которых по текущим значениям аргументов вычисляется величина  $F_{\text{прог}}$  и ее погрешность».

В период нормальной эксплуатации нагрузки и воздействия на ГТС меняются во времени (изменяется УВБ, температура окружающей среды и т.д.). При использовании (4.4) диагностические показатели определяются из детерминистических расчетов не на реальные переменные во времени

нагрузки, а на условные, гипотетические сочетания нагрузок, при которых к сооружению приложены постоянные нагрузки, увеличенные за счет умножения на коэффициенты перегрузки. Сравнение измеренных при натуральных наблюдениях диагностических показателей с критериальными значениями не может дать информации о близости измеренных и прогнозируемых значений диагностических показателей из-за различия нагрузок и воздействий, при которых измерялись и вычислялись эти диагностические показатели. Эту информацию дает сравнение измеренных значений диагностических показателей с их прогнозируемыми значениями.

*«4.6. Детерминистическая (расчетная) модель, разработанная на стадии проекта, может использоваться на стадии начальной эксплуатации для прогноза при текущих, реальных на момент проверки воздействиях на ГТС. Для этого следует выполнить расчеты как на экстремальные, так и на промежуточные воздействия при реальных (определенных на стадии возведения ГТС) характеристиках материалов ГТС и основания».*

В целях раннего обнаружения отклонений от проектной работы оценка эксплуатационного состояния ГТС, наряду со сравнением диагностических показателей с критериальными значениями, предусматривает сравнение измеренных диагностических показателей с прогнозируемым интервалом их изменения (п. 2.5 «Методики»). Проверяется выполнение неравенства (1.4). На стадии проектирования прогнозируемые значения диагностических показателей определяются из расчетов в рамках проектных расчетных моделей на текущие («реальные») нагрузки и воздействия.

Для повышения достоверности диагностического контроля и раннего обнаружения отклонений работы ГТС от требований проекта рекомендуется:

- наряду с проектными расчетами на основные и особые сочетания нагрузок, выполнить ряд расчетов на действие «промежуточных» нагрузок и представить результаты в табличной форме или в графиках; под промежуточными понимаются характерные нагрузки, интенсивность которых ле-

жит в интервале изменения нагрузок при нормальной эксплуатации ГТС;

- таблицы (графики) с данными расчетов на «промежуточные» нагрузки включать в «Декларацию безопасности ГТС» в качестве прогнозной модели; прогнозируемые значения диагностических показателей для текущих нагрузок следует определять с помощью интерполяции данных таблиц.

Для ГТС I и II классов рекомендуется иметь постоянно действующую детерминистическую расчетную модель, позволяющую в день проверки состояния ГТС выполнить расчет на нагрузки, действовавшие на момент проведения измерений. Постоянно действующая математическая модель подготавливается проектной организацией и передается службе эксплуатации для использования при оперативном контроле состояния ГТС.

При постоянных нагрузках на ГТС естественным прогнозом будет стабильность значений диагностических показателей во времени. Поэтому для ГТС, которые эксплуатируются под действием нагрузок, мало меняющихся во времени (например, при постоянном УВБ), прогнозная модель очевидна и не требует построения: неизменность показаний КИА во времени с точностью до погрешности измерений.

4.7. С использованием данных натуральных наблюдений необходимо проверить следующие гипотезы детерминистической модели:

- гипотезу о сплошности ГТС и основания (при обнаружении трещин или иных несплошностей, соизмеримых с разрешающей способностью применяемого МКЭ, эти несплошности следует включать в расчетную модель);
- гипотезу материала (должен быть определен общий вид уравнений, характеризующих свойства материалов сооружения и пород основания при расчетах НДС, фильтрационного и температурного режима);
- гипотезу формы (ее подтверждение натурными измерениями, например, гипотезы плоских сечений, позволяет сократить размерность задачи).

4.8. Калибровка расчетной модели, прошедшей проверки п. 4.7, ведется по данным натуральных наблюдений и заключается в следующем:

- принятые в проекте значения характеристик материалов ГТС и пород основания варьируются (им даются некоторые приращения);
- выполняют серию расчетов при различных характеристиках и для каждого расчета вычисляется невязка между расчетными и измеренными показателями состояния (перемещениями, напряжениями, расходами);
- по величине невязки для каждой серии расчетов выбирается первое приближение к калиброванной модели – в качестве новых значений характеристик выбираются те, для которых невязка между расчетными и измеренными значениями наименьшая из всех выполненных расчетов;
- калибровку можно продолжить, дав характеристикам модели первого приближения новые вариации и выполнив новую серию расчетов.

*«4.9. Для оценки погрешности детерминистической модели следует выполнить серию или ряд расчетов при одинаковых воздействиях, варьируя параметры модели в диапазоне их возможного изменения (а также густоту и конфигурацию сетки при применении метода конечных элементов)».*

В неравенство (4.4) входят не только измеренные и прогнозируемые значения диагностических показателей, но и погрешность прогнозной модели  $\delta$  (а также в неявной форме погрешности измерения и вычисления диагностического показателя). Точное вычисление погрешности  $\delta$  не представляется возможным. Возможна лишь приближенная оценка точности прогнозной модели путем внесения в нее разумных вариаций. Например, расчет напряжений и перемещений производился при фиксированном модуле деформации основания  $E_o$ ; пусть погрешность определения  $E_o$  известна и составляет величину  $\Delta E$ ; выполнив расчеты при модулях  $E_o + \Delta E$ , можно оценить погрешность прогнозной модели по модулю деформации основания. При использовании метода конечных элементов (МКЭ) расчет выполняется на сетке элементов определенной густоты и конфигурации. Известно, что приближенное решение по МКЭ стремится к точному при стремлении шага сетки элементов к нулю. Поэтому оценить точность решения

по МКЭ можно, изменив конфигурацию или сгустив сетку элементов.

4.10. Смешанные прогнозные модели следует применять в случаях, когда прогноз реального поведения ГТС на основе статистической или детерминистической модели оказывается неточным – в этом случае для разных диапазонов нагрузок и временных интервалов следует применять различные модели (например, для описания обратимых перемещений ГТС может быть использована детерминистическая модель, а для необратимых, в том числе связанных с реологическими процессами, – статистическая).

***Процедура назначения и уточнения критериев безопасности включает следующие этапы на стадии разработки проекта:***

1. Разработка конструктивных решений ГТС и их обоснование расчетами по первому и второму предельным состояниям. Определение в проекте состава диагностических показателей состояния ГТС. Определение для принятых диагностических показателей значений  $K_1$  и  $K_2$  даны в [1, 11-14].

2. Выполнение поверочных детерминистических расчетов ГТС при основном и особом сочетаниях нагрузок. Выбор расчетной модели, методик расчетов, а также назначение расчетных случаев должны осуществляться с учетом сценариев возможных аварий на ГТС. По результатам расчетов определяется реакция ГТС в контролируемых точках и на этой основе уточняются значения  $K_1$  и  $K_2$  для диагностических показателей состояния ГТС.

***На стадии эксплуатации:***

3. Корректировка детерминистических расчетных моделей ГТС по данным натурных наблюдений при эксплуатации (уточнение сценариев аварий и соответствующих сочетаний нагрузок, калибровка математических моделей, проведение поверочных расчетов, уточнение  $K_1$  и  $K_2$  по расчетам на основное и особое сочетание нагрузок, уточненных при эксплуатации).

4. Обработка данных натурных инструментальных наблюдений и построение статистических моделей. Определение на основе применения статистических моделей значений  $K_1$  и, в случае необходимости (при отсутст-

вии или несовершенстве соответствующих выбранным сценариям детерминированных методов расчета) значений  $K2$ . Определение доверительно-го интервала, в котором должны находиться значения диагностических показателей при нагрузках, меньших нагрузок основного сочетания.

5. Назначение состава и определение значений качественных диагностических показателей состояния ГТС.

#### **4. 5. Применение качественных характеристик состояния ГТС при определении критериальных значений диагностических показателей**

5.1. При определении эксплуатационного состояния ГТС наряду с измеренными (вычисленными) количественными диагностическими показателями следует контролировать по визуальным наблюдениям и экспертным оценкам качественных диагностических показателей (*Приложение 2*)

5.2. Следует учитывать следующие отличия в определении критериальных значений качественных диагностических показателей  $K1$  и  $K2$  (аналогичных по смыслу критериальным значениям количественных показателей  $K1$  и  $K2$ , соответственно) на стадиях разработки проекта и эксплуатации:

- на стадии проекта и начальной эксплуатации ГТС следует установить список качественных диагностических показателей  $K1$  и  $K2$ , который устанавливают эксперты на основе обобщения опыта эксплуатации аналогичных ГТС и анализа прогноза изменения состояния ГТС под действием износа и старения материалов, природных и технологических нагрузок;
- при эксплуатации (раз в 5 лет) следует выполнить обследование ГТС и на основе данных натурных наблюдений и с учетом эксплуатации ГТС и изменения его состояния экспертным методом откорректировать список этих показателей и определить их критериальные значения  $K1$  и  $K2$ .

5.3. Критериальные значения  $K1$  и  $K2$  качественных диагностических показателей, контролируемых визуально, определяют экспертным методом:

- должна быть создана группа экспертов из представителей эксплуатирующей и проектной организаций и из специалистов по эксплуатации ГТС,

строительным материалам, геологии, фильтрации и др.;

- группа экспертов составляет перечень сценариев всех возможных аварий ГТС с учетом его конструктивно-эксплуатационных особенностей и определяет деструктивные процессы (деформаций, коррозии, износа, старения, протечек, суффозии и др.), которые могут привести к аварии ГТС;
- из анализа влияния деструктивных процессов на состояние ГТС экспертная группа определяет качественные диагностические показатели и их критериальные значения  $K1$ , соответствующие нормальной эксплуатации;
- для каждого сценария потенциально возможной аварии определяются качественные диагностические показатели и их критериальные значения  $K2$ , соответствующие началу развития аварийного состояния.

5.4. При определении эксплуатационного состояния ГТС и детерминированной оценке уровня безопасности ГТС (*Приложение 3*) необходимо учитывать на экспертной основе следующие обстоятельства (*Приложение 2*):

- изменения (включая существенные) исходных данных, технических решений, нормативных требований, методов расчетов, принятых при проектировании ГТС, а также наличие и влияние условий эксплуатации, не предусмотренных в проекте;
- изменение при эксплуатации свойств материалов гидросооружений и пород оснований, а также проектных уровней нагрузок;
- недостатки в организации эксплуатации ГТС.

#### **4. 6. Требования к организации натуральных наблюдений**

6.1. Учет представленных в этом разделе требований необходим для обеспечения оперативности и эффективности контроля состояния ГТС с использованием диагностических показателей и их критериальных значений.

6.2. Измерительная аппаратура в сооружении должна быть размещена таким образом, чтобы для каждого критериального значения показателя имелась соответствующая ему измеренная величина показателя.

6.3. Измерительные преобразователи должны быть установлены в первую

очередь в тех зонах или точках, которые наиболее «чувствительны» к изменениям состояния конструкции или в которых по данным расчетов показатели имеют максимальные значения.

К таким зонам следует отнести: трещины и разломы в скальных основаниях, участки слабых пород, контакт «бетон–скала», примыкания к скальным бортам плотин, температурно-осадочные и блочные швы бетонных и железобетонных ГТС, гребни и зоны сопряжения с основанием наиболее высоких участков плотин из грунтовых материалов, зоны возможной контактной фильтрации, сопряжения бетонных и земляных сооружений и др.

6.4. Учитывая возможность преждевременного выхода из строя отдельных измерительных преобразователей и с целью повышения достоверности данных измерений в неоднородных материалах, в указанных зонах ГТС и их основаниях измерительные преобразователи следует устанавливать группами по 2–3 шт., дублировать измерения разными способами.

6.5. Измерения контролируемых показателей состояния ГТС должны выполняться возможно более простыми и надежными средствами. В случае применения недостаточно долговечных измерительных средств должна предусматриваться возможность их замены.

6.6. Для того чтобы упростить сравнение величин измеренных диагностических показателей с критериальными значениями, должна быть составлена специальная таблица для всех ГТС гидроузла. В этой таблице для периода строительства должны быть приведены следующие данные:

- наименование всех показателей состояния ГТС, контролируемых натурными наблюдениями;
- способы определения величин всех показателей по данным измерений;
- первоначальные расчетные значения показателей, взятые из проекта;
- значения измеренных показателей на характерные этапы работы ГТС.

6.7. В нормальной эксплуатации в таблице (базе данных) следует дополнительно поместить уточненные по данным измерений значения диагно-

стических показателей (величина, ее изменение во времени) и значения показателей по данным измерений в характерные этапы работы ГТС.

6.8. Для повышения эффективности контроля состояния ГТС, периодичность измерений следует назначать с учетом следующих факторов: ответственности ГТС и величины ущерба, возможного вследствие аварии или разрушения; качества строительства и эксплуатации; информативности и надежности системы контроля; фактического состояния, наличия процессов, снижающих эксплуатационную надежность и безопасность ГТС.

6.9. Для повышения безопасности эксплуатации ГТС следует использовать автоматизированные системы диагностического контроля (АСДК) ГТС, которые должны обеспечить автоматизацию процессов измерения параметров, характеризующих состояние ГТС, предварительную и окончательную обработку и анализ результатов контрольных измерений, сопоставление измеренных показателей с их критериальными значениями.

6.10. АСДК в зависимости от типа контролируемого ГТС должна включать в себя ряд подсистем согласно номенклатуре диагностических показателей: контроля фильтрации, геодезических наблюдений, контроля НДС и т.д. В каждой подсистеме должны выполняться операции как общие для системы в целом, так и характерные для конкретной подсистемы.

6.11. В программу натурных наблюдений следует включить указания относительно состава и порядка визуальных наблюдений, являющихся одним из основных источников информации при определении критериальных значений  $K1$  и  $K2$  качественных диагностических показателей состояния ГТС. Особое внимание следует уделять контролю зон:

- изменения геологических условий основания; сопряжения разных ГТС;
- приложения сосредоточенных нагрузок;
- переменного влажностного и температурного режима;
- изменения конфигурации ГТС, концентрации и изменения характера напряжений.

Перечень контролируемых визуальными наблюдениями показателей состояния ГТС приведен в *Приложении 2*.

#### **4.7. Применение критериальных значений диагностических показателей при принятии решений по обеспечению безопасности ГТС**

7.1. Безопасность ГТС считается полностью обеспеченной, если эксплуатационное состояние ГТС оценивается как «нормальное».

7.2. В случае наступления при эксплуатации ГТС «потенциально опасного состояния» (при превышении одним или рядом диагностических показателей значений *K1* или выхода диагностических показателей за пределы прогнозируемого при данном уровне нагрузок интервала значений) следует проверить достоверность результатов измерений и вычислений, а также обоснованность принятого значения *K1*. При этом наряду с диагностическими показателями следует привлекать для анализа результаты измерений и вычислений других контролируемых показателей.

При необходимости должна быть создана экспертная комиссия с привлечением проектной и научно-исследовательской организаций для уточнения оценки состояния ГТС и уровня его безопасности.

При превышении первого (предупреждающего) уровня критериальных значений эксплуатирующая организация должна оповестить о наступлении потенциально опасного состояния ГТС орган надзора и принять оперативные меры по переводу ГТС в нормальное состояние.

7.3. Превышение одним или несколькими диагностическими показателями второго (предельного) уровня критериальных значений *K2* следует считать признаком наступления состояния, при котором дальнейшая эксплуатация ГТС в проектных режимах является нарушением Федерального закона с вытекающей отсюда ответственностью.

С наступлением этого состояния эксплуатирующая организация обязана известить об этом орган надзора и сразу приступить к проведению мероприятий по восстановлению требуемого уровня безопасности. Впредь до

восстановления этого уровня безопасности должны быть введены ограничения на режим эксплуатации ГТС (вплоть до понижения УВБ). Все мероприятия по восстановлению нормального состояния и ограничения на режим эксплуатации ГТС следует выполнять под контролем органа надзора.

Если значения контролируемых показателей отклоняются от границ прогнозируемого интервала с возрастающей интенсивностью, свидетельствуя о быстром развитии разрушительных процессов, то эксплуатирующая организация обязана согласно ст. 9 Федерального закона [1] «осуществлять по вопросам предупреждения аварий гидросооружения взаимодействие с органом управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям; незамедлительно информировать об угрозе аварии гидросооружения региональные органы надзора за безопасностью гидросооружений, другие государственные органы, органы местного самоуправления и в случае непосредственной угрозы прорыва напорного фронта – население и организации в зоне возможного затопления». Одновременно эксплуатирующая организация должна сразу же приступить к сработке или понижению уровня ВБ до отметок, при которых развитие разрушительного процесса прекратится.

#### *Приложение 1*

#### ***Порядок разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС***

1. Согласно ст. 9 Федерального закона [1] «Собственник или эксплуатирующая организация обязаны обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности гидросооружения».
2. Устанавливаются два обязательных этапа определения (назначения) критериальных значений диагностических показателей (критериев безопасности): а) на стадии проекта; б) на стадии эксплуатации.
3. Перечень и критериальные значения диагностических показателей, разработанные на стадии проекта, должны корректироваться на стадии

ввода объекта в эксплуатацию с учетом всей дополнительной информации, полученной в период строительства, а также с учетом возможного расширения объема контроля за эксплуатируемым ГТС.

4. Критериальные значения диагностических показателей должны быть откорректированы и вновь утверждены органом надзора также в случаях:

- изменения нормативно-правовой базы, действовавшей при определении перечня и утверждении критериев безопасности;
- изменения состояния ГТС и условий его эксплуатации, приведших к изменению эксплуатационного состояния.

5. Согласно ст. 13 Федерального закона критерии безопасности подлежат утверждению органом надзора за безопасностью гидросооружений.

6. Эксплуатирующая организация обязана представить критерии безопасности на утверждение вместе с представлением декларации безопасности.

7. Утверждение критериев безопасности осуществляется органом надзора на основе рассмотрения следующих материалов:

- перечня контролируемых диагностических показателей;
- таблицы диагностических показателей и их критериальных значений;
- схем размещения КИА и состава визуальных наблюдений на ГТС;
- пояснительной записки с описанием использованных методов определения критериев безопасности.

8. При рассмотрении и утверждении критериев безопасности органом надзора следует анализировать: а) достаточность КИА; б) обоснованность назначения состава диагностических показателей; обоснованность и корректность использованных методов определения критериев безопасности.

9. Рассмотрение материалов, представленных в орган надзора для утверждения критериев безопасности, производится вместе с экспертизой декларации безопасности и должно быть завершено в течение трех месяцев.

## *Приложение 2*

### **Перечень контролируемых количественных и качественных показателей состояния, уровня воздействий и условий эксплуатации ГТС**

1. Для оценки состояния эксплуатируемого ГТС необходимо контролировать следующие количественные (измеряемые с помощью технических средств и вычисляемые на основе измерений) показатели:

- вертикальные и горизонтальные перемещения и деформации сооружений, их оснований (в пределах активной и приконтактной зон);
- напряжения в ГТС и их основаниях (бетон, скала, грунт и др.);
- напряжения на контакте бетонных ГТС с основанием, с различного рода засыпками и грунтовыми ГТС;
- сейсмические колебания оснований и динамическая реакция ГТС;
- взаимные смещения по межсекционным швам бетонных ГТС;
- раскрытие трещин, межблочных швов в бетонных ГТС;
- глубину распространения трещины по контакту бетонной плотины со скальным основанием;
- углы поворота характерных сечений бетонных ГТС;
- фильтрационный расход воды (суммарный и по участкам ГТС и их оснований), поступающий в дренажные устройства и подземные выработки или выходящий на дневную поверхность;
- температуру и химический состав фильтрующей воды;
- отметки кривой депрессии в грунтовых ГТС и береговых примыканиях;
- пьезометрические напоры и их градиенты в грунтовых ГТС, основании и береговых примыканиях;
- фильтрационное давление на подошвы бетонных ГТС;
- поровое давление и интенсивность его рассеивания в водоупорных элементах плотин из грунтовых материалов и основаниях;
- температуру сооружений, а также их оснований (в приконтактной зоне).

2. Для оценки состояния ГТС следует контролировать нагрузки на ГТС:

- гидростатическое давление с ВБ и НБ (уровни воды, графики наполнения и сработки водохранилища);
- температура окружающих ГТС воздуха и воды;
- давление наносов (их уровень и механические характеристики);
- ветроволновые и ледовые воздействия;
- техногенные воздействия на ГТС (взрывы, проходка подземных выработок, сброс потока воды, работа гидроагрегатов, движение транспорта);
- сейсмические воздействия (динамические перемещения, скорости, ускорения основания во время землетрясения).

3. Оценку состояния ГТС и уровня риска аварий или безопасности эксплуатируемого ГТС следует выполнять с учетом следующих показателей:

- соответствия конструктивно-компоновочных решений, инженерно-геологических особенностей основания, технологии строительства, условий эксплуатации ГТС положениям действующих норм и правил, а также современным методам расчетов и методам оценки состояния ГТС;
- опасности превышения принятых в проекте расчетных уровней возможных природных воздействий;
- изменения расчетных значений механических и фильтрационных характеристик материалов сооружений, а также свойств пород оснований;
- изменения пропускной способности водосбросных сооружений, а также работоспособности элементов противофильтрационного контура;
- соответствия критериям безопасности показателей состояния, контролируемых средствами измерений и оцениваемых на экспертной основе;
- оценок последствий возможных аварий и состояния противоаварийного обеспечения ГТС;
- соответствия условий эксплуатации требованиям норм безопасности.

4. Экспертной оценке и визуальному контролю подлежат следующие качественные показатели:

- развитие просадок или пучения грунта на гребне, бермах и откосах ГТС;

- оползни откосов плотин и береговых склонов, абразия берегов;
- деформация, износ и коррозия бетонных и стальных элементов ГТС;
- повреждения волнозащитных креплений откосов плотин;
- наличие полостей и каверн в основании и теле ГТС;
- развитие трещин и других повреждений на гранях ГТС, в зонах сопряжения элементов ГТС и оснований с различными механическими и фильтрационными свойствами, а также в подземных выработках;
- протечки в потернах ГТС, следы выщелачивания бетона;
- засорение и промерзание дренажных устройств и выходов воды;
- высачивание воды и намокание откосов, появление ключей и грифонов;
- наличие мутности фильтрующей воды;
- механические повреждения водосбросов и размывы русла в НБ;
- повреждение и нарушение работоспособности затворов, гидромеханического, кранового и электромеханического оборудования;
- работоспособность систем инструментального контроля;
- объемы и уровень наносов в ВБ.

5. Перечни, приведенные в п.п. 1–4, не являются неизменными и полными и должны уточняться и дополняться для каждого конкретного ГТС с учетом природных условий, конструкции ГТС и условий эксплуатации.

### *Приложение 3*

#### **Оценка уровня риска аварии эксплуатируемых ГТС**

1. Детерминированную оценку уровня риска эксплуатируемых ГТС рекомендуется осуществлять в виде обобщенного показателя, объединяющего влияние количественных и качественных факторов безопасности. Указанный обобщенный показатель (уровень безопасности ГТС) характеризует степень отклонения безопасности ГТС от требований норм и правил.

2. Оценка уровня безопасности ГТС выполняется следующим образом:

- а) рассматриваются различные сценарии аварий;
- б) для каждого сценария аварии определяются действующие факторы;

в) все количественные и качественные факторы безопасности приводят к одному масштабу (ранжируют по одной шкале, разбитой на интервалы);

г) выполняется количественная оценка меры риска (уровня безопасности ГТС) с учетом взаимного влияния различных (приведенных к единому масштабу) факторов безопасности по формуле:

$$I = I_{max} - \prod_i^n (I_{max} - I_i) / (I_{max} - I_{min})^{n-1}, \quad (3.1)$$

где  $I_i$  – значения факторов безопасности;  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  – максимальное и минимальное значения факторов для того интервала количественной шкалы, которому соответствуют качественные значения факторов, полученных по формуле.

3. Рассмотренный в пунктах 1, 2 способ оценки уровня безопасности эксплуатируемого ГТС не исключает применения вероятностного метода оценки меры риска. В частности, обычные вероятностные представления характеристик воздействий (гидрологических, волновых, сейсмических) следует использовать при выполнении оценок факторов безопасности, характеризующих природные воздействия, свойства материалов и пород основания. Аналогично при оценке соответствия состояния эксплуатируемого ГТС современным методам расчетов и нормам рекомендуется использование (при наличии требуемых рекомендаций в нормах) вероятностных оценок надежности гидроузла в целом или его отдельных элементов.

4. Наиболее эффективно применение вероятностных оценок надежности и безопасности ГТС при высокой случайной изменчивости действующих факторов, в особенности при учете особых воздействий (в том числе катастрофических природных) или их сочетаний, например сейсмического воздействия при случайном и меняющемся в широких пределах УВБ и т.п.

5. Вероятностную оценку риска аварии ГТС рекомендуется осуществлять в следующем порядке:

- а) рассматриваются различные сценарии аварий;
- б) в каждом сценарии аварии определяют список действующих факторов;
- в) определяются вероятностные характеристики действующих факторов;

г) расчетом по формулам (например, приведенным в работах СИГБ [12, 13, 21]) определяется вероятность аварии ГТС.

6. Заключительным этапом оценки риска аварии или оценки уровня безопасности эксплуатируемого ГТС является анализ полученных результатов, выявление наиболее «опасных» факторов и разработка технических и организационных рекомендаций по обеспечению безопасности ГТС.

*Примечание.*

Приведенные в данном приложении рекомендации по оценкам риска аварии (уровня безопасности) эксплуатируемых ГТС не охватывают всего разнообразия методов этих оценок. По согласованию с органом надзора возможно применение других методов детерминированных и вероятностных оценок риска аварий ГТС.

Приложение 4

**Методы определения критериальных значений  $K1$  и  $K2$  показателей состояния гидросооружений**

№ п/п	Наименование показателя	Рекомендуемые методы расчетов и исследований для определения критериальных значений $K1$ и $K2$ показателей состояния ГТС
1	2	3
1	Отметки депрессионной поверхности фильтрационного потока в теле грунтовых сооружений и береговых примыканиях	Аналитические методы исследования напорной и безнапорной фильтрации и графический метод для определения критериальных значений пьезометрических напоров, фильтрационных расходов. Численные методы, метод ЭГДА для определения критериальных значений основных показателей фильтрационного режима (уровни, пьезометрические напоры, фильтрационные расходы). На стадии эксплуатации критериальные значения $K1$ и $K2$ уточняются поверочными расчетами, в том числе на основе использования прогнозных статистических моделей
2	Пьезометрические напоры в теле гидросооружений, основании и береговых примыканиях	
3	Градиенты напора в теле гидросооружений, основании и береговых примыканиях	
4	Фильтрационные расходы в теле ГТС, основании и береговых примыканиях	
5	Избыточное поровое давление и интенсивность его рассеивания в водоупорных элементах грунтовых плотин и в основаниях	Расчеты напряженно-деформированного состояния плотин из грунтовых материалов и их оснований с учетом консолидации
6	Вертикальные перемещения (осадки) гидросооружений и их оснований	Расчеты НДС, прочности и устойчивости бетонных гидросооружений и сооружений из грунтовых материалов (численные методы механики сплошной среды, теории упругости, пластичности, ползучести). На стадии эксплуатации критериальные значения показателей состояния ГТС уточняются поверочными расчетами по «откалиброванным» на основе данных натурных наблюдений детерминистическим математическим моделям, а также на основе прогнозных статистических (регрессионных) моделей
7	Горизонтальные перемещения гидросооружений и их оснований	

1	2	3
8	Напряжения в теле сооружений и их основаниях, контактные напряжения	
9	Углы поворота характерных сечений бетонных ГТС	
10	Раскрытие трещин и межблочных швов	Инженерные методы, регламентированные СНиИП (вторая группа предельных состояний). Численные методы расчета НДС с учетом образования и раскрытия трещин. На стадии эксплуатации для контроля состояния ГТС используются критериальные значения показателей, определенные на стадии проекта
11	Глубина распространения трещины по контакту бетонной плотины со скальным основанием	Расчет НДС системы «плотина – основание» методами теории упругости с учетом раскрытия шва по контакту, определение предельной глубины распространения трещины по контакту бетонной плотины со скальным основанием из условий прочности сооружения и основания. На стадии эксплуатации использование прогнозных математических моделей
12	Взаимное смещение секций по швам бетонных гидросооружений	Определение допустимого взаимного смещения секций по швам относительно друг друга из условия сохранения герметичности шпонок. На стадии эксплуатации использование статистических моделей
13	Температура и температурный градиент в теле сооружения и в приконтактной зоне основания (для ГТС, возводимых в северной климатической зоне)	Расчеты термонапряженного состояния плотин и их оснований численными методами. На стадии эксплуатации критериальные значения показателя уточняются расчетом с учетом реального температурного режима окружающей среды
14	Температура фильтрующей воды в теле грунтовых ГТС	Численные методы теории теплопроводности. На стадии эксплуатации – использование статистических моделей
15	Глубина размыва дна отводящего канала ниже рисбермы	Определение глубины размыва расчетом по эмпирическим зависимостям (из условия допустимой размывающей скорости потока) или на основе исследований гидравлической модели. Критериальные значения глубины размыва дна отводящего канала ниже рисбермы на стадии эксплуатации принимаются равными значениям для стадии проекта
16	Линейный размер и площадь зоны нарушения контакта плит крепления откосов грунтовых плотин	Расчет прочности плит крепления откосов плотин из грунтовых материалов для различных условий их опирания
17	Параметры динамической реакции ГТС	Расчет численными методами динамической теории сейсмостойкости

## **Глава 5. Примеры определения критериев безопасности гидротехнических сооружений (ГТС)**

### **5.1. Осадки бетонных плотин и гидросооружений (Приложение А)**

1. За критериальные значения осадок ( $K1$ ) гидросооружений (ГТС) на не скальных основаниях при среднем давлении под подошвой ГТС, меньше расчетного сопротивления грунта основания, на стадии проекта принимаются значения осадок, полученные расчетом (например, методом послойного суммирования в пределах сжимаемого слоя согласно СНиП 2.02.02-85 [19]). При среднем давлении под подошвой ГТС, большем расчетного сопротивления грунта основания, критериальные значения осадок ( $K1$ ) на стадии проекта принимают равными расчетным значениям, определенным численными методами, учитывающими упругопластический характер деформирования грунтов, пространственное напряженное состояние, последовательность возведения ГТС согласно СНиП 2.02.02-85 [19].

2. Изменение осадок ГТС во время строительства зависит от ряда производственных факторов и трудно поддается прогнозу. В условиях нормальной эксплуатации изменение осадок во времени определяются по прогнозным моделям, основанным на статической обработке данных натурных наблюдений. Прогноз изменения осадок в период эксплуатации на любой момент времени выполняется в соответствии с рекомендациями [22].

3. Критериальные значения ( $K1$ ) осадок определяют для секций ГТС, отличающихся величинами нагрузок на основание или геологическими свойствами основания и оснащенных средствами измерения осадок.

4. В случаях, когда осадка ГТС, особенно равномерная по его длине, не вызывает каких-либо опасений за безопасность ГТС, основное внимание уделяется контролю изменений интенсивности осадок во времени с целью обнаружения возможного развития непредвиденных неблагоприятных процессов в основании (изменение физико-механических характеристик грунта, химическая или механическая суффозия и т.п.).

5. Прогнозные модели, основанные на данных натуральных наблюдений, позволяют оценить состояние ГТС как потенциально опасное, когда в течение большого периода наблюдений интенсивность осадок не уменьшается, и как предаварийное, когда наблюдается рост интенсивности во времени.

## **5.2. Горизонтальные перемещения гребня высоких бетонных плотин (Приложение Б)**

1. Горизонтальные перемещения гребня бетонных гравитационных и арочных плотин на скальном основании и бетонных плотин на нескальном основании являются важными показателями их прочности и устойчивости, так как они характеризуют их статическую работу, и оснований в целом.

2. Горизонтальные перемещения гребня бетонной плотины на скальном и нескальном основаниях в эксплуатационный период обусловлены:

- воздействием гидростатического давления на плотину;
- температурными изменениями в плотине, зависящими от изменения температуры внешней среды (воздух, вода);
- неупругими деформациями скального или нескального основания и материала плотины.

3. В качестве первого приближения за критериальные значения ( $K_1$ ) горизонтального перемещения гребня плотины принимается величина, полученная расчетом на основное сочетание нагрузок методами строительной механики, теории упругости, пластичности при принятых в проекте физико-механических характеристиках плотины и основания.

За критериальное значение ( $K_2$ ) горизонтального перемещения гребня плотины принимается величина, полученная расчетом на особое сочетание нагрузок методами строительной механики, теории упругости, пластичности при исходных физико-механических параметрах плотины и основания.

4. Критериальные значения ( $K_1$ ,  $K_2$ ) горизонтальных перемещений гребня плотины должны быть уточнены в процессе ее эксплуатации на основе контрольных расчетов с учетом фактических физико-механических харак-

теристик бетона плотины и основания и выявленных закономерностей работы реального сооружения.

5. Для уточнения критериальных значений ( $K1$ ,  $K2$ ) горизонтальных перемещений гребня бетонных плотин используют статистический метод для установления эмпирической зависимости этих перемещений от УВБ (НПУ для  $K1$  и ФПУ для  $K2$ ), наружной температуры ( $t$ ) и времени ( $T$ ) в виде:

$$u = f[H(T), t(T); T] \quad (\text{Б.1})$$

где:  $u$  – горизонтальные перемещения гребня плотины;  $H$  – УВБ;  $t$  – температура;  $T$  – время.

6. За уточненные критериальные значения ( $K1$ ,  $K2$ ) горизонтальных перемещений принимаются величины их прогнозируемых экстремальных значений, вычисленные в предположении, что максимальные и минимальные перемещения от действия воды ВБ совпадают по фазе с максимальными и минимальными перемещениями от температурных воздействий.

7. Измеренные перемещения гребня плотины во всех случаях не должны превышать критериальных значений ( $K1$ ,  $K2$ ). Превышение измеренных над прогнозируемыми перемещениями говорит об аномалии в работе ГТС и его состояние тогда оценивается как потенциально опасное (если превышено значение  $K1$ ) и предаварийное (если превышено значение  $K2$ ).

### **5.3. Напряжения в бетоне плотин (Приложение В)**

1. За критериальные значения ( $K1$  и  $K2$ ) напряжений в бетоне в контролируемых точках плотины на стадии проекта принимаются величины напряжений, полученные расчетом на основное ( $K1$ ) или особое сочетание нагрузок ( $K2$ ) или испытанием моделей. Величины напряжений в бетоне плотин III и IV классов определяются методами строительной механики, плотин I и II классов методами теории упругости по схемам плоской или объемной задачи согласно СНиП 2.06.06-85 [17].

2. В эксплуатационный период критериальные значения ( $K1$ ) напряжений в бетоне должны быть уточнены по результатам поверочных расчетов с

учетом фактических физико-механических характеристик бетона плотины. Для уточнения критериальных значений напряжений в бетоне рекомендуется использовать прогнозные математические модели.

3. Для сильно нагруженных зон бетонных плотин, прочность которых определяется сопротивлением бетона сжатию, за критериальное значение  $K1$  напряжения в бетоне принимают расчетное сопротивление бетона сжатию для предельных состояний первой группы с учетом коэффициентов условий работы и надежности; за критериальное значение  $K2$  напряжений бетона в этих зонах принимают значение  $0,9R_{и}$ , где  $R_{и}$  – расчетное сопротивление бетона сжатию для предельных состояний первой группы.

4. Для бетонных плотин, прочность сечений которых определяется сопротивлением бетона растяжению и по условиям эксплуатации в бетоне не допускаются трещины, за критериальные значения  $K1$  напряжения в бетоне принимаются расчетные сопротивления бетона на растяжение для предельных состояний первой группы с учетом коэффициентов условий работы и надежности по ответственности ГТС, а за критериальные значения  $K2$  напряжения в бетоне принимают  $0,9R_{bt}$ , где  $R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельных состояний первой группы.

#### **5.4. Положение пьезометрических уровней в основании бетонных плотин (Приложение Г)**

1. Для определения противодействия на подошву бетонных плотин для оценки их устойчивости методом ЭГДА или расчетами определяется положение пьезометрических уровней при основном (УВБ=НПУ) и особом сочетании нагрузок (УВБ=ФПУ) и при нарушении одного из противофильтрационных или дренажных устройств по СНиП 33-01-2003 [16].

2. За критериальные значения  $K1$  и  $K2$  положения пьезометрических уровней в основании бетонных плотин на стадии проекта принимаются значения пьезометрических уровней, полученные расчетом или методом ЭГДА на основное ( $K1$ ) или особое сочетание нагрузок ( $K2$ ) (рис. Г.1).

3. Для периода нормальной эксплуатации изменения положения пьезометрических уровней во времени, отражающие их критериальные значения, определяются по прогнозным регрессионным моделям, основанным на статистической обработке данных натурных наблюдений. Критериальные значения положения пьезометрических уровней ( $K1$ ) принимаются равными прогнозируемым по регрессионной модели при доверительном интервале, равным ( $2\sigma$ ), а критериальные значения положения пьезометрических уровней ( $K2$ ) - равным прогнозируемым по регрессионной модели при доверительном интервале, равным ( $3\sigma$ ).

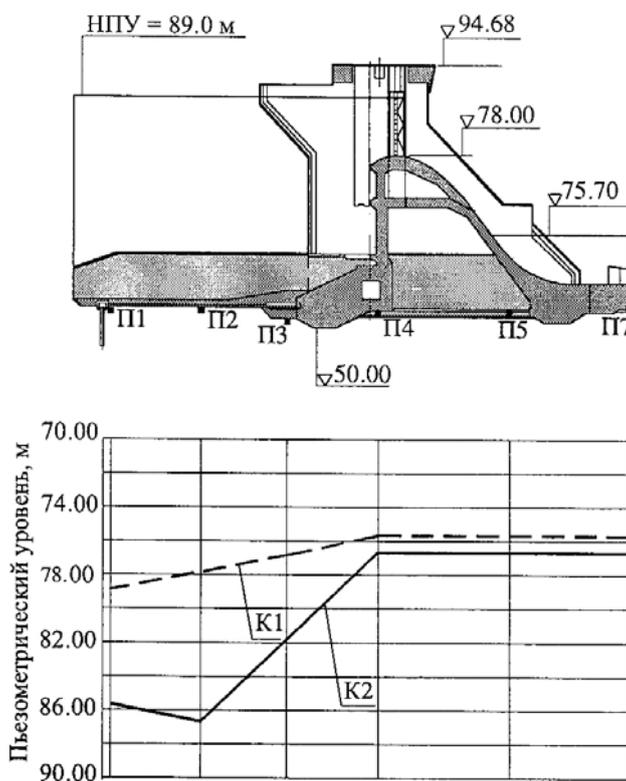


Рис. Г.1. Положение пьезометрических уровней в основании водосливной бетонной плотины:

$K1$  – при основном сочетании нагрузок;  $K2$  – при особом сочетании нагрузок при нарушении монолитности понура.

4. В качестве диагностических показателей положения пьезометрических уровней в основании бетонной плотины с понуром рекомендуется принимать значения пьезометрических уровней в конце понура, для контроля работоспособности верхового зуба и дренажа – пьезометрических уровней перед низовым зубом бетонной плотины.

### 5.5. Осадки грунтовых плотин (Приложение Д)

При назначении критериев осадки плотины используется основная закономерность геомеханики по уплотнению грунтов под действием нагрузки.

При нормальной работе грунтовой плотины ход ее осадки должен носить плавный затухающий характер. При этом интенсивность приращения осадки с каждым циклом измерений (в определенное время года и при одинаковых условиях) должна уменьшаться, стремясь к нулю. Фактическая осадка в любой момент времени  $t$  не должна превышать расчетных значений для основного и особого сочетания нагрузок (если расчетная модель близка к реальной) и выходить за пределы доверительного интервала.

$$S_{\text{расч}}(t) - \Delta S \leq S_{\text{нат}}(t) \leq S_{\text{расч}}(t) + \Delta S \quad (\text{Д.1})$$

где  $S_{\text{нат}}(t)$  и  $S_{\text{расч}}(t)$  – значения измеренной и расчетной осадок плотины за равный промежуток времени  $t$ ;  $\Delta S$  – погрешность определения осадки.

Исходя из этого, за критерий  $K1$  осадки плотины в общем случае рекомендуется принимать ее расчетное значение на верхней границе доверительного интервала (при нисходящем графике хода осадки):

$$K1(t) = S_{\text{расч}}(t) - \Delta S \quad (\text{Д.2})$$

Как показывает практика, получение достоверных значений расчетных осадок плотин с учетом многих факторов строительного и пускового периодов и отвечающих данным натурных наблюдений, является сложной задачей. В этой связи более рациональным следует считать использование для назначения критериев осадки прогнозные модели, основанные на статистической обработке данных натурных наблюдений:

$$S_{\text{прог}}(t) - \Delta S \leq S_{\text{нат}}(t) \leq S_{\text{прог}}(t) + \Delta S \quad (\text{Д.3})$$

где  $S_{\text{прог}}(t)$  – прогнозируемая осадка на момент времени  $t$ .

Прогнозируемые значения осадок определяются аппроксимацией и экстраполяцией натурных графиков хода осадки геодезических марок, установленных на плотине. Простейшая аппроксимирующая функция имеет вид  $S(t)=t/(at+b)$ , где  $t$  – время,  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, определяемые, например, в результате статистической обработки данных преды-

дущих натуральных измерений методом наименьших квадратов (рис. Д. 1)

$$В \text{ этих случаях за } K1 \text{ принимается: } K1(t) = S_{\text{прог}}(t) - \Delta S \quad (\text{Д.4})$$

По мере получения новых данных натуральных наблюдений рекомендуется выполнять корректировку прогнозных графиков хода осадок плотины и аппроксимирующих их функций.

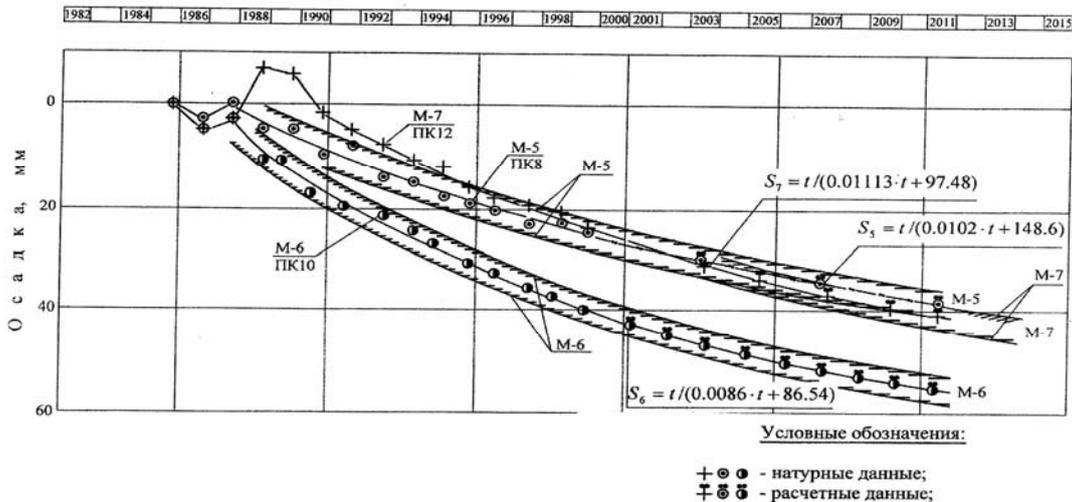


Рис. Д.1. График осадок бермы плотины (натурные и прогнозируемые данные)

Другим качественным критериальным признаком нормального состояния плотины по осадкам может служить неравенство вида:

$$\text{нормальное состояние } U_s(t_1) > U_s(t_2) > U_s(t_3) > U_s(t_4) > \dots > U_s(t_n) \rightarrow 0 \quad (\text{Д.5})$$

где  $U_s(t_1), \dots, U_s(t_n)$  – натурные значения интенсивности приращения осадок плотины в первый, второй и последующие годы наблюдений (циклы измерений).

Критериальными признаками потенциально опасного и предаварийного состояний ГТС считаются условия, когда имеет место, соответственно, отсутствие затухания осадок во времени и их нарастание во времени:

$$\text{потенциально опасное состояние } U_s(t_1) \approx U_s(t_2) = U_s(t_3) = \dots = U_s(t_n) \quad (\text{Д.6})$$

$$\text{предаварийное состояние } U_s(t_1) < U_s(t_2) < U_s(t_3) < \dots < U_s(t_n) \quad (\text{Д.7})$$

При удовлетворении натуральных значений интенсивности осадки плотины условиям (Д.6) проводится оперативный комплексный анализ поведения ГТС с привлечением других данных натуральных наблюдений и принимаются меры по приведению ГТС в нормальное эксплуатационное состояние. При выполнении (Д.7) принимаются оперативные меры по понижению УВБ.

## 5.6. Горизонтальные смещения гребня грунтовой плотины (Приложение Е)

Назначение критериев базируется на данных систематических натуральных наблюдений и на общих закономерностях изменения горизонтальных смещений гребня плотины в период эксплуатации под действием изменяющейся гидростатической нагрузки.

Установлено, что после 3–5 циклов повторяющейся годичной сработки и наполнения ВБ (от НПУ до УМО и обратно) горизонтальные смещения гребня начинают изменяться квази-упруго. Для различных плотин число указанных циклов может отличаться. При этом к концу этого периода необратимые (остаточные) перемещения гребня плотины практически достигают своего максимума и их дальнейшие приращения близки к нулю.

Исходя из этой закономерности, состояние плотины считается нормальным, если выполняется неравенство вида:

$$\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_1) > \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_2) > \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_3) > \dots > \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_n) \rightarrow 0, \quad (\text{E. 1})$$

где  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_1)$ ,  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_2)$  и т.д. – натурные значения приращений необратимой (остаточной) составляющей горизонтальных смещений в контролируемых точках гребня плотины в первый и последующие циклы эксплуатации под напором;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – циклы измерений в первый и последующий годы ( $n = 3-5$  лет).

После перехода горизонтальных смещений гребня в квази-упругую стадию (после 3–5 лет нормальной эксплуатации) условию нормальной работы может быть придан вид:

$$\Delta S_{\text{нат}}^{\text{упр}}(t_n) \approx \Delta S_{\text{нат}}^{\text{упр}}(t_{n-1}) \approx \Delta S_{\text{нат}}^{\text{упр}}(t_{n-2}) \approx \dots \approx \text{const}, \quad (\text{E.2})$$

где  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{упр}}(t_n)$ ,  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{упр}}(t_{n-1})$  и т.д. – натурные значения горизонтальных квази-упругих (обратимых) перемещений в контролируемых точках гребня в первый и последующий годы после затухания необратимых перемещений.

При незатухающих приращениях необратимых (остаточных) горизонтальных смещений гребня плотины ее состояние следует оценивать как потенциально опасное, при нарастающем во времени – как предаварийное.

Критерий  $K1$ , задающий границу между нормальным и потенциально опасным состояниями в  $i$ -ом году рекомендуется в виде условия:

$$K1: \quad \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_i) \approx \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_{i-1}) \pm \delta, \quad (\text{E.3})$$

где  $\delta$  – погрешности измерения смещений.

В качестве критерия  $K2$ , задающего границу между потенциально опасным и предаварийным состояниями в  $i$ -ом году, рекомендовано условие:

$$K2: \quad \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_i) > \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_{i-1}) \quad (\text{E.4})$$

Таким образом, возможные состояния плотины по осадкам следующие:

нормальное  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_i) < \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_{i-1}) \pm \delta$

потенциально опасное  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_i) \approx \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_{i-1}) \pm \delta$

предаварийное  $\Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_i) > \Delta S_{\text{нат}}^{\text{ост}}(t_{i-1})$

### 5.7. Трещинообразование в глинистых ядрах и экранах грунтовых плотин (Приложение Ж)

Образование вертикальных поперечных и горизонтальных трещин в глинистых водоупорных элементах плотин в зонах действия напора воды представляет угрозу безопасности плотины. Трещины появляются вследствие возникновения чрезмерных для грунтов этих элементов растягивающих деформаций, проявляющихся в период строительства и при эксплуатации плотины. В этой связи в качестве диагностического показателя трещинообразования можно использовать показатель относительной (вертикальной или горизонтальной) деформации растяжения глинистых грунтов этих элементов, которая вычисляется по данным геодезических или телеметрических натуральных измерений линейных взаимных перемещений точек  $\Delta L_p$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $L_p$ :  $\varepsilon_p = \Delta L_p / L_p$ .

Для назначения критериев трещинообразования  $K1$  и  $K2$  используют предельный показатель относительной деформации растяжения  $\varepsilon_p^{\text{пред}}$  грунта, при которой происходит разрыв образца. Для каждого вида грунта показатель  $\varepsilon_p^{\text{пред}}$  устанавливается механическими испытаниями серии образцов.

Условие обеспечения трещиностойкости глинистого водоупорного элемента выражается неравенством:  $\varepsilon_{p.\text{нат}} \leq \varepsilon_p^{\text{пред}} / \gamma_n$ ,

где  $\varepsilon_{p.\text{нат}}$  – относительная деформация растяжения глинистого грунта плотины по натурным измерениям;  $\varepsilon_p^{\text{пред}}$  – предельная относительная деформация данного грунта на растяжение (разрыв), полученная механическими испытаниями;  $\gamma_n$  – нормативный коэффициент надежности по ответственности плотины.

За предупреждающий критерий трещинообразования  $K1$ , задающий границу между нормальным и потенциально опасным состоянием водоупорного элемента плотины, принимается:  $K1 = \varepsilon_p^{\text{пред}}/\gamma_n$

За критерий безопасности  $K1$ , задающий границу между потенциально опасным и предаварийным состоянием с некоторым допущением рекомендуется принять величину:  $K1 = 0,9 \varepsilon_p^{\text{пред}}$

Таким образом, критериальные соотношения представляются в виде:

нормальное состояние:  $K1 = \varepsilon_p^{\text{пред}}/\gamma_n \geq \varepsilon_{p.\text{нат}}$

потенциально опасное состояние:  $K1 = \varepsilon_p^{\text{пред}}/\gamma_n < \varepsilon_{p.\text{нат}} \leq 0,9\varepsilon_p^{\text{пред}} = K2$

предаварийное состояние:  $K2 = 0,9\varepsilon_p^{\text{пред}} < \varepsilon_{p.\text{нат}}$

Для практического пользования результаты инструментального контроля за трещинообразованием в элементах плотины рекомендуется представлять в виде совокупности графиков  $\varepsilon_{p.\text{нат}}(M_i) = f(t)$ , на которых заранее наносятся линии критериальных значений  $K1$  и  $K2$  (рис. Ж.1).

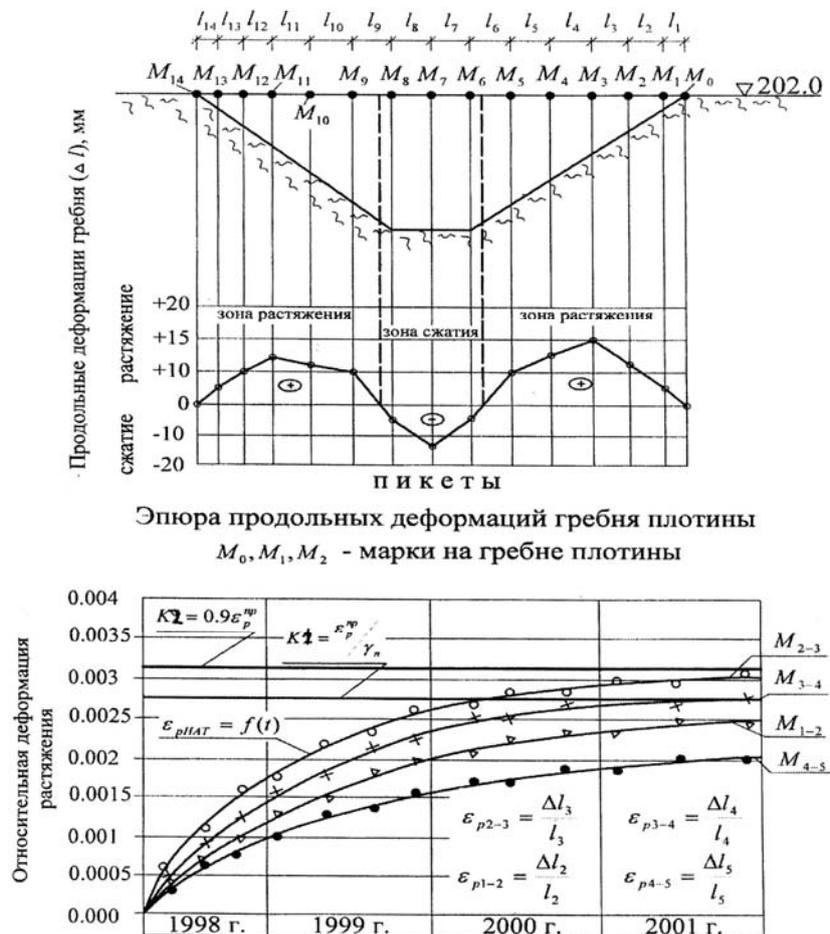


Рис. Ж.1. К установлению критериев трещинообразования в глинистых ядрах

Рассмотренные выше критерии, основанные на контроле  $\varepsilon_{p,нат}$ , более приемлемы для контроля образования вертикальных поперечных трещин.

Однако в глинистых ядрах и экранах грунтовых плотин возможен иной механизм нарушения сплошности – выпор грунта фильтрационным потоком (если малы вертикальные сжимающие напряжения  $\sigma_y$ ).

В каменно-земляных плотинах может иметь место арочный эффект («зависание» глинистого ядра на боковых призмах). Эффект «зависания» обусловлен рядом факторов, главным из которых является разница деформационных свойств (модулей деформации) грунтов ядер, переходных зон и боковых упорных призм. При этом, как правило, происходит снижение вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_y$  в глинистых ядрах и концентрация напряжений в переходных или боковых зонах. Это снижение  $\sigma_y$  может достигать в ряде случаев 50% и более, что может привести к образованию опасных фильтрационных прорывов воды в глинистом ядре в виде горизонтальных трещин «гидравлического разрыва».

Гидравлический разрыв верхней части глинистых ядер при первом наполнении ВБ явился главной причиной аварий ряда каменно-земляных плотин. Обычно используемый критерий его образования (минимальное главное напряжение в грунте меньше давления ВБ,  $\sigma_3 < \gamma_w h_w$ , является недостаточным, так как не учитывает влияния плотности-влажности грунта, способности грунта к самозалечиванию трещин разрыва, степени консолидации ядра и его "эффективной" ширины, режима наполнения и сработки ВБ. Применение новых критериев [23], учитывающих влияние этих факторов, повышает достоверность прогноза гидравлического разрыва ядер.

Чтобы исключить появление этих трещин рекомендуется условие трещиностойкости, связывающее между собой  $\sigma_y$  и поровое давление воды  $p_v$  на напорной грани. Для этого рекомендуется ввести коэффициент надежности грунта по образованию фильтрующих трещин гидравлического разрыва:

$$k_n^{TP} = (\sigma_y + c_p) / p_v \quad (Ж.1)$$

где  $c_p$  – коэффициент сцепления глинистого грунта ядра на разрыв,  $\sigma_y$  – вертикальное напряжение, измеренное в рассматриваемой точке грунта ядра;  $p_b = \gamma_b h_b$  – фильтрационное давление воды в рассматриваемой точке ядра (расстояние по вертикали от этой точки до поверхности депрессии).

При послойном уплотнении ядра коэффициент сцепления его грунта  $c_p \rightarrow 0$ . В этом случае зависимость (Ж.1) примет вид:

$$k_H^{TP} = \sigma_y / p_b \quad \text{или} \quad \sigma_y = k_H^{TP} \gamma_b h_b \quad (\text{Ж.2})$$

Для контроля трещиностойкости глинистых ядер плотин по горизонтальным площадкам рекомендуется в качестве диагностического показателя принять измеренные вертикальные напряжения  $\sigma_{yi}^{нат}$ , а значения  $k_H^{TP}$  назначать по СНиП 2.06.05-84\* [18] по аналогии с коэффициентами устойчивости откосов для основного и особого сочетаний нагрузок с учетом класса плотины. Критериальные значения  $\sigma_{yi}$  для любого сечения на глубине  $y$  от гребня плотины при основном и особом сочетаниях нагрузок равны:

$$K1(y_i) = k_{ночн}^{TP} \gamma_b h_b(\gamma_i) \quad (\text{Ж.3})$$

$$K2(y_i) = k_{ночн}^{TP} \gamma_b h_b(\gamma_i) \quad (\text{Ж.4})$$

Критериальные соотношения будут иметь вид:

$$\text{нормальное состояние:} \quad K1(y_i) = k_{ночн}^{TP} \gamma_b h_b(\gamma_i) \geq \sigma_{yi}^{нат} \quad (\text{Ж.5})$$

$$\text{потенциально опасное состояние:} \quad K1(y_i) > \sigma_{yi}^{нат} \geq k_{ночн}^{TP} \gamma_b h_b(\gamma_i) = K2 \quad (\text{Ж.6})$$

$$\text{предаврийное состояние:} \quad K2(y_i) = k_{ночн}^{TP} \gamma_b h_b(\gamma_i) > \sigma_{yi}^{нат} \quad (\text{Ж.7})$$

где  $\sigma_{yi}^{нат}$  – натурные нормальные напряжения сжатия.

### **5.8. Положение поверхности депрессии в грунтовых плотинах** (Приложение 3)

Процедура назначения критериальных положений поверхности депрессии осуществляется в следующей последовательности:

а) для характерных поперечников плотины, оснащенных пьезометрами, производится расчет положений кривой депрессии при основном (УВБ=НПУ) и особом (УВБ=ФПУ) сочетаниях нагрузок; калибровкой расчетной модели (при необходимости) результаты расчета сближаются с результатами натурных наблюдений;

б) для обеих расчетных поверхностей депрессии проверяется выполнение критериальных ограничений:

- недопущение выхода фильтрации на низовой откос выше дренажа;
- заглубление кривой депрессии от поверхности низового откоса на глубину  $h_3$ , не меньшую глубины промерзания грунта  $h_{пр}$  в районе плотины;
- в) поверочными расчетами проверяется соответствие коэффициентов запаса устойчивости низового откоса плотины критериям устойчивости для основного и особого сочетаний нагрузок.

При удовлетворении критериям устойчивости низового откоса расчетные поверхности депрессии принимаются в качестве критериальных (рис. 3.1).

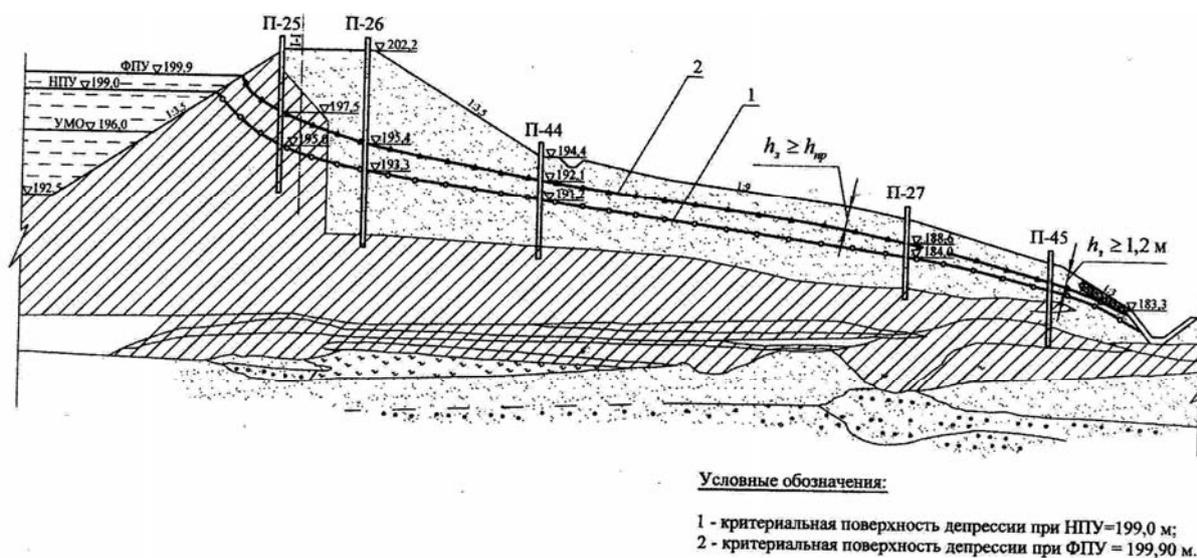


Рис. 3.1. Критериальные положения кривых депрессий в земляной плотине

*Примечания:*

1. При неудовлетворении критериям устойчивости низового откоса и отсутствии технических возможностей для понижения установленных критериальных поверхностей депрессии состояние плотины не может считаться нормальным. В этом случае необходимо выполнение инженерных мероприятий по повышению коэффициента запаса устойчивости откоса до нормативного.

2. Если при УВБ=НПУ или УВБ=ФПУ отметки натуральных поверхностей депрессии превышают расчетные, то:

- при выполнении критериальных условий п. б) в качестве поверхностей, по которым назначаются критерии  $K1$ ,  $K2$ , следует принимать натурные поверхности депрессии при УВБ, равном НПУ и ФПУ, соответственно;
- если критериальные условия п. б) нарушены, то состояние плотины может быть потенциально опасным или предаварийным и необходимо выполнение инженерных мероприятий по снижению кривой депрессии.

В качестве диагностических показателей  $K1$ ,  $K2$ , контролирующих положение кривой депрессии, принимаются измеряемые уровни воды в пьезо-

метрах  $P_{изм}$ , установленных в теле плотины. Критериальным значениям  $K1$  соответствуют пьезометрические уровни поверхности депрессии при основном сочетании нагрузок  $P_{осн}^{пд}$  (при УВБ=НПУ). Критериальным значениям  $K2$  соответствуют пьезометрические уровни кривой депрессии при особом сочетании нагрузок  $P_{особ}^{пд}$  (при УВБ=ФПУ). Критериальные значения  $K1$ ,  $K2$  назначают для каждого пьезометра (или их группы) согласно координат их расположения в контролируемом створе плотины:

$$P_{осн}^{пд}(x_i) = K1(x_i) \quad (Ж.1) \quad P_{особ}^{пд}(x_i) = K2(x_i) \quad (Ж.2)$$

При оценке состояния плотины по положениям кривой депрессии должны быть выдержаны критериальные соотношения для всех пьезометров:

- нормальное состояние:  $P_{изм}(x_i) \leq P_{осн}^{пд}(x_i) = K1(x_i)$  (Ж.3)

- потенциально опасное состояние:  $K1(x_i) < P_{изм}(x_i) \leq P_{особ}^{пд}(x_i)$  (Ж.4)

- предаварийное состояние:  $P_{изм}(x_i) > P_{особ}^{пд}(x_i) = K2(x_i)$  (Ж.3)

Для удобства пользования значения  $K1(x_i)$  и  $K2(x_i)$  выражают в отметках пьезометрических уровней соответствующих поверхностей депрессии. Отметки критериальных уровней  $K1(x_i)$  и  $K2(x_i)$  для каждого пьезометра считают с поверхностей депрессии для основного и особого сочетаний в точках их пересечения с линиями равных напоров (эквипотенциалами), проходящих через водоприемники контрольных пьезометров. Для этого следует построить фильтрационную гидродинамическую сетку (рис. Ж.2).

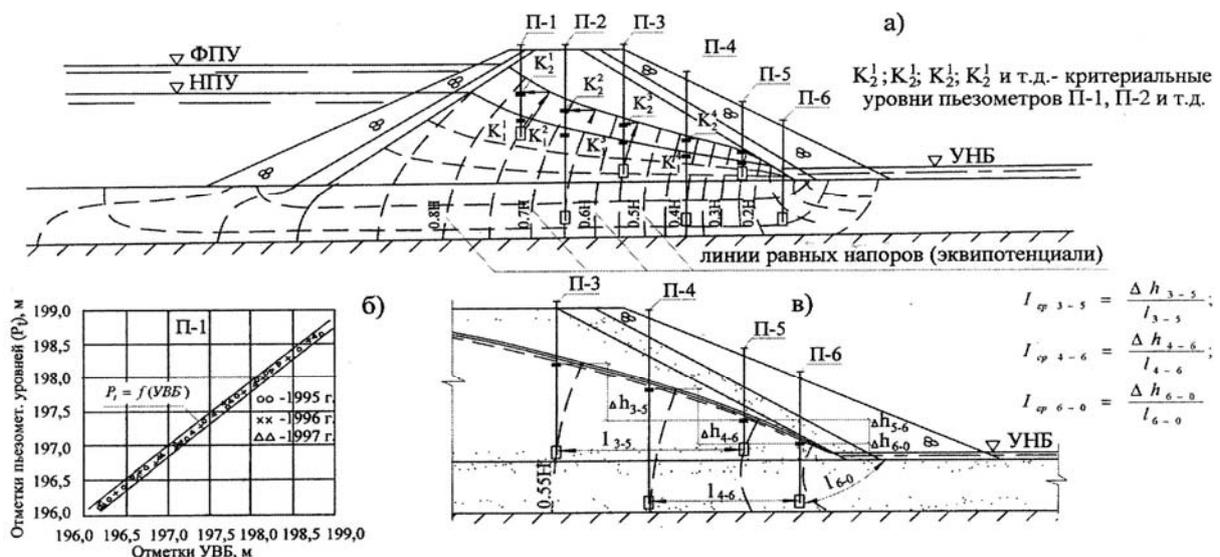


Рис. Ж.2. К установлению критериальных величин уровней  $K1$ ,  $K2$  в пьезометрах

## 5. 9. Фильтрационная прочность грунтовой плотины и ее основания (Приложение И)

Согласно СНиП 2.06.05-84\* и СНиП 2.02.02-85 [18, 19] фильтрационная прочность основания оценивается по действующим средним градиентам напора в контролируемых областях фильтрации. Критерием обеспечения местной фильтрационной прочности является условие:

$$I_{\text{ср.нат}} \leq I_{\text{доп}} = I_{\text{ср.м}} / \gamma_n = K1, \quad (\text{И.1})$$

где  $I_{\text{ср.нат}}$ ,  $I_{\text{доп}}$ ,  $I_{\text{ср.м}}$  – соответственно, натуральный, допустимый и критический градиенты напора в контролируемой области фильтрации;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности плотины.

За критерии  $K1$  фильтрационной прочности грунтов плотины и основания принимают нормативные допустимые для этих грунтов градиенты напора:

$$I_{\text{ср.м}} / \gamma_n = I_{\text{доп}} = K1. \quad (\text{И.2})$$

По условию исключения достижения действующих в плотине градиентов напора их критических значений в качестве критерия  $K2$  рекомендуется принимать величины, равные  $0,9 I_{\text{ср.м}}$ , то есть:  $K2=0,9I_{\text{ср.м}}$

Критериальные неравенства, характеризующие состояние плотины по показателям фильтрационной прочности, имеют вид:

- нормальное состояние:  $I_{\text{ср.нат}} \leq I_{\text{доп}} = K1$
- потенциально опасное состояние:  $K1 = I_{\text{доп}} < I_{\text{ср.нат}} < 0,9I_{\text{ср.м}} = K2$
- предаварийное состояние:  $I_{\text{ср.нат}} > 0,9I_{\text{ср.м}} = K2$ .

Натурные значения средних градиентов напора ( $I_{\text{ср.нат}}$ ) во всех контролируемых областях фильтрации плотины и ее основания вычисляют по показаниям парных пьезометров в этих областях последовательно на линиях тока или по гидродинамическим сеткам фильтрации, построенным по пьезометрическим данным при максимальном напоре на плотину.

Изо всех локальных областей фильтрации плотины и ее основания должны быть выбраны те, в которых грунты менее устойчивы к суффозии и где градиенты напора имеют (или могут иметь) максимальные значения. В качестве таких областей следует рассматривать:

- прослойки неустойчивых к суффозии грунтов в основании;

- зоны контакта илистых и связных грунтов с крупнозернистым грунтом;
- области разгрузки фильтрационного потока тела плотины в дренаж;
- области разгрузки потока фильтрации из основания на поверхность;
- области высачивания потока фильтрации на низовой откос;
- зоны сопряжения грунтовой плотины с бетонными сооружениями;
- области обтекания фильтрационным потоком «острия» сопрягающих шпунтов и зубьев противофильтрационного контура в основании и др.

С учетом требований СНиП 2.06.05-84\* и 02.02-85 [18, 19] для различных классов плотин и для различных типов грунтов плотины и ее основания в качестве критериев  $K1$  и  $K2$  могут приниматься значения средних градиентов напора, обеспечивающих их фильтрационную прочность.

#### **5.10. Фильтрационные расходы в грунтовой плотине и основании** (Приложение К)

В общем случае при нормальном установившемся режиме работы плотины и основания измеренные фильтрационные расходы во всем диапазоне изменения напора на плотину должны отвечать условию:

$$Q_p(H_i) - \Delta Q \leq Q_{\text{нат}}(H_i) \leq Q_p + \Delta Q, \quad (\text{К.1})$$

где  $Q_{\text{нат}}(H_i)$  и  $Q_p(H_i)$  – натурные и расчетные расходы фильтрации при напоре  $H_i$ ;  $\Delta Q$  – погрешность измерения расходов в доверительном интервале.

В качестве критерия  $K1$  максимальных расходов фильтрации через плотину и ее основание принимают их расчетные значения, отвечающие верхней границе доверительного интервала, полученные при УВБ=НПУ (основное сочетание) при уточненных в эксплуатации значениях коэффициентов фильтрации грунтов ( $k_{\phi}^y$ ) и нормативных допустимых средних значениях градиентов напора в области фильтрации для данного грунта  $I_{\text{доп}}$ :

$$K1 = Q_p(\text{НПУ}, k_{\phi}^y, I_{\text{доп}}) + \Delta Q. \quad (\text{К.2})$$

За критерии  $K2$  принимают максимальные расчетные расходы фильтрации, отвечающие нижней границе доверительного интервала, полученные при УВБ=ФПУ (особое сочетание) при уточненных в эксплуатации коэффициентах фильтрации грунтов  $k_{\phi}^y$  и градиентах напора, меньших на 10%

нормативных критических величин для данного грунта, т.е. равных  $0,9I_{cr.m}$ :

$$K2 = Q_p(\Phi k_{\phi}^y, НПУ, 0,9I_{cr.m}) - \Delta Q \quad (K.3)$$

Критериальные неравенства, ограничивающие расходы фильтрации:

$$Q_{нат} (НПУ) \leq K1 = Q_p (НПУ) + \Delta Q \quad (K.4)$$

$$Q_{нат} (\Phi ПУ) \leq K2 = Q_p (\Phi ПУ) - \Delta Q \quad (K.5)$$

В качестве прогнозной модели для расходов фильтрации рекомендуется использовать примерное равенство (стабильность) натуральных значений расходов фильтрации, измеренных при одинаковых напорах  $H_0$ , действующих на плотину в разные годы эксплуатации  $k_i$ :

$$Q_{нат} (k_i, H_0) = const \quad (K.6)$$

Для исключения ошибок в оценках состояния плотины по критериям  $K1$  и  $K2$  в неравенствах (K.4), (K.5) и равенстве (K.6) следует использовать для сравнения расходов фильтрации ( $Q_{нат}$ ), измеренных при отсутствии приточности на водомерные устройства поверхностных вод, не связанных с фильтрацией через плотину и основание (от дождей, снеготаяния, утечек).

### **5.11. Мутность воды, профильтровавшейся через плотину и ее основание (Приложение Л)**

При нормальном фильтрационном режиме (отсутствии суффозионных процессов) мутность профильтровавшейся через плотину и основание воды  $M_{\phi}^{нат}$  не должна превышать мутности воды в ВБ –  $M_{ВБ}$ . Мутность – весовое содержание твердых частиц грунта в единице объема воды (мг/л).

Если профильтровавшаяся вода содержит твердых частиц больше, чем вода ВБ, можно считать, что в плотине происходит механическая суффозия, при которой состояние плотины считается потенциально опасным. При росте мутности профильтровавшейся воды во времени при постоянном напоре состояние плотины следует оценивать как предаварийное.

Исходя из этого за критерий  $K1$ , задающий границу между нормальным и потенциально опасным состояниями, рекомендуется принимать:  $K1 \approx M_{ВБ}$ .

За критерий перехода плотины из потенциально опасного состояния в предаварийное условно принимают двойную мутность воды ВБ:  $K2 = 2M_{ВБ}$ .

Тогда критериальные соотношения, характеризующие состояние плотины по мутности профильтровавшейся воды, можно представить в виде:

- нормальное (исправное) состояние:  $M_{\phi}^{\text{нат}} \leq M_{\text{ВВ}} = K1$
- потенциально опасное состояние:  $K1 = M_{\text{ВВ}} < M_{\phi}^{\text{нат}} \leq 2M_{\text{ВВ}} = K2$
- предаварийное состояние:  $M_{\phi}^{\text{нат}} > 2M_{\text{ВВ}} = K2$

Показатель  $M_{\text{ВВ}}$  в зависимости от сезона года может меняться вследствие сезонной изменчивости мутности воды, притекающей в ВВ. Тогда численные значения приведенных критериев корректируют для разных сезонов.

### **5.12. Определение критериев безопасности бетонной водосливной плотины Воткинской ГЭС (Приложение М)**

От значений реакции плотины, определённой на стадии проекта для основного и особого сочетания нагрузок, можно перейти к проектным критериальным значениям  $K2$  и  $K1$  диагностических показателей, в т.ч. контролируемых КИА и которые используются в начальный период эксплуатации. В дальнейшем состав этих показателей и критериальные значения  $K1$  и  $K2$  подлежат корректировке на основе выявленных особенностей работы ГТС: наличия ослабленных зон и незатухающих процессов в основании и плотине, уровня стабилизации фильтрационных режимов и напряжённо-деформированного состояния (НДС) плотины [14].

Состав диагностических показателей и значения критериальных показателей рассмотрим на примере основных ГТС эксплуатируемого гидроузла.

**Водосливная бетонная плотина** (рис. М.1) разделена деформационными швами на 4 секции длиной по 48 м. Плотина представляет собой пустотелую пространственную контрфорсную конструкцию без сплошной фундаментной плиты под водосливом. Водослив опирается на верховую и низовую фундаментные плиты. Под водосливом фундаментная плита заменена тонкой анкерной плитой, толщиной 0,3 м, пригруженной грунтом. Анкерная плита состоит из верховой и низовой частей. Основание плотины дренируется плоским и глубинным дренажами. Плоский дренаж состоит из

слоя среднего песка толщиной 0,6 м, расположенного под анкерной плитой и под верхней фундаментной плитой между быками и контрфорсами.

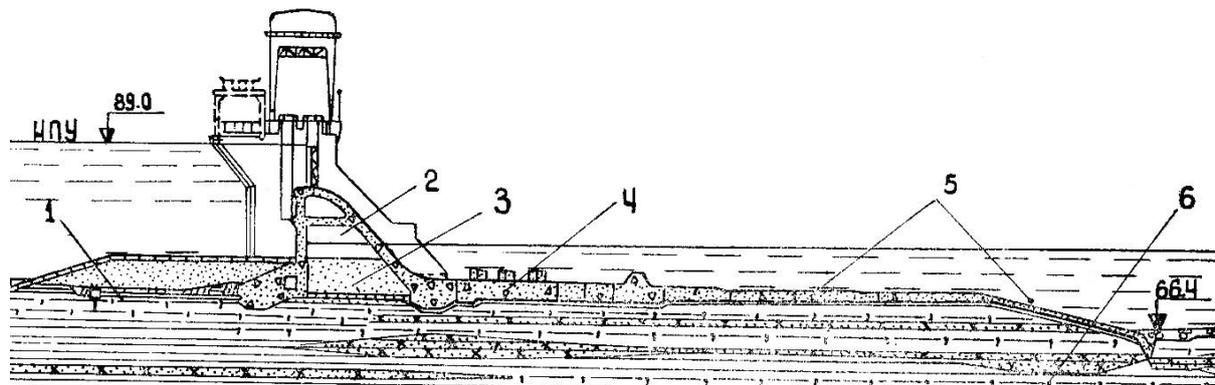


Рис. М.1. Поперечный разрез водосливной Воткинской плотины:

1 – анкерный понур; 2 – пустотелый профиль водослива; 3 – грунт фундамента плотины; 4 – водобой; 5 – рисберма и ковш; 6 – алевролитовые глины и алевролиты

В каждой секции имеется по четыре вывода из плоского дренажа в галерею верхней фундаментной плиты, которая через коллектор соединена с НБ. Плоский дренаж соединен с НБ через засыпку, для чего в анкерной плите имеются дренажные отверстия. Вертикальный дренаж выполнен для снятия давления напорных вод в основании и состоит из одного ряда вертикальных скважин с шагом 8 м.

Устойчивость плотины на сдвиг обеспечивается собственным весом, пригрузками воды и грунта и совместной работой водосливных секций и прикрепленных к их верховым и низовым плитам анкерного понура и анкерной плиты, соответственно. Анкерный понур плотины выполняет также роль противофильтрационного (ПФ) элемента, участвующего в обеспечении устойчивости водосливной части плотины. Устройство перед понуром вертикальной ПФ преграды вызвано намного большей проницаемостью основания в горизонтальном направлении, чем в вертикальном.

В основании водосливной плотины залегают слои алевролитовых глин, алевролитов и песчаников. Глины и алевролиты слабопроницаемы, их коэффициент фильтрации выражается тысячными долями метров в сутки. Коэффициент фильтрации песчаников, залегающих в виде линз в толще алевролитов и глин, изменяется в пределах 0,5–2,7 м/сутки.

## **1. Контролируемые показатели и технические средства контроля**

**Контролируемые показатели.** Натурные визуальные и инструментальные наблюдения за состоянием ГТС Воткинской ГЭС проводятся за:

а) уровнями ВБ и ЕБ; б) температурой наружной и в потернах здания ГЭС и водосливной плотины; в) температурой воды в бьефах; г) размывами русла за рисбермой; д) осадками секций водосливной плотины, здания ГЭС, подпорных стенок и грунтовых плотин; е) взаимными смещениями секций бетонных сооружений по вертикали, в плане вдоль потока и за раскрытием межсекционных швов; ж) противодавлением в основаниях здания ГЭС и водосливной плотины; з) пьезометрическими уровнями в теле и основании плотин из грунтовых материалов, а также в береговых примыканиях; и) фильтрационными расходами на водовыпусках дренажного коллектора грунтовых плотин; температурой воды в дренаже; к) уровнями мастики в шахтных шпонках; л) состоянием волнозащитных креплений напорных откосов грунтовых плотин.

Наблюдение за режимом фильтрации в основании бетонных ГТС и грунтовых плотин ведется с помощью напорных и безнапорных пьезометров ежемесячно.

Замеры расходов в закрытом дренаже грунтовых плотин производятся в контрольных пунктах на водовыпусках с помощью мерных водосливов.

Наблюдения за осадками ГТС и их оснований выполняют путем ежегодного нивелирования от опорной реперной сети высотных марок геодезической КИА (поверхностные и боковые марки, плиты-марки, глубинные марки и др.). Нивелирование марок производится с точностью 2-го класса от реперной сети, состоящей из опорных фундаментных и рабочих реперов. Точность определения марок  $+ 2$  мм. Наблюдения за взаимными смещениями секций относительно друг друга выполняются ежемесячно с помощью 3-марочных щелемеров, расположенных на межсекционных швах бетонных сооружений. Точность щелемерных измерений  $+ 0, 01$  мм.

## **2. Выбор диагностических показателей водосливной плотины ГЭС**

### ***Диагностические показатели уровней воды в пьезометрах***

Каждая секция водосливной плотины оснащена пьезометрическим створом (створы № 2–5), расположенным по оси секции, крайняя левая секция № 1 – дополнительным створом № 1 вдоль внешнего межсекционного шва для контроля сохранности шпонки. В основании каждой секции ведется контроль за напором в глубинных горизонтах основания водослива. В качестве ключевых зон подземного контура плотины выбраны области, где пьезометрами контролируется эффективность работы наиболее ответственных противофильтрационных устройств, а эпюры противодавления имеют наибольший вес по данным наблюдения. В состав диагностических показателей уровней воды в пьезометрах включены показания:

- а) пьезометров группы П-3 в конце понура для контроля состояния понура;
- б) пьезометров группы П-4 в дренаже основания флютбета за верховым зубом, контролирующие работоспособность верхового зуба и дренажа;
- в) пьезометров групп ПГ-4а и ПГ-4б, контролирующих напорные горизонты песчаника и алевролитов.

### ***Диагностические показатели взаимных смещений секций плотины***

На основе щелемерных измерений контролируются раскрытия межсекционного шва (координата X), горизонтальные смещения секций по потоку (координата Y) и вертикальные взаимные смещения (координата Z). За диагностические показатели приняты раскрытие шва и плановое смещение секций, определяемые по показаниям щелемеров на бычках ВБ и НБ и в потерне (створы № 1–3). По назначенным диагностическим показателям предполагается оперативно контролировать сохранность шпонок при смещениях секций по плановым координатам. Вертикальные относительные смещения секций не включены в состав диагностических показателей из-за затухания осадок секций. При появлении аномальных неравномерных осадок секций они выявляются щелемерными измерениями по координате Y.

В качестве *диагностического показателя осадки* секции водосливной плотины приняты значения осадок секции по верховой и низовой граням, осредненные по фронтальным высотным маркам, расположенным на бычках ВБ и НБ:  $M_{\text{ср}}^{\text{вб}} = (M1 + M2) / 2$  и  $M_{\text{ср}}^{\text{нб}} = (M9 + M10) / 2$ . Выбор этого показателя вызван близкими значениями осадок парных фронтальных марок. Неравномерные осадки секций наблюдались вначале эксплуатации, сейчас после 40 лет эксплуатации эти осадки стабильны и находятся в пределах точности нивелирования II класса.

### **3. Поверочные расчеты водосливной плотины и калибровка расчетной модели**

Согласно СНиП 33-01-2003 [14] ГТС рассчитывают по методу предельных состояний, недопущение которых обеспечивается системой коэффициентов из условия (4.5), приведенного в главе 4 пособия.

За годы эксплуатации плотины расчетные значения УВБ и УНБ почти не изменились, а в работе дренажа и ПФ–элементов не замечено снижения работоспособности. Тогда в предположении, что параметры сдвига плотины и понура (сцепление и коэффициент трения) не изменились, изменение коэффициента устойчивости следует ожидать в связи с непроектным распределением гашения напора в основании ГТС.

Остаточные напоры на всей длине ПФ–контура ниже проектных величин. По показаниям пьезометров, расположенных в понурной части основания, видно, что эффективность работы шпоры и понура выше проектной. В зоне понура установился поток стационарной фильтрации.

В то же время наблюдаемое распределение гашения напора в долях напора на ПФ элементах отлично от проектного, что объясняется тем, что при проведении проектных фильтрационных расчетов не было учтено влияние водопроницаемости бетона на параметры фильтрации, особенно заметные при наличии малопроницаемого основания. Известно, что при относительной водопроницаемости бетона ГТС ( $K_{\text{бет}}/K_{\text{осн}}$ ), большей 0,02,

заметно уменьшается эффективность работы понура по гашению фильтрационного напора на нем и возрастает дренирующий эффект потерн бетонных ГТС на фильтрацию в их основаниях. Относительная водопроницаемость бетона Воткинской водосливной плотины составляет 0,015. Поэтому в натуре наблюдаются высокие пьезометрические напоры под понуром и низкие, близкие к взвешивающему давлению, под фундаментной плитой здания ГЭС. Основные отклонения в ординатах эпюры противодействия от проектных значений произошли в основании понура и верхового зуба.

С учетом особенностей работы ПФ–контура и требований СНиП 2.06.06-85 и СНиПЗЗ-01-2003 [17, 16] рассматривались следующие нагрузки:

*Для основного сочетания нагрузок:*

1. Действие наибольшего расчетного напора при НПУ.
2. Пропуск расчетного паводка обеспеченностью 1% при нормально работающих ПФ и дренажных устройствах.

*Для особого сочетания нагрузок:*

1. Действие наибольшего расчетного напора при НПУ при нарушении понура как противофильтрационного элемента (трещина в понуре).
2. Пропуск поверочного паводка обеспеченностью 0,1% при нормально работающих ПФ и дренажных устройствах.

#### **4. Построение прогнозных моделей**

##### ***Детерминистическая прогнозная модель***

Детерминистическая прогнозная модель (п. 4.1. «Методики» [14]) использовалась при определении критериальных значений  $K_2$  показаний пьезометров по значениям эпюры противодействия в первом расчетном случае особого сочетания нагрузок. Распределение противодействия по подземному контуру плотины при нарушении понура получено на основе метода ЭГДА с учетом дренирующего эффекта потерны и дренажных скважин. Действующий напор перед верховым зубом получен  $0,9H$ , в начале понура (у основания шпоры) –  $0,8H$ . Остаточный напор в дренаже водо-

слива за верховым зубом – 0,2Н; далее противодействие равно УНБ.

В расчетах устойчивости секции плотины механические характеристики грунтов основания приняты по данным проектных исследований, которые равны:  $\varphi=22^0$ , сцепление  $C=0,2$  кг/см<sup>2</sup>, коэффициент трения  $f=0,45-0,47$ .

### ***Статистическая прогнозная модель***

При назначении критериев  $K1$  и  $K2$  использовались также статистические прогнозные модели. Статистические модели получены на основе натуральных показаний пьезометров. Анализируемая временная выборка за 1993–2000 г.г. соответствует требованиям «Методики» [14], чтобы диапазон изменения действующих нагрузок включал нагрузки, близкие к условиям нагрузок основного сочетания. Полученное число членов временного ряда удовлетворяет требованиям допустимого минимального объема выборки ( $\geq 100$ ).

На основе опыта наблюдений на наших и зарубежных гидроузлах за внешние факторы (к показаниям которых наиболее чувствительны пьезометры) приняты уровни ВБ и НБ. Уровень влияния каждого из факторов на показания пьезометров обусловлен близостью к нему пьезометра, наличием ПФ–элементов между пьезометром и внешним фактором и их работоспособностью, а также проницаемостью основания.

Значения коэффициентов двухфакторной регрессионной модели вычислялись с помощью программного пакета «Statistica» фирмы «Statsoft».

Критериальные значения  $K1$  и  $K2$  назначались равными верхней границе доверительного интервала прогноза показаний пьезометра при нагрузках основного сочетания. Величина этого интервала принималась равной двум стандартам ( $\pm 2\delta$ ) погрешности прогноза модели, что обеспечивало попадание показаний пьезометров внутрь этого интервала с вероятностью 0,95.

## **5. Определение критериев безопасности водосливной плотины**

*Критериальные значения пьезометрических уровней в основании бетонной водосливной плотины и критериальные значения  $K2$  диагностических показателей пьезометрических уровней в основании понура* получены

методом ЭГДА для особого сочетания нагрузок (максимальный напор при НПУ и трещина в понуре).

Водосливная плотина. Критериальные значения пьезометрических уровней в основании секции № 4

Табл. М.1

№ п/п <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	№ секций, № створа, расположение КИА в створе	№ КИА, пьезометры закладные	Максимальное измеренное значение показателя	Критериальные значения диагностических показателей				Способ определения диагностического показателя		
				Проект, 1959	Уточнённое (Лен-гидро-проект), 1976	ПДЗ ОАО НИИЭС, 1996	Эксплуатационные значения			
				-	м	м	<b>K1, м</b>	<b>K2, м</b>	K1	K2
1	Секция 4 Створ 5, в конце понура	П1-3С4-5	74,74 71,3	79,2 (26% H)	81,1 (40% H)	80,8 (38% H)	<b>76,6</b>	<b>86,7</b>	Прогноз по статистической модели $V_0+V_1*УВБ+V_2*УНБ +/-2*\delta$ $= 24,69 + УВБ*0,36+УНБ*0,24+/-2*0,6$	По данным расчетов с учетом исследований
2	Секция 4 Створ 5 за верховым зубом, в дренаже водослива	П4-С4-5	71,7 65,70	75,8 (0% H)	75,8 (0% H)	-	<b>75,4</b>	<b>76,1</b>	Прогноз по статистической модели $V_0+*УНБ +/-2*\delta = 6,25+УНБ*0,90+/-2*0,40$	
3	Секция 4 Створ 5, в напорном горизонте, под верховым зубом	ПГ4А-СЗЧ пьезометр глубинный	72,21 65,61	-	-	-	<b>75,6</b>	-	Прогноз по статистической модели $V_0+*УНБ +/-2*\delta =13,31+УНБ*0,81+/-2*0,60$	-

*Примечание.* K1 пьезометрического уровня получено для условий основного сочетания нагрузок: УВБ (НПУ)= 89,0 м; УНБ=75,80 м; K2 пьезометрического уровня в основании понура получено для особого сочетания нагрузок: УВБ (НПУ) = 89,00 м; УНБ = 66,0 м; трещина в понуре. K2 пьезометрического уровня в основании водослива получено для особого сочетания нагрузок: УВБ (НПУ) = 89,50 м; УНБ = 76,50 м.

*Критериальные значения K2 диагностических показателей пьезометрических уровней в основании водослива приняты по результатам расчетов прогнозной статистической модели для особого сочетания нагрузок (пропуск поверочного расхода). Значения эпюры противодействия оказались*

близки значениям УНБ при пропуске поверочного паводка. Достоверность прогноза по этой статистической модели обоснована тем, что используемый при построении модели временной ряд показаний пьезометров и действующих факторов включал форсированные значения УНБ и расчетное значение ФПУ (8,95 м) мало отличается от НПУ (на 0,5 м).

*Критериальные значения  $K1$  уровней воды в пьезометрах приняты по результатам расчетов прогнозной статистической модели для основного сочетания нагрузок (пропуск расчетного расхода). Уровни воды в пьезометрах, не превышающие значений  $K1$ , соответствуют нормальной и безопасной работе сооружения согласно расчетам устойчивости секций плотины.*

Критериальные значения показателей  $K1$  и  $K2$  пьезометрических уровней секции № 4 водосливной плотины приведены в таблице М.1.

#### ***Критерии безопасности взаимных смещений секций плотины***

При назначении критериальных значений  $K1$  диагностических показателей взаимных смещений секций плотины по координатам  $X$  и  $Y$  учитывались три фактора: напор, температура воздуха и влияние неравномерной осадки секций (в виде временного тренда показаний). Рассматривались два варианта: экстремальные значения температур при среднемноголетних значениях напора и максимально-минимальные значения напора при среднемноголетних значениях температур воздуха. Было установлено, что влияние напора незначимо по сравнению с другими факторами.

При наличии временного тренда в показаниях щелемера прогноз назначался на 2004 год, т.е. на пятый год после рассмотренного периода эксплуатации, когда изменения в состоянии ГТС или КИА потребуют корректировки прогноза.

Взаимные вертикальные смещения секций (по координате  $Z$ ) не рассматривались по причине затухания их осадок. При появлении аномальных неравномерных осадок секций они будут выявляться щелемерными измерениями по координате  $Y$ , т.к. перемещения секций имеет характер враще-

ния с центром, сдвинутым ближе к низовой грани ГТС относительно его оси. Раскрытие швов (координата  $X$ ) секций плотины носит сезонный характер и коррелировано с наружной температурой,  $T^0C$ . Наибольший многолетний размах раскрытия шва на дневной поверхности (створы 1 и 2) получаем на крайних секциях при наибольшем наблюдаемом колебании температуры воздуха. Временные тренды в раскрытии швов малы.

Критериальные значения показателей взаимных смещений секций бетонных сооружений определялись с использованием регрессионной модели. Предполагалась линейная зависимость деформации бетона плотины от температуры как в диапазоне натуральных наблюдений, так и для расчетных значений температуры.

Прогноз критериальных значений  $K1$  по координате  $X$  назначен по регрессионной модели при наблюдённом минимуме температуры воздуха  $-50^{\circ}C$ ; по наибольшей координате  $Y$  при действии одного из трех факторов: максимального напора основного сочетания нагрузок ( $H=27$  м), одной из экстремальных температур ( $-50^{\circ}C$  или  $+38^{\circ}C$ ) и по прогнозу временного тренда на 2004 г.

*Критериальные значения  $K2$  диагностических показателей взаимных смещений секций плотины по координатам  $X$  и  $Y$  назначены по условиям нормальной работы шахтной шпонки в межсекционном шве и равны 100 мм.*

Критериальные величины взаимных смещений секций  $K1$  и  $K2$  по результатам наблюдений по щелемерам плотины даны в табл. М.2.

### ***Критериальные значения осадок секций водосливной плотины***

Прогноз осадок секций водосливной плотины выполнялся по статистической регрессионной модели с учетом затухания осадок. Аппроксимация осадок ( $Z$ ) выполнена по двучленному полиному экспоненциального типа:  $Z_{MM} = B_0 + B_1 \exp(-\alpha T)$ .

*Критериальные значения  $K1$  осадки секций* назначались равными нижней границе доверительных интервалов регрессионных моделей для прогноза

осадки на 2004 г. Доверительный интервал, принимался равным двум стандартам ( $\pm 2\delta$ ) ошибки оценки модели относительно кривой осадок.

*Водосливная плотина. Критериальные значения взаимных смещений секций №3 и №4 по показателям щелемеров*

Табл. М.2

№ п/п	№ щелемерного створа, межсекционные швы	№ КИА, (щелемеры 3-х марочные)	Максимальное/минимальное измеренное значение показателя, мм	Критериальные значения диагностических показателей		Способ определения диагностического показателя	
				Эксплуатационные значения		K1	K2
K1, мм      K2, мм							
<b>ВЗАИМНЫЕ СМЕЩЕНИЯ СЕКЦИИ ПО ОСИ (раскрытие межсекционных швов)</b>							
1	Створ 1–бычки ВБ, шов 3–4 секции	Щ1/9-Х	+27,98 +11,90 тренд возрастающий: 1,2 мм/год	<b>+38,80</b>	<b>100</b>	Прогноз по статистической модели: $VO+V1*T+V2*TV+/-2*\delta = 14,47+1,44*T-0,15**(TV_{60})+/-2*2,10$	По конструктивным ограничениям
2	Створ 2–бычки НБ, шов 3–4 секции	Щ2/9-Х	+2,10 -6,90	<b>+18,10</b>	<b>100</b>	Прогноз по статистической модели: $VO+V1*TV+/-2*\delta = 1,06-0,29*TV+/-2*1,30$	То же
3	Створ 3–потерна, шов 3–4 секции	Щ3/9-Х	-2,57 -3,87	<b>-1,40</b>	<b>100</b>	Прогноз по статистической модели: $VO+V1*TV_{300}+/-2*\delta = -3,14-0,01*TV_{300}+/-2*0,20$	То же
<b>ВЗАИМНЫЕ СМЕЩЕНИЯ СЕКЦИЙ ПО ОСИ У (в плане, вдоль оси шва)</b>							
4	створ 1 (бычки ВБ), шов 3–4 секции	Щ1/9-У	+0,42	<b>+1,40</b>	<b>100</b>	Прогноз по статистической модели: $VO+V1*TV_{90}+/-2*\delta = -2,88+0,08*H-0,02*TV_{90}+2*0,30$	То же

*Примечания:* 1) Т – время (годы) = (T<sub>i</sub>-T<sub>0</sub>); T<sub>0</sub> – год начала отсчета (начало выборки положенной в основание регрессионной модели –1990 г.); T<sub>i</sub> – год прогноза. 2) Н – напор, м; 3) TV – среднесуточная температура воздуха; при отставании во времени смещения секций относительно температурных воздействий использовался временной ряд температур со сдвигом, определенным по взаимно корреляционной функции показаний щелемеров и температуры воздуха; TV<sub>60</sub>, TV<sub>90</sub>, TV<sub>300</sub> – температура воздуха за 60, 90 и 300 суток до дня выполнения замеров по щелемерам.

*Критериальные значения K2 осадки секций* принимались равными значениям нижних границ доверительных интервалов, равным трем стандартам ( $\pm 3\delta$ ) ошибки оценки модели относительно кривой осадок. Критериальные значения показателей K1 и K2 осадок плотины даны в табл. М.3.

п/п	№ секций, отметка заложения КИА	№ КИА, № высотных марок	Измеренное значение показателя (2000 г.), мм	Критериальные значения диагностических показателей			Способ определения диагностического показателя	
				Проектное, уточнённое (Ленгидропроект, 1976 г), мм	Эксплуатационные значения		K1	K2
					<b>K1,</b> <b>мм</b>	<b>K1,</b> <b>мм</b>		
ОСАДКИ СЕКЦИЙ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ (средняя по 2-м высотным маркам со стороны ВБ на отм. 91,0 м и НБ на отм. 71,0 м)								
1	Секция №4 отм. 91,0 м	М-4ср 4-1 4-2щ	<b>-121</b> -125 -118	-130	<b>-125</b> 2004 г	<b>-128</b>	Прогноз по статистической модели В0-В1 $*Exp(-\alpha T) - 2*\delta =$ $121,00 + 14,13*Exp(-$ $0,06*T) - 2*2,0$	Прогноз по асимптоте статистической мо-
2	Секция №4 отм. 71,0м	4-10б	<b>-85</b>	-130	<b>-90</b> 2004 г	<b>-102</b>	Прогноз по статистической модели В0-В1 $*Exp(-\alpha T) - 2* =$ $- 96,00 + 26,0*Exp(-$ $0,02*T) - 2*2,0$	То же

Примечания:

1. T – время, единица исчисления – годы (отсчет ведется с начала наблюдений, 1962 г.)
2. Значения K1 получены по прогнозу на 2004 г.

### 5.13. Определение критериев безопасности земляной плотины Воткинской ГЭС (Приложение Н)

Земляная плотина – правобережная пойменная плотина № 2, сопрягающая напорный фронт с правым берегом, выполнена однородным профилем, намывным из песков местных карьеров, с отметкой гребня 93,5 м; максимальный напор при НПУ – 23 м. Плотина возводилась способом двухстороннего намыва аллювиальных песков, слагающих пойму р. Камы. Дренажи плотин представляют собой комбинированную конструкцию из наклонной части и дренажной призмы с отводящей железобетонной трубой. Для наблюдения за работой дренажа плотины предусмотрены смотровые железобетонные колодцы, расположенные по оси дренажа через 150 м друг от друга. Сброс дренажных вод производится через водовыпуски.

Земляная плотина располагается на аллювиальных отложениях (песчаные и гравийно-галечниковые) мощностью до 12 м в пойменной части и

до 30 м на участке примыкания к правому берегу.

Коэффициенты фильтрации на стадии проекта были приняты:

для супесей и пылеватых песков – до 1 м/сутки; для песков – 10 м/сутки; для гравийно-галечниковых отложений – 30 м/сутки.

Ниже аллювиальных отложений залегают водоупорные пермские глины.

### **1. Контролируемые показатели и технические средства контроля**

*Положение кривой депрессии* в измерительном створе плотины контролируется пьезометрами, установленными на гребне плотины, на низовой берме и перед наклонным дренажем. *Изменение напора фильтрационного потока в основании* контролируется пьезометрами, установленными под гребнем плотины, перед и за дренажем (в паре с пьезометром в теле плотины) и пьезометром на низовой пойме. Плотина оборудована восемью пьезометрическими створами

Трасса закрытого дренажа плотины проходит в низовой дренажной призмe у основания низового откоса и оборудована водовыпуском на ПК 40 + 65. На трассе дренажа от ПК 37 до ПК 41 + 50 отмечена просадка коллектора (до 0,8 м) на длине в 70 м; коллектор на 70% живого сечения заилен мелким песком.

*Замеры расходов в закрытом дренаже* производятся в контрольных пунктах на водовыпусках с помощью мерных водосливов.

*Наблюдения за осадками сооружений и их оснований* выполняются путем ежегодного нивелирования от опорной реперной сети поверхностных марок геодезической КИА. Поверхностные марки запроектированы в целях получения отдельно данных по осадкам основания и тела плотины: поверхностные реперы установлены в теле плотины, а плиты-марки – в основании. Марки размещены в пяти створах. Типовое расположение марок в измерительном створе: поверхностная марка на гребне плотины; поверхностная марка и плита-марка на низовой берме; поверхностная марка и плита-марка перед наклонным дренажем.

Нивелирование геодезической КИА производится вторым классом точности от реперной сети, состоящей из опорных фундаментных и рабочих реперов. Точность определения отметок марок составляет  $\pm 2$  мм.

*Качественные показатели состояния грунтовой плотины.* Натурные визуальные наблюдения за состоянием грунтовой плотины проводятся за:

- состоянием гребня и откосов грунтовой плотины для быстрого обнаружения локальных просадок, оползней и трещин гребня и откосов плотины;
- состоянием волнозащитных креплений напорных откосов грунтовых плотин для своевременного обнаружения повреждений плит крепления, обнаружения дефектов шовного уплотнения плит, пустот под плитами;
- состоянием низового откоса и береговых примыканий для обнаружения локальных размывов откосов, выклинивания фильтрационных вод на откосе плотины и в примыкании плотины к бетонным сооружениям;
- заболачиванием основания в нижнем бьефе плотины;
- состоянием дренажа плотины.

## **2. Выбор диагностических показателей для грунтовой плотины**

К диагностическим показателям, позволяющим дать оперативную оценку безопасности системы «сооружение–основание–водохранилище», отнесены расходы фильтрации в закрытом дренаже плотины, отметки уровней воды в пьезометрах, градиенты напора и осадки плотины и ее основания.

Диагностические показатели должны быть оптимальными по количеству задействованного КИА и контролировать прежде всего те зоны сооружения, где его состояние не стабилизировалось и процессы носят незатухающий характер.

### *Диагностические показатели расхода воды в закрытом дренаже*

Дренажные расходы являются интегральным показателем и потому более информативны, чем локальные показатели (пьезометрические уровни), которые характеризуют состояние сооружения в ограниченной зоне. Желательно включать в состав диагностических показателей дренажные расхо-

ды, измеряемые на всех водовыпусках закрытого дренажа. За диагностический показатель расхода в закрытом дренаже плотины № 2 приняты величины расхода на мерном водосливе водовыпуска № 1.

### *Диагностические показатели уровней воды в пьезометрах и градиентов напора в теле плотины*

При назначении состава диагностических показателей выбирались наиболее ответственные створы для контроля изменений в положении кривой депрессии, в которых назначались наиболее опасные зоны в створе. К таким створам отнесены: створы с наибольшей высотой плотины, створы с самым высоким положением кривой депрессии и створы, расположенные в сопряжениях с бетонными сооружениями.

В качестве *диагностических показателей, контролирующих положение кривой депрессии* в измерительном створе, приняты показания пьезометров, расположенных: в верховой и низовой призмах плотины; под гребнем плотины; перед дренажем; в основании плотины, перед и за дренажем.

Изменения в положении кривой депрессии можно ожидать в верховой призме плотины как из-за разуплотнения швов плит волнозащитного крепления (создающего экранный эффект), так и при дальнейшей кольматации верхового откоса. Заметные изменения положения кривой депрессии в низовой призме плотины могут быть вызваны нарушениями в работе дренажа или нарушениями фильтрационной (механической) устойчивости грунтов основания в зоне разгрузки фильтрационного потока.

Низкая достоверность наблюдений за дренажным расходом из-за нарушений дренажного коллектора обусловила необходимость включения всех восьми створов в состав диагностических показателей за исключением пьезометров низкой работоспособности, к которым отнесены пьезометры:

- с коэффициентом корреляции относительно всех факторов  $<0,4$ ;
- с временным трендом показаний.

В качестве створа, показания пьезометров которого использованы при

назначении критерия  $K_2$  на основе оценки устойчивости плотины, назначен створ № 2 на ПК39 + 48. Пьезометрический створ выбирался из следующих соображений:

- положение кривой депрессии самое высокое среди всех створов;
- высота плотины в створе близка к расчетной.

В состав диагностических показателей включен *градиент напора* на выходе в закрытый дренаж, где, как показал опыт эксплуатации грунтовых плотин, возможна постепенная кольматация обратного фильтра дренажа с выносом материала фильтра в дренаж. Подобные отказы дренажа вызваны ошибками в подборе состава фильтра или нарушениями его отсыпки. Градиенты напора на входе в дренаж грунтовых плотин определялись разницей показаний пьезометров, расположенных у дренажа, и уровнем нижнего бьефа (или отметкой оси закрытого дренажа) и расстоянием между пьезометром и осью дренажа  $L$ , м.

*Диагностические показатели градиентов напора* назначались в створах плотин с наиболее высоким положением кривой депрессии перед дренажем и с наиболее близким расположением пьезометра от дренажа.

*Диагностические показатели градиентов напора* определены на основе показаний пьезометров № 11 и скважины № 5 в измерительном створе 2.

#### ***Диагностические показатели осадки земляной плотины и основания***

Значения осадок плотины в пяти контролируемых створах выбраны в качестве *диагностических показателей осадки тела и основания плотины*.

*Диагностические осадки тела плотины* определены показаниями поверхностных марок, расположенных на гребне и перед наклонным дренажем.

*Диагностическими показателями осадки основания плотины* назначены показания плит-марок, расположенных под гребнем плотины (при нарушении последних – под низовой бермой) и в основании дренажа, контролирующие выпор или появление суффозии в зоне разгрузки фильтрационного потока.

### 3. Поверочные расчеты и корректировка расчетной модели

В соответствии с действующими нормами [16-19], проектное обоснование безопасности сооружений гидроузла выполняется при условии недопущения предельных состояний по устойчивости и прочности ГТС: На стадии проекта это требование выполняют путем следующих расчётов:

- фильтрационной прочности плотины и ее основания (градиенты напора);
- устойчивости откосов плотины и берегов;
- осадок тела плотины и основания;
- прочности креплений откосов на действия волн и льда.

*Назначение критериев безопасности  $K1$  и  $K2$  по показаниям пьезометров* в теле земляной плотины производилось для условий основного и особого сочетания нагрузок, определяемых согласно требованиям действующих СНиП [16, 18].

*Критериальные значения  $K1$  положения кривой депрессии* назначались для условий основного сочетания нагрузок при пропуске расчетного паводка обеспеченностью 1%: уровни бьефов – УВБ (НПУ) = 89,00 м, УНБ = 75,80 м; нормально работающий дренаж. Прогноз значений  $K1$  получен с использованием регрессионной статистической модели.

*Критериальные значения  $K2$  положения кривой депрессии* назначались для условий особого сочетания нагрузок. Расчетные случаи особого сочетания нагрузок принимались по требованиям СНиП [16] для условий пропуска поверочного расхода обеспеченностью 0,1% и при условиях пропуска расчетного расхода обеспеченностью 1% и при неработающем (закольматированном) наклонном дренаже.

Значения  $K2$  положения кривой депрессии определены по результатам фильтрационных расчетов положения кривой депрессии и устойчивости откосов плотины для варианта с минимальным значением коэффициента устойчивости.

Рассмотрены три случая состояния земляной плотины по критерию ус-

тойчивости при воздействии особого сочетания нагрузок:

1. *Верховой откос*. Отметка ФПУ = 89,5 м; УНБ = 76,5 м.
2. *Низовой откос*. Отметка ФПУ = 89,5 м; УНБ = 76,5 м.
3. *Низовой откос*. Отметка НПУ = 89,0 м; УНБ = 75,8 м; наклонный дренаж заcolmатирован.

Расчеты устойчивости откосов земляных плотин Воткинской ГЭС проводились согласно СНиП 2.06.05-84 [18] по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения с учетом фильтрационных сил по методу Терцаги–Флорина [20].

Минимальные коэффициенты устойчивости ( $K_{\min}=1,31$ ) получены для низового откоса при особом сочетании нагрузок для третьего расчетного случая, когда полностью заcolmатирован дренаж. По результатам расчета получили выклинивание потока фильтрации на низовой откос наверху наклонного дренажа.

#### **4. Построение прогнозных моделей**

##### ***Статистическая регрессионная модель***

За внешние факторы воздействия на пьезометрический уровень в теле и основании плотины при построении регрессионной модели принимались значения уровней ВБ и НБ. Уровень депрессионной поверхности в грунтовой плотине располагается ниже проектного. За время эксплуатации значения УВБ неоднократно достигали НПУ.

Прогноз значений  $K1$  выполнялся по регрессионной модели на основе выборки временного ряда наблюдений за последний десятилетний период, включающий показания пьезометров при НПУ. Несмотря на то, что расчетный паводок не наблюдался за период эксплуатации при прогнозе с использованием УНБ = 75,80 м (значения УНБ за этот период не выше 74,0 м), предполагалось, что в диапазоне УНБ 74,0–75,8 м обеспечено сохранение тесноты и формы связи значений УНБ и показаний пьезометра. Основание: незащищенный низовой откос, высокие значения корреляции показаний

пъезометров с действующими факторами и  $F$ -критерия как параметра статистической модели. Значения  $K1$  назначались равными прогнозируемым показаниям пьезометра по регрессионной модели с учетом доверительного интервала равного трем стандартам ( $3\sigma$ ) погрешности прогнозной модели относительно показаний КИА. Рост доверительного интервала до  $3\sigma$  (обычно принимается  $2\sigma$ ) вызвано наличием неучтенных факторов, имеющих значимое влияние в отдельных показаниях пьезометров, но исключая человеческий фактор и отказ КИА.

#### *Детерминистическая модель*

Если предположить, что физико-механические свойства плотины и ее основания соответствуют проектным положениям, то главным фактором, определяющим фильтрационную прочность и неустойчивость откосов, остается положение кривой депрессии при особом сочетании нагрузок.

Положение кривой депрессии определяется методом ЭГДА или численным методом. В данном примере использовался численный метод локальных вариаций. Расчет выполнялся для створа плотины на ПК 39+48.

В качестве исходных характеристик грунтов принимались проектные значения их физико-механических и фильтрационных характеристик. Наиболее высокое положение депрессионной кривой получено при неработающем дренаже. Отметки выхода воды на низовой откос получены в пределах отметок 79 м – 77 м (свободная поверхность наклонного дренажа).

### **5. Определение критериев безопасности земляной плотины**

#### *Критериальные значения положения кривой депрессии*

*Критериальные значения  $K1$  показаний пьезометров* назначались по результатам прогноза пьезометрических уровней в условиях пропуска расчетного паводка, выполненного по статистической модели.

Расчет устойчивости откосов для основного сочетания нагрузок не производился из следующих соображений:

- положение кривой депрессии остается ниже проектных предположений;

- методика оценки устойчивости не изменилась за годы эксплуатации;
- проектные коэффициенты устойчивости больше действующих нормативных.

Критериальные значения  $K_2$  уровней воды в пьезометрах принимались по прогнозу, полученному для створа № 2, в котором был получен наименьший коэффициент устойчивости откосов. При прочих равных условиях в выбранном створе принималось наиболее высокое положение депрессионной кривой.

Значения  $K_1$  и  $K_2$  диагностических показателей пьезометрических уровней в земляной плотине для створа № 2 приведены в табл. Н.1.

*Земляная плотина № 2 Воткинской ГЭС. Критериальные значения пьезометрических уровней в теле и основании плотины*

Табл. Н.1

№ п/п	№ створа, ПК □□□	№ КИА, пьезометры опускные, расстояние от оси плотины, м; отметка низа водоприемника, м	Наибольшее измеренное значение показателя, отм. уровня воды, м	Критериальные значения диагностических показателей			Способ определения диагностического показателя	
				Проектное, уточнённое (Ленгидропроект, 1976 г.), мм	Эксплуатационные значения		$K_1$	$K_2$
					$K_1$ , мм	$K_2$ , мм		
<b>ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЕ УРОВНИ В ТЕЛЕ И ОСНОВАНИИ ПЛОТИНЫ СТВОР 2</b>								
1	II ПК 39+45	П-8 -30,15 Отм. 72,84	80,35	86,60	81,50	88,80	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1^*$ $УВБ+/-3*\delta=$ 51,80 +0,31* $УВБ +3*0,60$	По результатам полученным численным методом
2	II ПК 39+45	П-11 +64,50 Отм. 70,59	75,30	77,00	75,30	78,80	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1^*$ $УВБ+/-3*\delta=55,0$ $+ 0,22*УВБ$	То же
3	II ПК 39+45	ПГ-13 +95,50 Отм. 64.20	74,71	-	75,00	-	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1^*$ $УВБ+/-2*\delta=60 +$ $0,16*УВБ+3* 0,1$	-

*Примечания:*

1)  $K_1$  получено при: УВБ (НПУ)=89,0 м; УНБ=75,70 м; дренаж работает нормально; 2)  $K_2$  – при НПУ (89,50м) и УНБ (75,80м) и отказе наклонного дренажа

### **Критерии безопасности значений фильтрационных расходов**

Наблюдаемые величины *дренажных расходов* намного ниже проектных.

*Критериальные значения K1 расхода* плотины № 2 назначены по прогнозу регрессионной модели для расчетного напора  $H=23,0$  м для основного сочетания нагрузок. Для плотины № 2, где ось закрытого дренажа выше УНБ, за внешний фактор воздействия принимались значения ВБ.

*Критериальные значения K1 градиентов напора* на входе в дренаж назначают с помощью регрессионной модели. Прогноз выполняют для расчетного напора  $H=23$  м для основных нагрузок: НПУ=89,0 м, УНБ=66,0 м. Наблюдаемые значения градиентов ниже нормативных (не более 0,37).

*Критериальные значения K2 градиентов напора* на входе в дренаж назначают по нормативным предельным градиентам напора для мелких песков намывных плотин. Значение *K2* принято равным 0,9% критического градиента напора  $I_{cr. м}$ .

Критериальные значения показателей расхода и градиентов напора в земляной плотине приведены в таблицах Н.2 и Н.3.

Земляная плотина Воткинской ГЭС. Критериальные значения фильтрационного расхода в закрытом дренаже

Табл. Н.2.

№ п/п	Расположение водослива (ПК)	№ мерного водослива на водовыпуске дренажа, № КИА	Наибольшее измеренное значение показателя, $q$ л/с	Критериальные значения диагностических показателей				Способ определения диагностического показателя	
				Проект Ленгидропроекта, (1959 г.), л/с	Расчетные значения ВНИИГА, (1998 г.), л/с	Эксплуатационные значения		K1	K2
						K1, л/с	K2, л/с		
<b>РАСХОД В ЗАКРЫТОМ ДРЕНАЖЕ</b>									
1	ПК 39+48	Водослив №1, расход суммарный – $Q=2$ , л/с	148,06	417,00	204,00	170,0	-	Прогноз по статистической модели $q=B0+B1*T+B2*УВБ +/-2*\sigma = 47,6 +8,24 *T +9,14*УВБ +/-2*10,00$	-

*Примечание.*

T – число лет с начала выборки (1991 г.); УВБ – уровень ВБ, м

Земляная плотина Воткинской ГЭС. Критериальные значения градиента фильтрации на вход в закрытый дренаж

Таб. Н.3.

№ п/п	№ створа, ПК	№ КИА, пьезометры опускные, расстояние от оси дренажа $L$ , м; отм. оси дренажа	Наибольшее измеренное значение показателя	Критериальные значения диагностических показателей			Способ определения диагностического показателя	
				Проектное, Ленгидропроект, (1959 г.), мм	Эксплуатационные значения		К1	К2
					К1, мм	К2, мм		
<b>ГРАДИЕНТ НАПОРА НА ВХОДЕ В ДРЕНАЖ</b>								
1	Ств. 2 ПК 39+45	П-11 $L=17,5$ м, отм. 71,85 м	0,15	-	0,20	0,62	Прогноз по статистической модели	По СНиП 2.06.85-84, п. 5.5

### ***Критерии безопасности осадки земляной плотины***

Учитывая разницу в начале наблюдений по плитам-маркам в основании и по поверхностным реперам в теле плотины для сравнительного анализа осадок выбран период 1962–2000 г.г.

На правобережной пойменной плотине № 2 наблюдения за осадками тела и основания ведутся в 5-ти створах: на ПК 37+48, ПК 39+48, ПК 41+48, ПК 43+48, ПК45+48. Наибольшие осадки (68,0 мм) гребня плотины на ПК 37+48. Интенсивность осадок гребня плотины на этих створах не более 1 мм/год, а относительная осадка гребня за период 1961–2000 годы составила  $0,0035H$  (высоты плотины), что говорит о нормальном процессе осадок к 42 году эксплуатации.

Разница в осадках гребня плотины, низовой бермы и дренажа составляет 15–20 мм. За исключением ПК 39+47, где осадки дренажа близки к осадкам низовой бермы. На этом пикете поврежден дренажный коллектор. Интенсивность осадки наклонного дренажа на ПК 39+48 (0,5 мм/год) – самая высокая в сравнении с другими плотинами. Осадки основания затухли.

Прогноз осадок тела и основания грунтовой плотины определялся с учетом затухания осадок (статистическая модель экспоненциального типа).

Значения  $K_1$  и  $K_2$  осадок тела плотины № 2 назначались по прогнозу по статистической модели на конец ближайшего пятилетнего периода с учетом значений доверительного интервала, в 28 и 38, соответственно. Значения  $K_1$  и  $K_2$  для осадок основания плотины № 2, где они почти закончились, назначались равными асимптоте с учетом значений доверительного интервала, в 28 и 38, соответственно.

Критериальные значения осадок  $K_1$  и  $K_2$  приведены в таблице Н.4.

Земляная плотина № 2 Воткинской ГЭС. Критериальные значения осадок тела плотины и основания

Табл. Н.4.

№ п/п	Местоположение в плане, отметка заложения КИА	№ и тип КИА	Максимальное измеренное значение показателя, мм	Критериальные значения диагностических показателей				Способ определения диагностического показателя	
				Проектное, уточненное (Ленгидропроект, 1976 г.), мм	ОАО НИИЭС (1996 г.), мм	Эксплуатационные значения		$K_1$	$K_2$
						$K_1$ , мм	$K_2$ , мм		
<b>ОСАДКИ ТЕЛА ПЛОТИНЫ И ОСНОВАНИЯ</b>									
<b>СТВОР № 1</b>									
1	ПК 37+48 гребень плотины, отм. 91,5 м	Репер по-верхностный, Рп14	-92	-450	-99	-99	-110	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1 * Exp(-\alpha T) - 2 * \delta = 106,0 + 61,0 ** Exp(-0,04 * T) - 2,0 * 2,0$	Регрессионная модель (9) $+ 3 * \delta$
2	ПК 37+48 низовая берма, отм. 88,0 м	Репер по-верхностный, Рп13	-63	-	-66	-66	-75	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1 * Exp(-\alpha T) - 2 * \delta = - 63,60 + 32,45 ** Exp(-0,06 * T) - 2 * 2,5 Exp(-\alpha T) - 2 * \delta$	Прогноз по асимптоте статистической модели (9): $V_0 - 3 * \delta$
3	ПК 37+48 низовая берма, отм. 71,6 м	Плита-марка ПМ8	-443	-	-444	-445	-455	Прогноз по статистической модели: $V_0+V_1 * Exp(\alpha T) - 2 * \delta = - 440,6 + 15,6 ** Exp(-0,07 * T) - 2 * 2,5$	Прогноз по асимптоте статистической модели (9): $V_0 - 3 * \delta$

В таблице Н.5 приведены критериальные оценки состояния плотины по результатам визуальных наблюдений, ранжированные как потенциально опасные – *K1\** и предаварийные – *K2\**.

Критериальные значения качественных показателей состояния земляной плотины по данным визуальных наблюдений

Табл. Н.5

№ п.п	Критерии состояния	Качественные значения критериальных показателей
Верховой откос и гребень грунтовой плотины		
1.1	<i>K1</i>	1) появление протяженных фронтальных трещин на гребне; 2) отрыв полотна плит от основания парапета; 3) локальная просадка гребня
1.2	<i>K2</i>	1) вертикальные трещины в направлении уреза воды и заметные деформации профиля откоса; 2) смещения участка крепления с отрывом плит от основания; 3) просадка гребня с разрушением дорожного покрытия
Волнозащитные крепления верхового откоса грунтовой плотины		
2.1	<i>K1</i>	1) взаимные смещения плит крепления; 2) незатухающий рост трещинообразования на плитах крепления; 3) вынос составляющих фильтра и грунта основания крепления; 4) разуплотнение швов по длине межплитного шва волнозащитного крепления; 5) глубина размыва в межплитном шве достигла 1,0 м;
2.2	<i>K2</i>	1) разуплотнение межплитного шва в зоне уреза с глубиной размыва в шве более 1,5 м; 2) вынос грунта основания плит с обрушением фрагментов разрушенной плиты в яму размыва.
Низовой откос плотины		
3.1	<i>K1</i>	1) появление локальных просадок, промоин на откосе; 2) появление периодических увлажнений откоса; 3) увлажнение и заболачивание низовой поймы у подошвы плотины; 4) появление просадок на низовой части откоса и пойме;
3.2	<i>K2</i>	1) выклинивание фильтрационного потока на откос; 2) появление ключей со взвесями у подошвы плотины и конусов выноса грунта; 3) деформации профиля откоса со значительным уполаживанием откоса и с выносом грунта в НБ.

#### 5.14. Определение критериев безопасности бетонной водосливной плотины Волжской ГЭС (Приложение О)

В состав ГТС Волжской ГЭС входят: здание ГЭС и сороудерживающее сооружение (СУС); водосливная плотина; плотины из грунтовых материалов (русловая плотина №40 и пойменные плотины № 41 и № 42); двухнижний 2-х камерный шлюз (Приложение 1 пособия [20]).

Общая длина ГТС составляет 4,9 км, из которых 1,6 км занимают бетонные ГТС. Здание ГЭС – совмещенного типа, общей длиной – 736 м.

С левой стороны к зданию ГЭС примыкает бетонная водосливная плотина. С грунтовой плотиной ГЭС сопрягается подпорными стенками.

Водосливная плотина имеет распластанный профиль с выдвинутой в ВБ и НБ фундаментной плитой и анкерным понуром с ВБ (Рис. О.1).

Максимальная высота плотины от низа зубьев до верха бычков равна 44,3 м. По длине плотина разбита на 14 секций, причем каждая секция включает по два водосливных пролета. Подземный противофильтрационный контур плотины усилен двумя рядами стального шпунта: первый ряд (ряд А) расположен в начале понура, а второй (ряд Б) – под передним краем фундамента водослива; расстояние между шпунтовыми рядами 57 м. Шпунты прорезают аллювиальные пески и входят в менее проницаемые песчано-алевролитовые породы (с коэффициентом фильтрации в 70 раз меньшим, чем у песка).

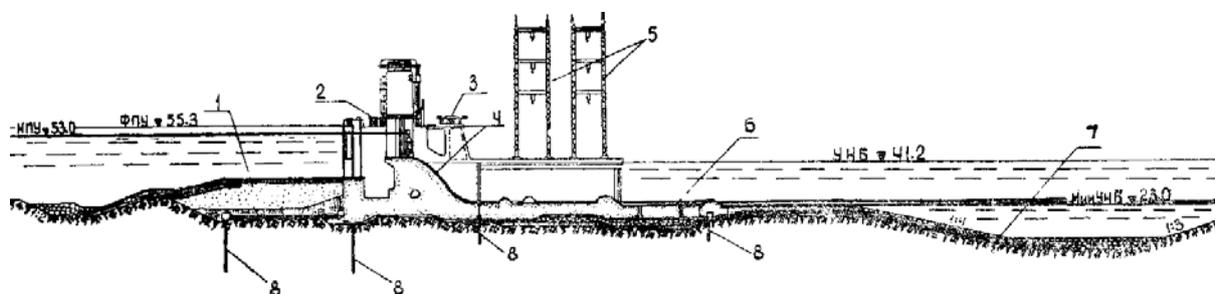


Рис. О.1. Профиль Волжской водосливной плотины:

- 1 – анкерный понур; 2 – железная дорога; 3 – автодорога; 4 – водослив; 5 – опоры ЛЭП; 6 – водобой; 7 – ковш; 8 – шпунтовые стенки

Для снятия фильтрационного напора в основании под подошвой плотины сделан дренаж в виде треслойного обратного фильтра, расположенный между низовым и верховым зубьями фундаментной плиты. В НБ под водобоем идут два ряда вертикальных скважин с расстоянием между рядами 10 м и между скважинами в рядах 20 м. Скважины служат для снятия напора под плотиной в песках, связанных местами с ВБ.

Основанием плотины служат современные аллювиальные отложения,

покоящиеся на коренных породах третичных отложений. Общая мощность аллювиальных отложений под подошвой плотины составляет около 6 м у левого конца плотины, 8–10 м в центральной части и 8 м у ГЭС; литологически они представлены мелкими, средними и разнотернистыми песками

Русловая грунтовая плотина № 40 длиной по гребню 1200 м перекрывает русло Волги между правым берегом и зданием ГЭС. Пойменная грунтовая плотина № 41 расположена на пойме, между водосливной плотиной и шлюзами. Длина плотины от левобережного устоя водосливной плотины до устоя средней головы шлюза правой линии – 800 м.

Грунтовая плотина № 42 находится также на пойме, между шлюзами и левым берегом долины Волги. Длина плотины от устоя средней головы шлюза левой линии до берега – 1250 м. На этом участке в примыкании к шлюзу грунтовая плотина перекрывает русло современной р. Ахтубы, у левого берега – старицу Ахтубы. Все три плотины – однородные намывные из мелких песков общей длиной 3250 м.

Дренаж на большей части грунтовых плотин устроен смешанного типа – с наклонной верхней частью (в виде обратного трехслойного фильтра) и нижней дренажной призмой. Наклонная часть дренажа уложена на низовом откосе с заложением 3,0, каждый из слоев обратного фильтра имеет толщину 0,3 м, а каменная пригрузка – 1,0 м на трехслойном обратном фильтре. В нижней призме пойменных плотин толщина пригрузки увеличена до 4 м, с тем чтобы внутри призмы проложить сборные железобетонные дырчатые трубы дренажного коллектора размерами 1,1 x 1,8 м.

В основании русловой плотины № 40 залегают песчано-алевролитовые породы и алевролиты с теми же характеристиками, что и на правом берегу.

Пойменные грунтовые плотины № 41 и № 42 имеют в основании мощную толщу аллювиальных песков, в которых встречаются как грунты с плохой водоотдачей, так и линзы гравийно-галечниковых отложений с повышенной фильтрационной способностью.

Водоупор в основании плотины № 40 расположен на отметке (- 40) м, ниже которого залегает водопроницаемая толща царицынских песков, содержащих напорные агрессивные воды. Опасность напорной фильтрации по этим слоям и выпора верхнего слоя алевролитов заставила принять устройство песчаной присыпки за banquetом (расположен в низовом клине, под наклонным дренажем) до отметки (- 14,0) м, а также разгрузочные дренажные скважины. Во избежание суффозии по трещинам скальных пород и контактам песчаников, песков и песчано-алевролитовых пород были выполнены противофильтрационные мероприятия в виде цементационной завесы в правый берег длиной 300 м и уширения профиля плотины.

Натурные визуальные и инструментальные наблюдения за состоянием ГТС Волжской ГЭС проводятся за: 1) уровнями ВБ и НБ; 2) температурой наружного воздуха и воды; 3) осадками водосливной плотины, здания ГЭС и грунтовых плотин; 4) раскрытием межсекционных швов бетонных ГТС их взаимными смещениями; 5) противодавлением в основаниях здания ГЭС и водосливной плотины; 6) пьезометрическими уровнями в грунтовой плотине и ее основании (плотины №№ 40–42); 7) фильтрационными расходами в закрытом дренаже плотин №№ 41–42 и в сопряжении плотины № 40 со зданием ГЭС; 8) температурой воды в дренаже; 9) размывами русла за рисбермой; 10) уровнями мастики в шахтных шпонках.

Всего для контроля состояния основных ГТС Волжской ГЭС было установлено 939 единиц контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

ГТС ГЭС эксплуатируются уже почти 50 лет. Длительный срок эксплуатации приводит не только к старению самих ГТС, но и к физическому износу и моральному старению КИА. Поэтому до назначения критериев и анализа состояния ГТС выполнена оценка достоверности показаний КИА.

Понятие достоверности показаний КИА понималось как уровень чувствительности КИА к контролируемому фактору. Оценки достоверности показаний КИА выполнены по следующим характеристикам связи показаний

КИА ( $Y$ ) с внешними воздействиями (УВБ, УНБ, напор, температура воздуха) с использованием регрессионной модели: 1) коэффициенту корреляции с действующим фактором; 2) коэффициенту Фишера  $F$  (критерий значимости регрессионной модели, характеризующий правильность выбранной формы связи рядов показаний КИА и внешних воздействий); 3) отношению стандарта ошибки оценки наблюдаемых значений  $Y$  относительно значений регрессионной модели к стандарту процесса  $Y - (\delta_{\text{оц}}/\delta_y)$ ; 4) наличию несвязанных с внешними воздействиями трендов, выбросов и скачков показаний измерительных преобразователей.

Уровень достоверности показаний квалифицировался как «высокий», «средний» и «низкий». При выборе диагностических показателей, используемых при назначении критериев безопасности, в первую очередь отбирались КИА с оценкой достоверности показаний не ниже «среднего».

Статистический анализ и обработка данных в среде «WINDOWS» производили с помощью пакета программ STATISTICA фирмы StatSoft (США).

Ниже приведены результаты анализа достоверности показаний пьезометров, установленных в основании секций водосливной плотины.

В основании водосливной плотины установлен 141 пьезометр, из них 116 – под понуром, водосливом и водобоем и 21 – в напорном слое царьцынских песков для определения фильтрационного противодействия и контроля за работой разгрузочных скважин.

Каждая секция плотины оснащена пьезометрическим створом по оси секции из 6–8 пьезометров. Пьезометры водосливной плотины – напорные и оборудованы стационарными манометрами. Для анализа достоверности показаний пьезометры плотины, с общим местоположением водоприемников в подземном контуре сооружения, объединены в следующие группы:

1) пьезометры понура (П-61, П-62, П-63); 2) пьезометры в основании водослива: за шпунтом  $B$  (П-64, П-74), в обратном фильтре в основании водослива (П-66), перед низовым (висячим) шпунтом  $B$  (П-67), за шпунтом  $B$

(П-69); 3) пьезометры в царацинских напорных песках (П-65, П-68, П-71).

В показаниях пьезометров понура и водослива наблюдается монотонное падение напора до 12 см/год. Возрастающие тренды обнаружены по показаниям пьезометров напорного горизонта (П-65 и П-68) в пределах секции № 8 и секций № 4, 6 и 14. Лаг в показаниях пьезометров не наблюдается.

В табл. О.1 приведены данные анализа и оценка достоверности показаний пьезометров, установленных в подошве секции № 2 водосливной плотины.

Табл. О.1. Статистико-вероятностные характеристики показаний пьезометров. Водосливная плотина (секция №2)

№ п/п	№ КИА	$V\langle y \rangle$	$Vy_{\min}$ м	$Vy_{\max}$ м	2A, м	$\delta_y$ , м	R( $\tau$ ) x, y <sub>max</sub>	лаг, $\tau$ , сутки	F-	$\delta_{\text{оц}}$ , м	$\delta_{\text{оц}}/\delta_y$	Тренд показаний, м/год	Скачок показаний КИА, м	Достоверность показаний
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Пьезометры понура														
1	2-61	3,084	1,37	6,05	4,68	1,03	0,88	0	653	0,49	0,48			высокая
Пьезометры в основании водослива, за шпунтом «Б»														
2	2-64	-8,71	-11,31	-3,00	8,31	2,0	0,97	0	3395	0,46	0,23			высокая
3	2-74	-8,71	-11,81	-3,20	8,68	1,97	0,97	0	2897	0,48	0,24			высокая
Пьезометры в основании водослива, в трехслойном фильтре														
4	1-66	-8,49	-11,18	-2,90	8,28	2,02	0,98	0	5043	0,38	0,19			высокая
5	2-66	-8,70	-11,35	-3,00	8,35	1,98	0,96	0	2519	0,52	0,26			высокая
Пьезометры в напорном царацинском песке														
6	2-65	-0,116	-5,70	4,10	9,80	1,42	0,83	0	427	0,78	0,55		выброс на 3 м	средняя
7	2-68	-2,44	-4,50	3,25	7,75	1,55	0,97	0	3200	0,37	0,24			высокая
8	2-71	-3,83	-10,94	4,70	15,64	1,98	0,85	0	494	1,04	0,53		выброс	средняя

Как видно из табл. О.1, у пьезометров всех групп достоверность показаний «высокая». Исключение составляют 4 пьезометра для контроля напорного горизонта, достоверность показаний которых оценена как «средняя» (влияние неучтенных дополнительных факторов по подпитке напорного горизонта и сглаженные значения действующих факторов).

В качестве диагностических показателей противодействия в основании плотины выбраны группы пьезометров, расположенные в наиболее ответственных зонах подземного контура (табл. О.2).

Табл. О.2. Состав диагностических показателей контроля противодействия в основании водосливной плотины.

№ п/п	Наименование показателей, размерность	Место установки в ГТС	Тип и наименование КИА	Число диагностических показателей
1	Пьезометрический уровень за шпунтом «А» (понтон)	Секции 1–14	пьезометры закладные напорные П-61 (группа 1)	14
2	Пьезометрический уровень за шпунтом «Б» (волослив)	Секции 1–14	пьезометры закладные напорные П-64 и П-74 (группа 2а)	14
3	Пьезометрический уровень в дренаже волослива	Секции 1–14	пьезометры закладные напорные П-66	14
4	Пьезометрический уровень в напорных парильных песках	секции № 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14	пьезометры закладные напорные: П-65, П-68, П-71	21
Итого				63

Согласно Федеральному закону [1] контроль за безопасностью ГТС, в том числе оперативная оценка их состояния, осуществляется сравнением измеренных (или вычисленных по измерениям) количественных или качественных диагностических показателей с их критериальными значениями.

Методика определения критериев безопасности ГТС предусматривает определение двух уровней критериальных значений показателей состояния сооружений  $K1$  и  $K2$  [14]. На стадии проекта критериальные значения показателей состояния ГТС определяются их расчетом по действующим СНиП на проектирование бетонных плотин, грунтовых плотин и их оснований и принимаются равными расчетным значениям, соответствующим нагрузкам основного сочетания нагрузок для  $K1$  и особого для  $K2$ .

В период эксплуатации состояние ГТС считается отвечающим нормативным требованиям и условиям эксплуатации, если значения ни одного диагностического показателя не превышают критериального значения  $K1$ .

При превышении значений одного и более диагностических показателей критериального значения  $K1$  состояние ГТС оценивается как потенциально опасное, в случае превышения значений одного и более диагностических показателей критериального значения  $K2$  как предаварийное (по действующим нормам ГТС работает с пониженными коэффициентами запаса).

Под диагностическими показателями понимают самые значимые для оценки безопасности и диагностики состояния ГТС и чувствительные к внешним воздействиям контролируемые показатели, позволяющие оценить безопасность и состояния системы «сооружение–основание–водохранилище».

В период эксплуатации на основе анализа результатов натуральных наблюдений и опыта эксплуатации ГТС осуществляется корректировка критериальных значений  $K1$  и  $K2$  диагностических показателей с использованием: 1) данных визуальных и инструментальных наблюдений; 2) поверочных расчетов по откалиброванным по натурным данным детерминистическим математическим моделям; 3) статистических регрессионных моделей.

В проекте рассмотрены два основных расчетных случая и два поверочных при следующих нагрузках и условиях работы ГТС:

1) УВБ=15,0 м, УНБ = –12,0 м (минимальный летний) – противодиффузионные (ПФ) устройства работают нормально;

1) УВБ=15,0 м, УНБ= –0,3 м (при пропуске расхода обеспеченностью 0,1%) – ПФ-устройства работают нормально;

3) УВБ=15,0 м, НПУ= –12,0 м – не работает фильтр под водосливом, трещина в понуре.

4) УВБ=15,0 м, НПУ= –12,0 м – не работает фильтр под водосливом, трещина в понуре, под водобоем не работают дренажные скважины и фильтр.

Первый и второй проектные случаи соответствуют СНиП 2.06.06-85 [18] и 33-01-20032 [16] для условий основного сочетания нагрузок для бетонных плотин на нескальных основаниях. Особому сочетанию нагрузок (при НПУ и нарушении одного из дренажных или ПФ-устройств) близок третий поверочный случай. Критерий безопасности  $K1$  водосливной плотины по условиям устойчивости назначался с учетом показаний пьезометров при уровнях бьефов при основном сочетании нагрузок. Рассматривался случай при пропуске паводка (НПУ) и при нормальной работе ПФ-устройств.

Прогноз значений пьезометрических уровней выполнен по статисти-

ческой регрессионной модели на основе данных натуральных наблюдений.

Критериальные значения пьезометрических уровней  $K2$  водосливной плотины получены по данным исследований методом ЭГДА (1962 г.) для особого сочетания нагрузок при ФПУ=16,3 м и УНБ = -0,23 м. В табл. О.3 даны значения  $K1$  и  $K2$  для пьезометров понура и водослива секции № 2.

Табл. О.3. Критериальные значения диагностических показателей состояния секции № 2 водосливной плотины.

№ п/п	№ секций	№ КИА, пьезометры закладные	Наибольшее измененное значение показателя, отм. уровня воды, м	Критериальные диагностические показатели				Способ определения диагностического показателя	
				Проектные значения		Эксплуатационные значения		$K1$	$K2$
				$K1$ , м при НПУ=15,0 м, УНБ=3,5 м	$K2$ , м при ФПУ=16,3 м, УНБ=-0,3 м	$K1$ , м при НПУ=15,0 м, УНБ=-0,3 м	$K2$ , м при ФПУ=16,3 м, УНБ=-0,23 м		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ В ОСНОВАНИИ ПОНУРА, ЗА ШНУТОМ «А»									
2	II	5П0261	6,05	8,0	8,77	7,5	8,77	по регрессионной модели $5,69+0,064*УВ$ $Б+0,425*УНБ+2*\delta_{от}$	по методу ЭГДА (1962 г.)
ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ В ОСНОВАНИИ ВОДОСЛИВА, ЗА ШПУНТОМ "Б"									
	II	5П0264	-3,00	2,8	0,07	-0,48	0,07	$-2,547+0,095*УВБ$ $+0,9076*УНБ+2*\delta_{от}$	То же
ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ В ДРЕНАЖЕ ОСНОВАНИЯ ВОДОСЛИВА									
2	II	5П0266	-3,00	-0,3	-0,23	-0,51	-0,23	$2,0126+0,0485*УВБ$ $+0,891*УНБ+2*\delta_{от}$	То же

Опыт применения этой методики на примере определения критериальных значений пьезометрических уровней в основании водосливной плотины выявил ряд сложностей определения критериальных значений второго уровня  $K2$ , которые связаны с отсутствием данных расчетов в проекте при воздействии особых нагрузок и данных натуральных наблюдений при этих нагрузках. Для определения критериальных значений  $K2$  в этих случаях требуется выполнение поверочных расчетов с использованием фактических физико-механических характеристик материалов ГТС и его основания. Вместе с тем применение этой методики расширяет возможности контроля состояния ГТС и системы «ГТС–основание–водохранилище».

## Глава 6. Методика оценки всестороннего ущерба от аварий ГТС

### 6.1. Термины и определения

В рассматриваемой методике оценки ущерба (вреда), который может быть причинен жизни и здоровью людей, их имуществу и имуществу юридических лиц вследствие аварии гидросооружения (ГТС) в системе гидроэнергетики, используются общепринятые термины в области проектирования, строительства и эксплуатации ГТС и обеспечения их безопасности, а также дополнительно следующие термины и определения:

- 1) *владелец ГТС* – собственник ГТС или эксплуатирующая организация;
- 2) *орган надзора за безопасностью ГТС (орган надзора)* – федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий надзор за безопасностью ГТС согласно постановлению Правительства РФ от 16.10.1997 г.;
- 3) *финансовое обеспечение ответственности* – финансовое обеспечение гражданской ответственности за вред, который причиняется жизни и здоровью людей, имуществу их и юридических лиц при аварии ГТС;
- 4) *вероятный вред* – оцененный в рублях максимальный вред, который может быть причинен жизни и здоровью людей, их имуществу и имуществу юридических лиц в результате аварии ГТС;
- 5) *авария ГТС* – повреждения, разрушения или потеря эксплуатирующим персоналом контроля и управления ГТС вследствие воздействия внешних факторов, что может привести к возникновению чрезвычайной ситуации;
- 6) *наиболее тяжелая авария ГТС* – авария ГТС, причиняющая наибольший вред жизни и здоровью людей, имуществу их и юридических лиц;
- 7) *наиболее вероятная авария ГТС* – авария ГТС, характеризующаяся наибольшим значением среднегодового вреда;
- 8) *социальный ущерб* – вред, который может быть причинен жизни и здоровью людей согласно прогнозной оценке числа погибших и (или) пострадавших людей в результате аварии ГТС;
- 9) *убытки, причиненные аварией ГТС* – реальный ущерб и упущенная вы-

года, которые могут понести физические и юридические лица в результате аварии ГТС;

10) *реальный ущерб* – стоимостное выражение полной или частичной потери основных и оборотных фондов, готовой продукции предприятий, жилищного и коммунального хозяйств, затрат на поддержание жизнедеятельности в зоне чрезвычайной ситуации, вызванной аварией ГТС, затрат на восстановление разрушенной инфраструктуры, утраты плодородия почв и утраченной сельхозпродукции, ущерба, причиненного лесному и рыбному хозяйствам, а также стоимостное выражение потерь из-за ухудшения свойств земель, загрязнения водных объектов и т.п.;

11) *упущенная выгода* – стоимостное выражение убытков, вызванных остановкой производства и неисполнением договорных обязательств физическими и юридическими лицами, пострадавшими от аварии ГТС, которые эти лица получили бы при обычных условиях гражданского оборота;

12) *зона катастрофического затопления* – территория, в которой происходит затопление потоком воды, образующимся при гидродинамической аварии, и ограниченная сверху створом гидроузла, снизу – створом с отметкой затопления, соответствующей паводку обеспеченностью 5%;

13) *бьеф* (верхний или нижний) – часть водотока, примыкающая к водоподпорному ГТС, соответственно выше – верхний бьеф (далее по тексту ВБ) или ниже – нижний бьеф (далее по тексту НБ) по его течению.

В этой методике использованы следующие обозначения:

$I_{общ}$  – общий реальный ущерб;  $I_1$  – ущерб основным производственным фондам;  $I_{об}$  – ущерб оборотным производственным фондам;  $I_2$  – ущерб готовой продукции предприятий;  $I_3$  – ущерб элементам транспорта и связи;  $I_4$  – ущерб жилому фонду и имуществу граждан;  $I_5$  – расходы на ликвидацию последствий аварии;  $I_6$  – ущербы сельскохозяйственному производству;  $I_7$  – ущерб лесному хозяйству;  $I_{7c}$  – ущерб от потери леса как сырья;  $I_{7э}$  – экологический ущерб от затопления лесов;  $I_8$  – ущерб окружающей среде от сброса опасных веществ в окружающую среду;  $I_9$  – ущерб, вызванный нарушением водоснабжения из-за аварии водозаборных сооружений;  $I_{10}$  – ущерб объектам водного транспорта;  $I_{11}$  – ущерб рыбному хозяйству;  $I_{12}$  – прочие виды реального ущерба.

## **6.2. Общие положения методики оценки ущерба**

### **6.2.1. Назначение и условия применения методики**

2.1.1. Определение размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС, проводится в целях определения величины финансового обеспечения ответственности владельца ГТС.

Методика предназначена для определения величины вероятного вреда владельцами ГТС в целях определения величины финансового обеспечения ответственности владельцев ГТС при декларировании безопасности ГТС и при подаче заявки на включение ГТС в Российский регистр ГТС.

2.1.2. Методику рекомендуется использовать для ГТС, безопасность которых регулируется Федеральным законом от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности ГТС» [1], владельцы которых обязаны иметь финансовое обеспечение гражданской ответственности, определяемой на основе постановления Правительства РФ от 18.12.2001 г. № 876 «Об утверждении Правил определения величины финансового обеспечения гражданской ответственности за вред, причиненный в результате аварии ГТС»:

а) при составлении декларации безопасности ГТС, а также при подготовке материалов для внесения ГТС в Российский регистр ГТС; б) при планировании аварийно-спасательных работ по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, вызванной аварией ГТС; в) при обосновании мероприятий, снижающих негативные последствия аварий ГТС; г) для определения сумм, необходимых для формирования владельцем ГТС финансовых резервов для возмещения вреда, причиненного аварией ГТС.

2.1.3. Методика предназначена для определения максимального размера вреда, возможного при заданном сценарии аварии ГТС.

2.1.4. В методике, в зависимости от размера объекта, в состав которого входит ГТС, и прогнозируемого сценария аварии и ее последствий, используются следующие методы определения вероятного вреда:

1) *метод детальной оценки* – для возможно точной оценки последствий аварий, в том числе при нахождении в зоне затопления опасных или ценных объектов, при наличии сведений о ситуации в зоне затопления, полученных при обследовании конкретных объектов в зоне затопления или влияния водохранилища при проведении специальных обследований;

2) *планишетный метод оценки* – при отсутствии данных об условиях в зонах влияния аварий на ГТС, полученных в результате специальных обследований, но при наличии геоинформационных баз данных и данных, содержащихся в геоинформационных системах (ГИС);

3) *метод укрупненных показателей* – при отсутствии подробных данных о ситуации в зонах аварий и достаточных данных, содержащихся в геоинформационных системах, применяются среднестатистические данные о характеристиках объектов и плотности населения в данном регионе;

4) *метод ориентировочной оценки* – на предварительной стадии для определения порядка величины вероятного вреда.

2.1.5. Методика применяется для оценки вероятного вреда в целом и определения отдельных составляющих этого вреда. На основе методики определяются в составе вероятного вреда социальный и реальный ущерб.

Методика не предназначена для определения упущенной выгоды (стоимостного выражения убытков, вызванных остановкой производства и неисполнением договорных обязательств лицами, пострадавшими от аварии ГТС, которые эти лица получили бы при обычных условиях гражданского оборота, включая результаты неисполнения договоров энергоснабжения).

2.1.6. В методике приведены рекомендации по определению негативных воздействий, вызванных аварией ГТС, развитие которой происходит по выбранному сценарию, в том числе параметров волны прорыва, необходимых для оценки ущерба от гидродинамической аварии, а также справочные макроэкономические данные по регионам России, необходимые для определения вероятного вреда методом укрупненных показателей.

2.2. Классификация ГТС, государственный надзор за безопасностью которых осуществляет Минэнерго России.

2.2.1. Классификация ГТС по типу энергетического объекта:

а) ГТС, которые формируют напорный фронт гидроузлов, в составе ГЭС, а также плотин тепловых электростанций; б) ГТС, ограждающие золоотвалы и шламонакопители, в составе тепловых электростанций.

2.2.2. Классификация ГТС согласно действующим нормам:

1) основные ГТС; 2) плотины всех типов; 3) устои и подпорные стены, входящие в состав напорного фронта; 4) дамбы обвалования, переданные на баланс предприятий ТЭК; 5) берегоукрепительные, регуляционные и оградительные сооружения; 6) водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения; 7) водоприемники и водозаборные сооружения; 8) каналы деривационные; 9) туннели; 10) напорные водоводы и пульпопроводы; 11) напорные бассейны и уравнивательные резервуары; 12) здания русловых, деривационных и гидроаккумулирующих электростанций; 13) малые ГЭС; 14) сооружения, входящие в состав инженерной защиты городов, сельскохозяйственных и народохозяйственных угодий и других народохозяйственных объектов, переданные на баланс предприятиям ТЭК.

### **6.3. Исходные данные для расчета вероятного ущерба**

#### **6.3.1. Сценарии аварии ГТС при расчете вероятного ущерба**

Для обоснования вероятного ущерба при аварии ГТС все типы сценариев аварии, независимо от вида ГТС, разбиты на четыре группы:

первая группа – аварии ГТС, связанные с разрушением напорного фронта, сопровождающимся образованием прорана, в который происходит неконтролируемый персоналом ГТС прорыв воды;

вторая группа – аварии ГТС, связанные с повреждением отдельных элементов ГТС, приведшие к необходимости аварийного понижения напора на ГТС, и сопровождающиеся сбросом воды;

3.1. Затопление территории в НБ, включая гидродинамическую аварию

(волну прорыва), снижение уровня грунтовых вод, образование мелководий и заболачивание в ВБ (первая и вторая группы сценариев аварий ГТС).

3.1.1. Авария напорного фронта ГТС приводит к образованию волны прорыва, распространяющейся в НБ, и осушению ВБ. 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 волны. 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 является время добегания волны прорыва до того или иного населенного пункта.

Точность прогноза вероятного вреда прямо связана с точностью прогноза гидродинамических параметров волны прорыва, которая определяется:

- а) выбором сценария (сценариев) разрушения ГТС;
- б) точностью расчета волны отлива (осушения) в ВБ;
- в) точностью расчета распространения волны прорыва в НБ.

3.1.2. Сценарий аварии ГТС с образованием волны прорыва предполагается как исходный для всех классов ГТС. При этом для ГТС 1 и 2 классов расчет проводится для всех вариантов разрушения напорного фронта, для сооружений 3 и 4 классов принимается, как правило, вариант – прорыва земляной плотины, а для сооружений 4 класса с малой емкостью ВБ и малой высотой плотины – одиночный проран. Сценарии уточняются с учетом реального состояния элементов напорного фронта.

3.1.3. Для оценки гидрографа прорыва следует иметь расчет режима уровней ВБ. Расчет, как правило, проводится: при укрупненной оценке –

при помощи балансовой модели ВБ или одномерных уравнений Сен-Венана; при детальной оценке ущерба – при помощи двумерных уравнений Сен-Венана численными методами.

3.1.4. Для определения вероятного вреда в результате прохождения волны прорыва должны быть рассчитаны следующие параметры:

1) границы зоны затопления при аварии ГТС и при пропуске максимального расчетного паводка; 2) максимальные значения глубины и скорости потока в зоне катастрофического затопления, в том числе при ледовом покрове; 3) время от начала аварии до прихода в данную точку местности волны прорыва (время добегания); 4) длительность затопления; 5) гидрографы прорыва и график падения уровня ВБ; 6) воздействие плавающего льда на объекты в НБ; 7) вынос материалов из занесенного водохранилища и области отложений этих материалов в НБ.

Расчет параметров прорывного паводка является задачей речной гидравлики и осуществляется численными методами. В расчетах, как правило, следует использовать одномерные или двумерные (плановые) уравнения мелкой воды (Сен-Венана), решаемые численно.

Для речных долин с широкими поймами и руслами, отличными от прямолинейных, в расчете учитывают влияние потоков на поймах и в русле.

Для расчета протяженных участков можно применять одномерные уравнения Сен-Венана с пересчетом поля скоростей на двумерную область.

3.1.5. По результатам расчета волны прорыва на топографических картах местности заданного масштаба (определяется размерами ГТС и затопляемых территорий) вплоть до створа, в котором максимальный за время наводнения расход не превосходит расход обеспеченностью 5%, должны быть нанесены в изолиниях (цветовой заливке) следующие параметры:

а) максимальные (за время паводка) глубины затопления в метрах (карта глубин затопления); б) максимальные модули скорости течения в м/с (карта скоростей); в) продолжительность затопления в сутках (карта времен за-

топления); г) время добегания фронта прорывной волны в часах (карта времен добегания); д) при аварийном истечении из занесенных водохранилищ – области отложения наносов, вынесенных из водохранилища; е) участки возможного образования ледовых заторов.

Для этих расчетов следует применять электронные топографические карты и ГИС-технологии.

Степень возможных разрушений определяются на основе рассчитанных величин параметров потока в каждой точке области катастрофического затопления, в том числе при наличии ледового покрова, и представляются в табличной форме или графическом виде (карта возможных разрушений).

Уровни воздействия на население определяются на основе данных о возможных разрушениях и карты времен добегания с целью определения возможного количества погибших и пострадавших людей, разработки мероприятий по эвакуации населения, оценки расходов на ликвидацию последствий аварии, и представляются в табличной форме или графическом виде (карта зон воздействий).

3.1.6. Результаты численных расчетов, моделирующих прорыв воды из ВБ, следует представлять в виде графика изменения уровня ВБ во времени в ходе аварии, а при детальных и планшетных оценках – распределение скоростей в водохранилище в характерные моменты времени прорыва.

При расчетах прорыва из занесенного водохранилища следует представить график изменения во времени объема выноса через проран наносов и их характеристики.

3.1.7. Особенности расчета волны прорыва при разрушении напорных ГТС, защитных дамб осушенных территорий заключаются в следующем:

1) расчет следует проводить до момента выравнивания уровня в водохранилище и над затопленной территорией; 2) в расчете раскрытия прорана следует учитывать подтопление, возникающее при затоплении местности.

3.1.8. Особенности расчета волны прорыва при разрушении защитной

дамбы во время наводнения.

При расчетах волны прорыва, возникающей при разрушении защитной дамбы во время половодий и паводков, ветровых нагонов и других наводнений, следует учитывать характерную для этих наводнений особенность – временную изменчивость, влияние на процесс затопления. Расчет в этом случае проводится до момента осушения территории. При сильном влиянии на ход наводнения возникновения аварии (при большой емкости защищаемой низины) следует рассчитывать течение над защищаемой территорией и в зоне за ее пределами.

3.1.9. Особенности расчета волны прорыва дамб, ограждающих каналы, проходящие в насыпи: а) при назначении сценариев аварии следует рассмотреть возможность персонала по принятию управляющих решений (отключение питающих канал насосных станций, закрытие затворов и т. д.), определяющих масштабы аварии; б) в тех случаях, когда истечение из прорана будет неподтопленным, движение воды в канале допускается прогнозировать с использованием одномерной схематизации. Для оценки бокового оттока допускается применение формулы водослива с широким порогом (как в расчете установившихся течений). В этом случае расчет течения над затапливаемой областью, в зависимости от рельефа местности, проводится при помощи двумерных гидравлических моделей. При подтопленном истечении расчет проводится с помощью одномерного метода для русел с тройником (если это возможно для данной местности) или по двумерной методике и для потока над затапливаемой территорией, и в канале.

#### 3.1.10. Гидрологические и гидравлические процессы в ВБ.

Гидрологические и гидравлические процессы в ВБ связаны с изменением режима подземных вод в бассейне водохранилища. Учет изменения режима подземных вод необходим для оценки изменения несущей прочности грунтов и риска возникновения оползней, подвижек или просадок грунта.

### **6.3.2. Нарушение водоснабжения (первая и вторая группы сценариев аварий ГТС)**

Нарушение работы водозаборных сооружений следует учитывать, если:

- а) уровень опорожнения водохранилища в результате аварии ГТС прогнозируется ниже минимального уровня отбора воды водозаборными;
- б) наводнение в НБ приводит к невозможности использования водозаборов водоснабжения из-за загрязнения вод или повреждения сооружений и оборудования водозаборов;
- в) загрязнение грунтовых вод приводит к невозможности их использования для целей водоснабжения;
- г) при водоснабжении подземными водами – понижение уровня этих вод в ВБ.

В этих случаях ущерб определяется нарушением водоснабжения, а также необходимыми затратами на восстановление водоснабжения, прерванного из-за отказа или выхода из строя водозаборных сооружений.

### **6.3.3. Определение вероятного вреда проводится для сценария наиболее тяжелой аварии ГТС**

При определении сценария аварии ГТС и величины вероятного ущерба не подлежат рассмотрению аварии, вызванные непреодолимой силой (землетрясением, паводком, ледоходом, волновыми воздействиями, ветровыми и (или) температурными воздействиями, селями, лавинами, камнепадами, оползнями, другими природными воздействиями, а также воздействиями посторонних предметов), если сила и интенсивность такого воздействия превышают значения, на которые рассчитано ГТС согласно проекту.

### **6.3.4. Перечень возможных аварий и предаварийных ситуаций на ГТС и их негативных воздействий**

Негативные воздействия аварии ГТС определяются составом этих ГТС и особенностями их работы. Типичные негативные воздействия от аварий основных видов ГТС для заданных сценариев аварий даны в табл. 6.1.

### **6.3.5. Оценка параметров негативных воздействий аварии ГТС**

3.5.1. Перечень исходных данных для оценки возможного ущерба от прохождения волны прорыва зависит от данного сценария аварии.

Тип сценария аварии ГТС

Табл. 6.1

Тип сценария аварии	Вид ГТС	Характерные признаки аварии ГТС	Негативные воздействия аварии ГТС
1	2	3	4
Разрушения напорного фронта, сопровождающиеся образованием прорана, в который происходит излив воды или жидких отходов, неконтролируемый персоналом ГТС, а также неконтролируемый перелив через гребень плотины из-за переполнения водохранилища или возникновения экстремальных волн	Плотины водохранилищ	Образование прорана в напорном фронте	1. Опорожнение водохранилища 2. Затопление местности
		Перелив через плотину без прорыва напорного фронта (при переполнении водохранилища, возникновении волн вытеснения или экстремальных ветровых волн)	Затопление местности
	Здания ГЭС	Прорыв напорного фронта	1. Опорожнение водохранилища 2. Затопление местности
	Водосбросные и водоспускные сооружения	Прорыв напорного фронта	1. Опорожнение водохранилища 2. Затопление местности
	Каналы	Прорыв напорного фронта насыпей (для каналов в насыпи)	Затопление местности
		Перелив длинных волн через гребень насыпей (возможно при резком закрытии затворов и резких переключениях насосных станций)	Затопление местности
	Туннели	Нарушение оболочки	Подтопление местности из-за избыточной фильтрации
	Сооружения для защиты от наводнений, дамбы обвалования полей и осушенных территорий	Образование прорана в напорном фронте	1. Опорожнение ВБ 2. Затопление местности
		Перелив через дамбу без прорыва напорного фронта (при переполнении водохранилища, возникновении в нем волн вытеснения или экстремальных ветровых волн)	Затопление местности
	Повреждения отдельных элементов сооружения, приведшие к необходимости аварийного понижения напора на ГТС и сопровождающиеся сбросом воды или жидких отходов	Плотины водохранилищ	Повреждение плотины, создающее угрозу разрушения напорного фронта с образованием прорана
Здания ГЭС		Повреждение здания ГЭС, создающее угрозу разрушения фронта с образованием прорана	1. Опорожнение водохранилища 2. Затопление местности
Водосбросные, и водоспускные сооружения		Повреждение сооружения, создающее угрозу разрушения фронта с образованием прорана	1. Опорожнение водохранилища 2. Затопление местности
Каналы		Повреждение насыпи канала с угрозой прорыва фронта с образованием прорана	Затопление местности
Туннели		Разрушение запорных устройств	Прохождение по туннелю и НБ нерасчетного расхода воды (затопление местности, разрушения)

Основными сценариями возникновения волны прорыва являются:

а) постепенное переполнение водохранилища из-за превышения расходов приточности сбросного расхода при исчерпанной регулирующей емкости водохранилища (например, при поступлении в водохранилище нерасчетного паводка, неполном открытии водосбросных отверстий из-за поломок затворов или ошибки персонала и т.д.);

б) возникновение в водохранилище чрезвычайно больших волн (например, волн вытеснения из-за оползня берега, селевого паводка, волны прорыва из вышележащих водохранилищ, завальных озер или временных водоемов, подпруженных ледниками, волн от крупных взрывов и т.д.);

в) разрушение напорного фронта гидроузлов без аварийного повышения уровня ВБ (из-за суффозии основания или тела плотины, подмыва сооружений с НБ, раскрытия в теле плотины трещин из-за старения материала плотины или нерасчетных сейсмических воздействий, нерасчетных воздействий в виде взрывов, падений самолетов и по другим причинам).

При возникновении аварии, соответствующей сценариям а) или б), гидроузел может остаться неразрушенным, хотя поступившие в НБ водные массы все равно могут явиться причиной катастрофического затопления. При плавном переполнении ВБ, не сопровождающемся прорывом напорного фронта, в НБ возникнет экстремальный паводок, но он является паводком «обычного типа». При волновом перехлесте через плотину явление становится аналогичным волне прорыва и рассматривается в методике как одна из возможных ситуаций.

3.5.2. Требования к математическому моделированию волны прорыва при аварии ГТС.

Математическое моделирование волны прорыва проводится с использованием обоснованных методик, дающих возможность прогнозировать глубины и скорости в местах расположения объектов народного хозяйства на затапливаемой пойме.

При математическом моделировании гидродинамических аварий для бетонных плотин принимается, что:

- 1) арочные плотины разрушаются целиком и мгновенно;
- 2) брешь в гравитационных плотинах возникает при мгновенном разрушении элемента (блока или секции), авария которого более вероятна;
- 3) для эксплуатируемых бетонных плотин назначение аварийного элемента следует проводить с учетом мониторинга состояния тела плотины.

Исходные данные, соответствующие различным сценариям аварии, характеру местности и детальности доступной информации о форме чаши водохранилища и позволяющие с достаточной точностью оценить ущерб от прохождения прорывной волны, перечислены в табл. 6. 2.

Табл. 6.2. Исходные данные для математического моделирования волны прорыва

№ №	Исходные данные	Сце- нарий разру-	Дополнительные условия, комментарии.	Мето- дика
1	2	3	4	5
1	Гидрограф расхода приточности	Все	При сценарии а) задается обязательно, в других случаях – когда расход приточности соизмерим с расходом прорыва	П*, У**
2	Пропускная способность водопропускных отверстий гидроузла. Возможные варианты:	а), в)	Вводится, если пропускная способность гидроузла сравнима с расходом через проран и при аварии работают водопропускные отверстия (например, для уменьшения размывов в проране)	П,У П,У П,У П,У
2.1	Кривые связи $Q-Z_{ВБ}$ или $Q-(Z_{ВБ}-Z_{НБ})$ для створа гидроузла в целом ( $Q$ – расход воды в створе гидроузла, $Z_{ВБ}$ , $Z_{НБ}$ – отметки ВБ и НБ соответственно)			
2.2	Кривые связи $Q-Z_{ВБ}$ или $Q-(Z_{ВБ}-Z_{НБ})$ для каждого типа отверстий (поверхностные водосливы, донные водосбросы, агрегаты ГЭС)			
2.3	Поверхностные водосливы : число, отметки порога и ширина отверстия), донные водосбросы (число, отметка дна, ширина и высота отверстия), агрегаты ГЭС (число и кривыми связи $Q-Z_{НБ}$ )			
3	Емкость водохранилища. Возможные варианты:	Все		

3.1	Кривые связи $Z_{ВБ}-W$ или $Z_{ВБ}-A$ ( $Z_{ВБ}$ –уровень ВБ, $W$ – объем водохранилища, $A$ – площадь зеркала водохранилища)		Расчет режима уровней ВБ проводится по балансовой модели	У
3.2	Поперечные разрезы дна водохранилища		Расчет режима уровней ВБ проводится по одномерной модели	У
3.3	Кривые связи $\omega = \omega(x, z)$ или $b=b(x, z)$ для створов с продольной координатой $x$ ( $b$ – ширина русла на уровне $z$ ; $\omega$ – площадь сечения, лежащая ниже уровня $z$ )		Расчет режима ВБ проводится по одномерной модели	У
3.4	Отметка дна как функция горизонтальных координат ( $x, y$ ); как частный случай – задание дна в ГИС–технологиях.		Расчет режима ВБ проводится по плановой (двумерной) модели	П
4	Уровень воды в водохранилище в момент, соответствующий началу расчета			П,У
5	Задание характера повреждения плотины:	а), в)		
5.1	Размер и форма брешы, ее расположение в напорном фронте		Для бетонных плотин	П,У
5.2	Отметка дна первоначального прорана, ее расположение, уклон бортов прорана		Для набросных и намывных плотин. При сценарии в) – немного ниже отметки УВБ, при сценарии а) – немного ниже отметки гребня плотины, при плавкой вставке – ниже отметки ее гребня	П,У
5.3	Расположение начального талика по ширине и высоте фронта и его радиус		Для каменно-земляных плотин (только при сценарии в)	П,У
6	Гидрографы расхода в притоках	Все	В случаях, когда в пределах расчетной области притоки с расходом, соразмерным с расходом прорыва из ВБ	П,У
7	Отметки дна русла и долины в НБ. Возможные варианты:	Все		
7.1	Поперечники дна водотока и долины до ранее не затапливаемых отметок		Расчет режима уровней НБ по одномерной модели	У
7.2	Кривые связи $\omega = \omega(x, z)$ или $b=b(x, z)$ для створов с продольной координатой $x$ ( $b$ – ширина русла на уровне $z$ ; $\omega$ – площадь сечения, лежащая ниже уровня $z$ )		Расчет режима уровней НБ по одномерной модели	У
7.3	Отметка дна как функция координат ( $x, y$ ) в горизонталях; частный случай – растровое задание дна на прямоугольной сетке		Расчет режима уровней ВБ по плановой (двумерной) модели	П
8	Шероховатость подстилающей поверхности назначается по экспертной оценке, учитывающей характер местности. При наличии реальных измерений уровней и расходов воды должна проводиться калибровка математической модели и уточнение коэффициентов шероховатости	Все	Для определения параметров течения в НБ используется всегда; в ВБ – в случаях 3.2–3.4	П,У

9	Данные о размещении в нижнем бьефе гидротехнических сооружений, дамб, дорог, проходящих по насыпи или в выемке, мостов, водопропускных отверстий и т.д. Все сооружения должны быть нанесены на топографические карты нужного масштаба	Все	Нужна полная информация о сооружениях (для дамб и дорожных насыпей – отметка гребня, ширина поверху, заложение откосов, материал; для дорожных выемок – ширина по дну, заложение откосов; для мостов – количество и ширина проемов, отметка дна водотока, высота пролета; для водопропускных труб – форма, геометрические размеры, отметка оси)	П
10	Информация о гидравлических условиях на выходе из расчетной области:	Все		
10.1	Отметка свободной поверхности		Если ниже аварийного гидроузла море, большое озеро или водохранилище, т.е. рост их объема на объем опорожненного в ходе аварии водохранилища мало изменит их уровень воды)	П, У
10.2	Водопропускная способность гидротехнического сооружения (способы его задания перечислены в 2.1–2.3)		Если ниже аварийного ГТС другое ГТС, разрушение которого в рассматриваемой аварии маловероятно	П, У
10.3	Форма створа, средний уклон и шероховатость русла		Если расчетная область ограничена обычным створом, удаленным от аварийного гидроузла так, что в нем можно ожидать квазиравномерный характер течения	П, У
10.4	Форма створа		Выходной створ расчетной области (уступ, консоль или резкое расширение потока, т.е. створ, в котором будет критический режим потока)	П, У

П\* – метод, использующий двумерную схему; У\*\* – метод, использующий одномерную

### 3.5.3. Оценка негативных воздействий в ВБ, вызванных опорожнением.

#### 3.5.3.1. Нарушение водоснабжения.

Нарушение водоснабжения в ВБ определяет размер ущерба водозаборным сооружениям, который следует учитывать, если уровень опорожнения водохранилища прогнозируется ниже минимального уровня отбора воды насосами. В этом случае ущерб определяется необходимыми затратами на восстановление водоснабжения, прерванного из-за отказа или выхода из строя водозаборных сооружений. Оценку ущерба следует проводить по

нормам, установленным МЧС России для аварийного водоснабжения населения в зоне чрезвычайной ситуации.

#### 3.5.3.2. Нарушение судоходства.

Нарушение судоходства в ВБ определяет ущерб объектам водного транспорта на водохранилище. Этот ущерб должен определяться только в случае внесения рассматриваемого водохранилища в перечень водных объектов, определенных для использования в целях водного транспорта. Ущерб определяется по ставкам платы за использование акватории, установленным для данного водохранилища органами МПР России.

#### 3.5.3.3. Ущерб рыбному хозяйству.

Если на водохранилище ведется промысловый лов рыбы, ущерб определяется величиной уменьшения объема выловленной рыбы.

### **6.4. Методы ориентировочной оценки ущерба**

Эти методы применяются только для оценки ущерба при предварительном проектировании или необходимости срочного прогноза основных параметров прорывного паводка, когда отсутствуют достаточно полные топографические данные. Проводится оценка по упрощенной методике на основании анализа безразмерных численных решений задачи о волне прорыва в неподпертом НБ, упрощенном в виде призматического канала с постоянным уклоном дна для русел обобщенного параболического профиля.

Приближенная оценка тяжести последствий аварии ГТС при прорыве напорного фронта наряду с условиями в бьефах гидроузла (плотность заселения, инженерные сооружения, коммуникации и т.д.) для ГТС различного типа производится по значению потенциальной энергии воды в водохранилище по шкале балльности разрушений. Зоны возможных разрушений в балловом эквиваленте строятся по значению величины удельной энергии потока в каждой точке плана зоны катастрофического затопления. При этом используется формула логарифмического вида, связывающая величину баллов с удельной энергией потока:

$$B = 2 \lg (0,5 \rho H V^2) \quad (6.1)$$

где  $B$  – степень возможных разрушений в баллах (табл. 6.3);  $(0,5 \rho H V^2)$  – удельная энергия потока;  $\rho$  – плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $H$  – глубина потока (м);  $V$  – модуль скорости течения (м/с).

Связь величины баллов с разрушениями определяется по шкале балльности разрушений (табл. 6.3).

Табл. 6.3 Шкала балльности разрушений в НБ при прорывах плотин

Баллы	Разрушения
1	Не приводит к каким-либо разрушениям ( $P \leq 4$ )
2	Возможен размыв пашни, сложенной легкими грунтами ( $P \leq 14$ )
3	Размыв пашни, сложенной легкими грунтами. ( $P \leq 40$ )
4	Незначительные разрушения особо плохо построенных и ветхих зданий. Размыв пашни, сложенной средними грунтами ( $P \leq 130$ )
5	Перемещение слабо закрепленных предметов, разрушение легких объектов большой парусности (копен сена, палаток, разрушения плохо построенных и ветхих зданий и т.п.). Размыв пашни на значительную глубину. Подмыв корневой системы кустарников со слабой корневой системой ( $P=400$ )
6	Разрушение сплошных деревянных изгородей, ветхих деревянных зданий. Подмыв корневой системы кустарников ( $P=1300$ )
7	Достигаются критические параметры потока, влекущие гибель незащищенных людей. Жители покидают дома или спасаются на верхних этажах. Разрушение легких деревянных строений, затопление и перемещение потоком легковых автомашин. В руслах разрушение деревянных мостов, паромных переправ, средние повреждения находящихся на стоянках плавсредств ( $P=4000$ )
8	Полное разрушение деревянных домов, ветхих кирпичных и глинобитных строений, средние разрушения кирпичных и блочных домов малой этажности. Разрушение железобетонных и металлических мостов, автодорожных и железнодорожных насыпей, защитных дамб обвалования, подвижного железнодорожного состава. В руслах средние повреждения находящихся в плавании, на якорной стоянке или на берегу и не убранных в затоны судов ( $P=13500$ )
9	Разрушаются кирпичные и панельные дома средней этажности, водокачки, линии электропередачи. Поток несет вырванные с корнем деревья. В руслах сильные повреждения (оверкили и затопление) незащищенных среднетоннажных и малотоннажных судов, средние разрушения стенок, набережных и пирсов, разрушение стапелей судоремонтных мастерских ( $P=40000$ )
10	Разрушаются промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом, порталные краны. Поток сильной мутности несет много разных предметов. Массовая гибель не эвакуированных людей. В руслах разрушение стенок, набережных, молов из кладки массивов ( $P=125000$ )
11	Разрушаются бетонные и железобетонные здания антисейсмической и особо прочной конструкции, мостовые перегружатели. Почти полное разрушение всех строений. Поток несет строительные материалы, опрокидывает бетонные и каменные глыбы. Поголовная гибель не эвакуированных людей ( $P=400000$ )
12	Тотальные разрушения ( $P > 1300000$ )

## **6.5. Метод укрупненных показателей оценки ущерба**

6.5.1. Метод базируется на использовании данных о параметрах аварии ГТС и среднестатистических данных макроэкономического состояния территорий, подверженных негативному воздействию этой аварии.

Данный метод можно использовать при отсутствии и невозможности получения электронных карт.

В качестве исходной информации для проведения расчетов метод использует следующие результаты расчета параметров последствий аварии ГТС:

*ниже гидроузла:*

1) общая площадь зоны катастрофического затопления с нанесением ее границ на планшеты государственной топографической съемки в масштабах 1 : 200000 или 1 : 100000; 2) по характерным створам (не менее 3, исключая створ гидроузла и конечный створ зоны катастрофического затопления): максимальная глубина затопления; время добегания волны от начала образования прорана; максимальная скорость течения; продолжительность затопления; данные о ледовой обстановке;

*выше гидроузла:*

1) скорость снижения уровня; 2) остаточный уровень воды после аварии ГТС; 3) объемы вытекающей и оставшейся воды; 4) время опорожнения водохранилища; 5) количество вынесенного грунта из водохранилища.

6.5.2. Метод предполагает определение натуральных показателей вероятного вреда от аварии ГТС без обследования на местах, на базе доступной информации об освоенности территории зон катастрофического затопления и водохранилища. При этом используются данные хозяйственного и социального состояния субъектов РФ, на территории которых располагается данный гидроузел и зона катастрофического затопления.

6.5.3. На начальном этапе по данным официальной статистики, а также по справочным, литературным и иным источникам должны быть определе-

ны следующие общие показатели по субъекту Федерации:

1) общая площадь территории; 2) средняя плотность населения по субъектам РФ; 3) численность населения субъектов РФ с разбивкой на городское и сельское население; 4) средняя плотность населения в городах и поселках; 5) общая длина автодорог общего пользования или плотность автодорог на тысячу кв. км территории; 6) балансовая стоимость основных производственных фондов; 7) валовый национальный продукт за год.

6.5.4. На основании исходных данных об аварии ГТС и топографических планшетов, на которых нанесена зона катастрофического затопления ниже гидроузла, должны быть выполнены следующие действия:

*ниже гидроузла:*

1) разбивка общей площади затопления на зоны сильного, среднего и слабого воздействия с выделением по каждой зоне: а) земель, занятых населенными пунктами или промышленными объектами; б) земель сельскохозяйственного назначения; земель, занятых природными ландшафтами;

2) составление перечня затронутых населенных пунктов и сбор сведений о количестве проживающего в них населения, характере жилых строений и размерах приусадебных участков;

3) определение участков затрагиваемых транспортных коммуникаций и линий связи.

*выше гидроузла:*

1) выявление населенных пунктов и объектов, расположенных около водохранилища;

2) определение длины судовых ходов, установление объектов водного транспорта, расположенных на водохранилище;

3) выявление водозаборных устройств (местоположение, тип, расход);

4) определение прочих видов водопользования.

6.6. Метод определения значений укрупненных показателей для определения вероятного вреда, причиняемого авариями ГТС.

Составляющие ущерба (вреда) и расчетные соотношения.

#### 6.6.1. Ущерб основным и оборотным фондам

6.6.1.1. На основе построенной по результатам расчетов карты возможных разрушений в баллах, а также карт глубин и продолжительности затопления с использованием табл. 6. 4 определяются зоны сильных, средних и слабых разрушений для основных фондов. При этом отнесение территории к той или иной зоне следует производить, если хотя бы один из критериев превосходит указанные значения.

Табл. 6.4. Шкала тяжести разрушений промышленных сооружений

Тип зданий	Сильные разрушения				Средние разрушения				Слабые разрушения			
	Н, м	V, м/с	В, м	T, час	Н, м	V, м/с	В, м	T, час	Н, м	V, м/с	В, м	T, час
Кирпичные малоэтажные здания (1-3 этажа)	4	2,5	8	170	3	2	7	100	2	1	6	50
Промышленные здания с легким металлическим каркасом	5	2,5	8,5	170	3,5	2	7,5	100	2	1,5	6,5	50
Кирпичные и панельные дома средней этажности (4 этажа и более)	6	3	9	240	4	2,5	8	170	2,5	1,5	7	100
Промышленные здания с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом (стены из карамзито-бетонных панелей)	7,5	4	9,5	240	6	3	8,5	170	3	1,5	7,5	100
Бетонные и железобетонные здания антисейсмической конструкции	12	4	10,5		9	3	9,5	240	4	1,5	8,5	170

Степень разрушения (утраты остаточной балансовой стоимости) по зонам принята следующая: 1) зона сильных разрушений  $K_1=0,7$ ; 2) зона средних разрушений  $K_2=0,3$ ; 3) зона слабых разрушений  $K_3=0,1$ .

6.6.1.2. Расчет ущерба основным фондам производится по формуле:

$$I_1 = I_{1(фон)} (S_1 K_1 \Pi_1 + S_2 K_2 \Pi_2 + S_3 K_3 \Pi_3), \quad (6.6.1)$$

где  $I_1$  – ущерб основным производственным фондам;  $I_{1(фон)}$  – общая балансовая стоимость основных производственных фондов субъекта РФ, отнесенная к единице его территории,  $I_{1(фон)} = C_1 / S$ , где  $C_1$  – общая балансовая стоимость основных производственных фондов субъекта без объектов транспорта и связи.

При невозможности определить  $C_1$  на момент выполнения расчетов ре-

комендуется пользоваться формулой:  $C_1 = C (1,015)^n$ ,

где  $C$  – общая балансовая стоимость основных производственных фондов на 2001 год; 1,015 - усредненный ежегодный темп роста основных фондов;  $n$  – число лет между 2001 годом и годом выполнения расчетов;  $S$  – площадь территории субъекта РФ;  $S_1; S_2; S_3$  – площадь соответственно зон сильных, средних и слабых разрушений;  $K_1; K_2; K_3$  – степень разрушения в зонах сильных, средних и слабых разрушений;  $\Pi_1; \Pi_2; \Pi_3$  – коэффициент концентрации основных фондов на территории зон, соответственно сильных, средних и слабых разрушений;  $P_i$  – плотность населения в зонах соответственно сильных ( $i=1$ ), средних ( $i=2$ ) и слабых ( $i=3$ ) разрушений;  $\Pi_i = P_i / P_{фон}$ , ( $P_{фон}$  – средняя плотность населения по субъектам).

В случае, когда  $\Pi_1 = \Pi_2 = \Pi_3 = \Pi$ , формула (6.6.1) приобретает вид:

$$I_1 = I_{1(фон)} \Pi (S_1 K_1 + S_2 K_2 + S_3 K_3) . \quad (6.6.2)$$

#### 6.6.1.3. Ущерб оборотным производственным фондам.

Ущерб оборотным производственным фондам в материальном выражении  $I_{об}$  (сырье, запасные детали, запасы топлива и т.п.) следует принимать в размере 5% от ущерба основным производственным фондам.

#### 6.6.2 Ущерб готовой продукции предприятий.

6.6.2.1. Оценку ущерба готовой продукции, произведенной на предприятии и хранящейся на затрагиваемой аварией территории, следует производить по формуле:

$$I_2 = I_{2(фон)} m (S_1 K_1 \Pi_1 + S_2 K_2 \Pi_2 + S_3 K_3 \Pi_3) \quad (6.6.3)$$

где:  $I_2$  – ущерб готовой продукции;  $I_{2(фон)}$  – общий валовый национальный продукт, произведенный за рабочий день в субъекте РФ и отнесенный к единице его территории,

$$I_{2(фон)} = P_1 / S N_p$$

где  $P_1$  – валовый национальный продукт за год.

При невозможности определить  $P_1$  на момент выполнения расчетов рекомендуется пользоваться формулой:

$$P_1 = P E^n$$

где  $P$  – валовый национальный продукт, произведенный в субъекте РФ в 1997 году);  $E=1,025$  - средний ежегодный темп роста ВВП;  $n$  – число лет между 2001 годом и годом выполнения расчетов;  $N_p=250$  – число рабочих дней в году;  $m$  – срок хранения готовой продукции на предприятии (7 сут).

Остальные обозначения те же, что и для формулы 6.6.1.

#### 6.6.3. Ущерб транспорту и связи.

6.6.3.1. На основе построенной по результатам расчетов карты возможных разрушений в баллах, а также карт глубин и продолжительности затопления с использованием табл. 6.5 определяются зоны сильных, средних и слабых разрушений для объектов транспорта и линий связи. При этом отнесение территории к той или иной зоне следует производить, если хотя бы один из критериев превосходит указанные значения.

Степень разрушения (утраты остаточной балансовой стоимости) по зонам принимается следующая: 1) зона сильных разрушений  $K_1 = 0,8$ ; 2) зона средних разрушений  $K_2 = 0,4$ ; 3) зона слабых разрушений  $K_3 = 0,1$ .

Табл. 6.5. Шкала тяжести разрушений дорожных сооружений

Типы элементов транспортных магистралей	Сильные разрушения				Средние разрушения				Слабые разрушения			
	Н, м	V, м/с	B, м	T, час	Н, м	V, м/с	B, м	T, час	Н, м	V, м/с	B, м	T, час
Деревянные мосты	1	2	6,5	-	1	1,5	6	-	0,5	0,5	3,5	-
Железобетонные мосты	2	3	8	50	1	2	6,5	30	0,5	0,5	3,5	10
Металлические мосты и путепроводы с пролетом 30-100 м, ЛЭП, линии связи	2	3	8	50	1	2	6,5	30	0,5	0,5	3,5	10
Металлические мосты и путепроводы с пролетом более 100 м	2	2	7	50	1	1	5,5	30	0,5	0,5	3,5	10
Железнодорожные пути	2	2	7	100	1	1,5	6	50	0,5	0,5	3,5	30
Дороги с гравийным покрытием	2,5	2	7,5	100	1	1,5	6	50	0,5	0,5	3,5	30
Шосейные дороги с асфальтовым покрытием	4	3	8,5	240	2	1,5	6,5	170	1	1	5,5	100

Примечание: Н – глубина затопления; В – балльность разрушения; Т – длительность затопления; V – скорость

6.6.3.2. Расчет ущерба транспорту и связи производится по формуле:

$$I_3 = I_{3(\text{фон})} (L_1 K_1 + L_2 K_2 + L_3 K_3), \quad (6.6.4)$$

где  $I_3$  – ущерб элементам транспорта и связи;  $I_{3(\text{фон})}$  – общая стоимость основных фондов элементов транспорта и связи в субъекте РФ, отнесенная к единице длины автодорог:  $I_{3(\text{фон})} = D_1/L$ ,

где  $D_1$  – общая балансовая стоимость элементов транспорта и связи; при невозможности определить  $D_1$  на момент выполнения расчетов рекомендуется пользоваться формулой:  $D_1 = DE^n$ , где  $D$  – общая балансовая стоимость объектов транспорта и связи;  $E = 1,015$  – усредненный ежегодный темп роста основных фондов;  $n$  – число лет между 1997 годом и годом выполнения расчетов;  $L$  – протяженность автомобильных дорог в субъекте РФ;  $L_1$ ;  $L_2$ ;  $L_3$  – протяженность ав-

тодорог, соответственно, в зонах сильных, средних и слабых разрушений;  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$  – степень разрушения в зонах сильных, средних и слабых разрушений.

#### 6.6.4. Ущерб жилому фонду и имуществу граждан.

6.6.4.1. На основе построенной по результатам расчетов карты возможных разрушений в баллах, а также карт глубин и продолжительности затопления с использованием табл. 6.6 определяются зоны сильных, средних и слабых разрушений для объектов жилого фонда и имущества граждан. При этом отнесение территории к той или иной зоне следует производить, если хотя бы один из критериев превосходит указанные значения.

Степень разрушения (утраты остаточной балансовой стоимости) по зонам принята следующая: 1) зона сильных разрушений  $K_1 = 0,7$ ; 2) зона средних разрушений  $K_2 = 0,3$ ; 3) зона слабых разрушений  $K_3 = 0,1$ .

Табл. 6.6. Шкала тяжести разрушений жилых зданий

Типы объектов жилого фонда	Сильные разрушения				Средние разрушения				Слабые разрушения			
	Н, м	V, м/с	В, м	Т, час	Н, м	V, м/с	В, м	Т, час	Н, м	V, м/с	В, м	Т, час
Сборные деревянные жилые дома	3	2	7,5	48	2,5	1,5	6,5	24	1	1	5,5	12
Деревянные дома (1-2 этажа)	3	2	7,5	48	2,5	1,5	6,5	24	1	1	5,5	12
Легкие 1-2-этажные бескаркасные постройки	3	2	7,5	72	2,5	1,5	6,5	48	1	1	5,5	24
Кирпичные дома малой этажности (1-3 этажа)	4	2,5	8	50	3	2	7	100	2	1	6	50
Кирпичные и блочные дома (4 и более этажей)	6	3	8	240	4	2,5	8	170	2,5	1	7	100

Примечание: Н – глубина затопления; В – балльность разрушения; Т – длительность затопления; V – скорость

#### 6.6.4.2. Расчет ущерба жилому фонду следует производить по формуле:

$$I_4 = \beta_1 C_{cn} (N_1 K_1 + N_2 K_2 + N_3 K_3) + \beta_2 C_{cn} (M_1 K_1 + M_2 K_2 + M_3 K_3), \quad (6.6.5)$$

где:  $I_4$  – ущерб жилому фонду;  $C_{cn}$  – средняя стоимость жилого фонда и имущества на одного сельского жителя;  $N_1$ ;  $N_2$ ;  $N_3$  – количество сельских жителей, проживающих в зонах сильного, среднего и слабого разрушений;  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$  – степень разрушения по зонам;  $C_{gm}$  – усредненная стоимость жилого фонда и имущества на одного городского жителя;  $M_1$ ;  $M_2$ ;  $M_3$  – количество городских жителей, проживающих, соответственно, в зонах сильного, среднего и слабого разрушений;  $\beta_1=1,1$  и  $\beta_2=1,3$  – коэффициенты, учитывающие ущерб элементам сельского и городского благоустройства.

Рекомендуемые исходные данные для расчета ущербов:

сельские населенные пункты – стоимость жилья, имущества и земельного участка на 1 чел.,  $C_{сн} = 46,7$  тысяч рублей; городские населенные пункты – стоимость жилья и имущества на 1 чел.,  $C_{гн} = 122$  тысяч рублей.

Эти исходные данные могут уточняться при составлении расчетов по конкретным объектам, если можно получить более точную информацию.

6.6.4. 3. При подсчетах ущерба к жилому фонду следует относить:

а) оздоровительные учреждения; б) больницы и интернаты; в) охотничьи и рыболовные строения; г) прочие учреждения временного пребывания.

При этом для сезонных объектов рекреации вводится коэффициент 0,5, а для других учреждений непостоянного пребывания людей – 0,7.

6.6.5. Определение социального ущерба и пострадавших при возникновении гидродинамической аварии.

6.6.5.1. Оценку возможного числа погибших (безвозвратные потери) людей и пострадавших (возвратные потери) при гидродинамической аварии следует проводить по утвержденной методике.

6.6.5.2. Отнесение территории к той или иной зоне воздействия следует производить по критериям, используемым для объектов жилого фонда и имущества граждан (6.6.4.1). При этом в зоне сильных воздействий должна быть выделена ближайшая к створу зона катастрофических воздействий. Размеры этой зоны определяются обязательным сочетанием следующих факторов: 1) зона располагается в пределах одного часа добегания волны до створа; 2) глубина затопления должна быть более 3 метров.

6.6.5.3. Оценку возможных потерь следует производить в процентах от численности населения, проживающего в разных зонах, а затем определять абсолютные величины. Требуемые для расчета данные помещены в табл. 7.

6.6.6. Расходы на ликвидацию последствий аварии.

6.6.6.1. Должны быть предусмотрены следующие меры по ликвидации последствий аварии: 1) эвакуация людей из зоны бедствия; 2) разборка за-

валов, обрушившихся строений, расчистка от вынесенного грунта; 3) ликвидация ледовых заторов; 4) восстановление водоснабжения, электроснабжения и теплоснабжения по временной схеме; 5) единовременная выплата населению; 6) прочие расходы, связанные с обеспечением необходимых условий проживания населения, затронутого гидродинамической аварией.

Табл. 6.7. Число погибших и пострадавших

Зона воздействия	Общие потери (%)		Из общего числа потерь			
	Днем	Ночью	Безвозвратные (%)		Возвратные (%)	
			Днем	Ночью	Днем	Ночью
1 зона – катастрофическая	60	90	40	75	60	25
2 зона – сильное воздействие	13	25	10	20	90	80
3 зона – среднее воздействие	5	15	7	15	93	85
4 зона – слабое воздействие	2	10	5	10	95	90

6.6.6.2. Расходы на указанные в 6.6.6.1 мероприятия следует определять в размере 20% от суммы материального ущерба на территории населенных пунктов и промышленных объектов:

$$I_5 = 0,2 (I_1 + I_{об} + I_2 + I_3 + I_4) . \quad (6.6.6)$$

4.4.7. Ущерб сельскохозяйственному производству.

4.4.7.1. Ущерб сельскохозяйственному производству следует определять по данным табл. 6.8 и принимать в размере 50% от стоимости земли по действующим нормативам восстановления. При этом площадь нарушений принимается равной 40% от общей площади затопленных сельхозугодий:

$$I_6 = 0,2 S_{cx} K_{норм.с}. \quad (6.6.7)$$

где  $I_6$  – ущербы сельскохозяйственному производству;  $S_{cx}$  – площадь сельхозугодий, расположенных в зоне катастрофического затопления, га;

$K_{норм.с.}$  – средний по субъекту РФ норматив стоимости освоения новых земель взамен изымаемых сельскохозяйственных угодий.

6.6.7.2. В общей сумме ущерба сельскохозяйственному производству следует учитывать: а) потерю плодородия – 60%; б) потерю произведенной сельхозпродукции – 5%; в) сопутствующие реальные ущербы – 35%.

6.6.8. Ущерб лесному хозяйству.

Табл. 6.8. Данные для расчета ущербов сельскому, лесному хозяйствам, водозаборам и водному транспорту в верхнем бьефе

Группа субъектов РФ	$K_{норм.с.}$ Нормативы стоимости освоения новых земель взамен изымаемых сельхоз. земель, тыс. руб./га	$K_{норм.л.}$ Нормативы платы за перевод лесных земель в населенные, тыс. руб./га	$P,$ Средне минимальные ставки за древесину, руб./м <sup>3</sup>	Средне минимальные ставки платы	
				За забор 1 тыс. м <sup>3</sup> воды, П <sub>1</sub> , руб./тыс.м <sup>3</sup>	За 1 км <sup>2</sup> акватории, П <sub>2</sub> , тыс. руб./км <sup>2</sup>
<i>I зона</i> (Карелия, Коми, Архангельская, Мурманская обл)	127	70	17	51	2,0
<i>II зона</i> (Удмуртия, Брянск., Владимирск., Вологодск., Иванов., Калужск., Тверск., Костром., Новгород., Перм, Псков., Смоленск., Ярослав. обл.)	124	60	15	55	2,2
<i>III зона</i> (Чувашия, Нижегород., Орлов., Рязан., Тулс. обл)	156	80	18	55	2,2
<i>IV зона</i> (Мордовия, Татарстан, Белгород., Воронеж., Самар., Тульск., Курск., Липецк., Пензен., Тамбов., Ульянов. обл.)	206	110	20	55	2,6
<i>V зона</i> (Калмыкия, Астрахан., Волгоград. и Саратов. обл.)	174	120	19	60	2,6
<i>VI зона</i> (Адыгея, Краснодарский край)	270	180	21	105	2,2
<i>VII зона</i> (Дагестан, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкессия, Северная Осетия, Чечня, Ставропольский край, Ростов. обл.)	259	165	21	105	2,2
<i>VIII зона</i> (Башкирия, Курган., Оренбург., Свердлов., Челябинская обл.)	147	83	16	66	2,4
<i>IX зона</i> (Горный Алтай, Алтайский край, Кемеров., Новосибир., Омс., Томск., Тюмен. обл., Ханты-Мансийск. округ)	177	122	14	48	2,3
<i>X зона</i> (Бурятия, Тыва, Хакасия, Красноярск. край, Иркутск. и Читин. обл., Бурятск., Таймыр., Ордын. и Бурят. окр)	188	85	10	42	2,0
<i>XI зона</i> (Саха-Якутия, Примор. и Хабаров. края, Амурск., Камчатск., Магадан., Сахалин., Еврей. обл, Чукотск. окр)	194	90	12	33	2,5
<i>XII зона</i> (Калин., Ленин. обл.)	263	180	21	62	2,1
<i>XIII зона</i> (Московская обл.)	260	200	22	61	2,6

6.6.8.1. Ущерб от потери леса как сырья для лесоперерабатывающей промышленности следует определять по формуле:

$$I_{7c} = 0,15 P S_l M \quad (6.6.8)$$

где  $I_{7c}$  – ущерб от потери леса как сырья;  $P$  – стоимость одного м<sup>3</sup> корневого запаса, руб/м<sup>3</sup> (минимальные ставки платы за древесину, отпускаемую на корню);  $S_l$  – площадь лесов в зоне катастрофического затопления, га;  $M$  – средний корневой запас товарной древесины, м<sup>3</sup>/га, определяемый по данным регионального органа лесного хозяйства; при невозможности получить точные данные можно принимать следующие значения: а) для таежных районов  $M=130$  м<sup>3</sup>/га; б) для районов со смешанными лесами  $M=90$  м<sup>3</sup>/га; в) для прочих районов  $M=50$  м<sup>3</sup>/га.

6.6.8.2. Ущерб от затопления лесов следует определять по формуле:

$$I_{7э} = \alpha_1 S_l K_{\text{норм.л.}} \alpha_2 \quad (6.6.9)$$

где  $I_{7э}$  – экологический ущерб от затопления лесов;  $S_l$  – площадь лесов в зоне катастрофического затопления, га;  $K_{\text{норм.л.}}$  – средний норматив платы за перевод лесных земель в нелесные, установленный в субъекте РФ, с учетом особенностей лесов в зоне катастрофического затопления ( $\alpha_2=0,4$  – доля лесных земель в зоне затопления, подверженных нарушению);  $\alpha_1=0,15$  – доля утраченных лесных земель из подверженных затоплению.

6.6.8.3. Общий ущерб от затопления лесов при аварии равен:

$$I_7 = I_{7c} + I_{7э} \quad (6.6.10)$$

6.6.9. Ущерб окружающей природной среде.

6.6.9.1. Ущерб вызывается повреждением или разрушением в зоне затопления объектов, на которых получают или хранят опасные вещества.

6.6.9.2. Оценку возможного ущерба следует проводить в три этапа:

на первом этапе осуществляется оценка количества опасных веществ, которые могут поступить в природную среду из-за разрушения ГТС;

на втором этапе производится оценка ущерба, причиненного природной среде из-за загрязнения ее опасными веществами. Оценка производится в натуральных показателях с применением зависимостей «эффект – воздействие». Цель этой оценки – определить площади поражения ( $S_i$ ) и объемы работ ( $V_i$ ), необходимых для восстановления природной среды. В эту оценку не входят затраты, определяемые ущербом сельскохозяйственному производству, ущербом лесному хозяйству, ущербы ВБ;

на третьем этапе производится денежная оценка возможного ущерба. При этом должны учитываться только затраты, связанные с восстановлением (рекультивацией) природной среды.

6.6.9.3. Ущерб окружающей среде следует определять по формуле:

$$I_8 = \sum (S_i V_i C_i), \quad (6.6.11)$$

где:  $I_8$  – ущерб окружающей среде от сброса опасных веществ в окружающую среду;  $S_i$  – площадь, пораженная сбросом  $i$ -го опасного вещества;  $V_i$  – объем работ, которые необходимо провести для восстановления природной среды, пораженной сбросом  $i$ -го опасного вещества;  $C_i$  – стоимость единицы объема работ по восстановлению окружающей среды, связанных со сбросом первого опасного вещества. Нормативные расценки на работы устанавливаются по регионам.

6.6.10. Ущерб по верхнему бьефу.

6.6.10.1. Ущерб водозаборным сооружениям следует учитывать, если уровень опорожнения водохранилища прогнозируется ниже отметки уровня мертвого объема (УМО), а скорость снижения уровня ВБ при аварии составит более 3 метров в сутки или если понижение уровня грунтовых вод приводит к прекращению водоснабжения за счет этих вод. В этом случае ущерб определяется необходимыми затратами на восстановление водоснабжения, прерванного из-за отказа или выхода из строя водозаборных сооружений. Оценку ущерба следует проводить по нормам для аварийного водоснабжения населения в зоне чрезвычайной ситуации:

$$I_9 = \sum (N_i t_i C_i), \quad (6.6.12)$$

где:  $I_9$  – ущерб, вызванный нарушением водоснабжения из-за аварии водозаборов;  $N_i$  – количество жителей, снабжавшихся водой из  $i$ -го водозабора (для них необходимо организовать аварийное водоснабжение – не более  $0,6 \text{ м}^3/\text{сут}$ );  $t_i$  – число дней аварийного водоснабжения (по  $i$ -му водозабору);  $C_i$  – суточные затраты на организацию аварийного водоснабжения на одного жителя.

6.6.10.2. Ущерб объектам водного транспорта на водохранилище определяется в случае внесения его в список водных объектов, используемых в целях водного транспорта. Ущерб в этом случае определяют по формуле:

$$I_{10} = F P_2 \beta_3, \quad (6.6.13)$$

где:  $I_{10}$  – ущерб объектам водного транспорта;  $F$  – площадь используемой части акватории водохранилища,  $\text{км}^2$ ; при отсутствии данных

$$F = B L_в, \quad (6.6.14)$$

где  $B$  – условная ширина судового хода ( $B=0,2 \text{ км}$ );  $L_в$  – длина водохранилища;  $P_2$  – ставка платы за использование акватории, установленная для данного водохранилища региональным органом МПР РФ. В случае отсутствия данных следует принимать по минимальной ставке платы, приведенной в табл. приложения 5 к методике;  $\beta_3 = 10$  – коэффициент, учитывающий возможные повреждения на объектах водного транспорта при неконтролируемой сработке водохранилища.

Если известна остаточная балансовая стоимость основных производственных фондов водного транспорта в ВБ, то ущерб определяют как:

$$I_{10} = C_{e.m.} \beta_4 \beta_5, \quad (6.6.15)$$

где:  $I_{10}$  – ущерб объектам водного транспорта;  $C_{e.m.}$  – остаточная балансовая стоимость производственных фондов;  $\beta_4=0,1$  – степень повреждения основных фондов в результате не контролируемой сработки ВБ;  $\beta_5= 0,5$  – доля основных фондов водного транспорта, используемого на территории.

6.6.10.3. Ущерб рыбному хозяйству. Если на водохранилище ведется промысловый лов рыбы, ущерб определяется по формуле:

$$I_{11} = \beta_6 V C_p T, \quad (6.6.16)$$

где  $I_{11}$  – ущерб рыбному хозяйству;  $V$  – ежегодный вылов рыбы;  $T$  – количество лет, необходимое для формирования нового ихтиоценоза ( $T=5$ );  $C_p$  – рыночная стоимость пойманной рыбы на момент расчетов (в 2000 году эту стоимость можно принять 20 рублей за кг);  $\beta_6 = 1,2$  – коэффициент учета возможного ущерба рыбному хозяйству в НБ.

При отсутствии данных о вылове рыбы ущерб определяют по формуле:

$$I_{11} = \beta_6 S_a G C_p T, \quad (6.6.17)$$

где  $S_a$  – площадь водохранилища при НПУ, га;  $G$  – средняя рыбопродуктивность, которая для условий Европейской части РФ принимается 10 кг с гектара площади водохранилища, для Сибири и Дальнего Востока – 5 кг с гектара; остальные обозначения те же, что и для формулы (6.6.16).

#### 6.6.11. Прочие виды реального ущерба

Прочие виды реального ущерба, которые невозможно заранее прогнозировать, следует рассчитывать по аналогии с вычислением непредвиденных расходов при осуществлении инвестиционных проектов водохозяйственного строительства и их рекомендуется принимать в размере 10% от суммарного ущерба за исключением ущербов сельскому хозяйству и экологических ущербов от потери леса.

$$I_{12} = 0,1(I_1 + I_{об} + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_{7c} + I_8 + I_9 + I_{10} + I_{11}) \quad (6.6.18)$$

#### 6.6.12. Общий реальный ущерб

Общий реальный ущерб следует определять суммированием всех видов ущербов от гидродинамической аварии на гидроузле с учетом ущербов сельскому хозяйству и экологических ущербов от потери леса:

$$I_{общ} = (I_1 + I_{об} + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_{7c} + I_{7s} + I_8 + I_9 + I_{10} + I_{11} + I_{12}) \quad (6.6.19)$$

## Декларация безопасности ГТС

(Приложение 1)

Декларация безопасности ГТС является основным документом, который содержит сведения о соответствии ГТС критериям безопасности. Собственник ГТС или эксплуатирующая организация составляет декларацию безопасности ГТС на стадиях: 1) проектирования; 2) строительства; 3) ввода в эксплуатацию; 4) эксплуатации; 5) вывода из эксплуатации; 6) после реконструкции; 7) после капитального ремонта; 8) после восстановления; 9) после консервации.

Содержание декларации безопасности ГТС и порядок ее разработки устанавливает Правительство РФ с учетом специфики ГТС.

Собственник ГТС или эксплуатирующая организация представляет декларацию безопасности ГТС в орган надзора за безопасностью ГТС, в Регистр для получения разрешения на строительство, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию или вывод из эксплуатации ГТС либо на его реконструкцию, капитальный ремонт, восстановление или консервацию.

Деятельность по проектированию, строительству и эксплуатации ГТС может осуществляться только на основании соответствующих лицензий, выданных в соответствии с федеральным законом о лицензировании.

Лицензии на эксплуатацию ГТС выдаются при наличии документов, подтверждающих финансовое обеспечение ответственности собственников ГТС или эксплуатирующих организаций за последствия аварий ГТС. Необходимым условием выдачи таких лицензий является внесение ГТС в Регистр.

Система контроля любого ГТС I-III класса капитальности предусматривает разработку следующей технической документации:

- программы натуральных наблюдений и исследований, схемы размещения КИА, коммутации и автоматизированных измерительной или диагностической системы в зависимости от необходимого объема информации и уникальности ГТС, на стадии технического проекта;
- технических заданий на размещение КИА в ГТС, коммутации и диагностической или измерительной системы;
- установочных чертежей КИА и проекта измерительной или диагностической системы на стадии рабочего проекта;
- программ наблюдений на ГТС в строительный период, период временной и постоянной эксплуатации;
- программного обеспечения измерительной или диагностической системы и банка данных ГТС;
- разработку диагностических моделей сооружения для осуществления оперативного контроля;
- предложений по предельно-допустимым значениям показателей работы и состояния ГТС;
- инструкции по визуальным и инструментальным наблюдениям на ГТС в период постоянной эксплуатации.

**ФОРМА АКТА  
ПРЕДДЕКЛАРАЦИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ГТС**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель организации -  
декларанта

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель Управления по  
технологическому и экологическому  
надзору Ростехнадзора по ..... области

\_\_\_\_\_  
(подпись) (Ф.И.О.)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_ г.

\_\_\_\_\_  
(подпись) (Ф.И.О.)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_ г.

**АКТ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГТС <sup>1</sup>**

\_\_\_\_\_  
(наименование ГЭС или ГАЭС)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_ г.  
\_\_\_\_\_  
(место составления акта)

В целях реализации требований Федерального закона «О безопасности ГТС» создана комиссия, которая провела обследование ГТС

\_\_\_\_\_  
(наименование ГЭС или ГАЭС)  
и проверку организации контроля за ними в объеме установленных требований.

Состав комиссии:  
Председатель комиссии:

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы) \_\_\_\_\_  
(должность, организация)  
Заместитель председателя комиссии:

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы) \_\_\_\_\_  
(должность, организация)  
Члены комиссии:

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы) \_\_\_\_\_  
(должность, организация)  
Дата предыдущего обследования \_\_\_\_\_

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЭС (ГАЭС)**

**КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГТС (ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ)<sup>2</sup>**

- 1.1. Название, назначение и местоположение электростанции \_\_\_\_\_
- 1.2. Генеральный проектировщик \_\_\_\_\_
- 1.3. Генеральный подрядчик по строительству \_\_\_\_\_
- 1.4. Сроки строительства \_\_\_\_\_  
годы пуска во временную и постоянную эксплуатацию \_\_\_\_\_
- 1.5. Наличие актов Госкомиссии приемки ГЭС в постоянную эксплуатацию
- 1.6. Собственник ГЭС (ГАЭС) \_\_\_\_\_
- 1.7. Эксплуатирующая организация \_\_\_\_\_  
Наличие и сроки действия лицензии \_\_\_\_\_

1.8. Установленная электрическая мощность ГЭС (ГАЭС) \_\_\_\_\_ МВт;

1.9. Среднегодовая выработка электроэнергии \_\_\_\_\_ млн. кВт.ч.

1.10. Состав ГТС ГЭС (ГАЭС) \_\_\_\_\_

1.11. Класс ГТС \_\_\_\_\_

Общая протяженность напорного фронта \_\_\_\_\_

1.12. Водоток:

Наименование \_\_\_\_\_

среднегодовой сток \_\_\_\_\_ км<sup>3</sup>;

среднегодовой расход \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

максимальный наблюдаемый расход (дата) \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

расчетный максимальный расход воды - обеспеченностью:

основной расчетный случай - \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

поверочный расчетный случай - \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с.

9.4. Суммарный сбросной расход воды через все водопропускные сооружения гидроузла (с учетом аккумуляции части стока реки в водохранилище):

основной расчетный случай - \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

поверочный расчетный случай - \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с.

9.4. Природно-климатические условия в районе створа:

климат \_\_\_\_\_

топография \_\_\_\_\_

геология \_\_\_\_\_

сейсмичность \_\_\_\_\_

(в проекте) (по СНиП)

1.16. Характеристика ГТС ГЭС или ГАЭС.

1.16.1. Водоохранилище (бассейн ГАЭС, бассейн суточного регулирования деривационной ГЭС).

Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) \_\_\_\_\_

Отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ) \_\_\_\_\_

Отметка уровня мертвого объема (УМО) \_\_\_\_\_

Площадь зеркала при НПУ \_\_\_\_\_ км<sup>2</sup>

Полный объем \_\_\_\_\_ млн. м<sup>3</sup>

Полезный объем \_\_\_\_\_ млн. м<sup>3</sup>

Характер регулирования бытового стока реки \_\_\_\_\_

Режим регулирования паводков \_\_\_\_\_

1.16.2. Водоподпорное сооружение (плотина, дамба).

Тип сооружения \_\_\_\_\_

Грунты основания \_\_\_\_\_

Отметка гребня \_\_\_\_\_

Максимальный напор \_\_\_\_\_ м

Строительная высота \_\_\_\_\_ м

Длина по гребню \_\_\_\_\_ м

Ширина по гребню \_\_\_\_\_ м

Ширина по подошве \_\_\_\_\_ м

Противофильтрационные и дренажные устройства \_\_\_\_\_

Конструкция сопрягающих устройств \_\_\_\_\_

Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

Для плотины из грунтовых материалов

Материал тела плотины \_\_\_\_\_

Заложение откосов \_\_\_\_\_

Тип крепления откосов \_\_\_\_\_

Для бетонной водосливной (водосбросной) плотины

Отметка порога водослива \_\_\_\_\_

Суммарный расчетный расход воды через водосливные отверстия:

при НПУ \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

при ФПУ \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с.

Конструкция водобоя и рисбермы \_\_\_\_\_

1.16.3. Водозаборное (водосбросное) сооружение.

Тип сооружения \_\_\_\_\_

Грунты основания \_\_\_\_\_

Основные размеры сооружения \_\_\_\_\_

Противофильтрационные и дренажные устройства \_\_\_\_\_

Конструкция сопрягающих устройств \_\_\_\_\_

Отметка порога водоприемного отверстия \_\_\_\_\_

Количество водоприемных отверстий и их основные размеры \_\_\_\_\_

Суммарный расчетный расход воды через отверстия:

при НПУ \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с;

при ФПУ \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с.

Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

1.16.4. Водопроводящее сооружение - деривация

(канал, туннель, трубопровод).

Тип сооружения \_\_\_\_\_

Назначение \_\_\_\_\_

Грунты по трассе \_\_\_\_\_

Количество ниток и их основные размеры \_\_\_\_\_

Расчетный расход сооружения \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с

Допустимые скорости воды (максимум и минимум) \_\_\_\_\_ м/с

Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

Тип опор и компенсаторов трубопровода \_\_\_\_\_

Тип крепления дна и откосов канала (обделки туннеля) \_\_\_\_\_

1.16.5. Сооружения на деривации (отстойник, акведук, дюкер, напорный бассейн, уравнильный резервуар, шлюз-регулятор и др.).

Тип сооружения \_\_\_\_\_

Грунты основания \_\_\_\_\_

Основные размеры \_\_\_\_\_

Техническая характеристика \_\_\_\_\_

Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

1.16.6. Здание ГЭС (здание ГАЭС).

Тип здания \_\_\_\_\_

Грунты основания \_\_\_\_\_

Строительная высота \_\_\_\_\_ м

Длина \_\_\_\_\_ м

Ширина \_\_\_\_\_ м

Противофильтрационные и дренажные устройства \_\_\_\_\_

Конструкция сопрягающих устройств \_\_\_\_\_

Конструкция водобоя и рисбермы \_\_\_\_\_

Тип и количество гидротурбин (турбино-насосов) \_\_\_\_\_

Расчетный расход (суммарный) \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/с

Напор на гидротурбину:

максимальный \_\_\_\_\_ м

расчетный \_\_\_\_\_ м  
 минимальный \_\_\_\_\_ м  
 Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

1.17. Прочие ГТС

Наименование и тип ГТС \_\_\_\_\_  
 Назначение \_\_\_\_\_  
 Грунты основания \_\_\_\_\_  
 Основные размеры \_\_\_\_\_  
 Техническая характеристика \_\_\_\_\_  
 Основные особенности компоновки и конструкции \_\_\_\_\_

1.18. Механическое оборудование ГТС \_\_\_\_\_

1.18.1. Затворы.

Тип затвора \_\_\_\_\_  
 Место установки \_\_\_\_\_  
 Количество \_\_\_\_\_  
 Максимальный напор \_\_\_\_\_ м  
 Масса затвора \_\_\_\_\_ т  
 Основные размеры \_\_\_\_\_  
 Конструкция закладных и опорно-ходовых частей \_\_\_\_\_  
 Тип уплотнения \_\_\_\_\_  
 Конструкция подхватов и захватных устройств \_\_\_\_\_  
 Тип, количество и грузоподъемность подъемных механизмов \_\_\_\_\_

1.18.2. Сороудерживающие решетки и водоочистные сетки.

Тип конструкции \_\_\_\_\_  
 Количество \_\_\_\_\_  
 Расчетный перепад на решетке \_\_\_\_\_ см  
 Тип сороочистного оборудования \_\_\_\_\_

1.19. Отказы, повреждения и аварии ГТС, имевшие место в период строительства, ввода в эксплуатацию и в период эксплуатации; принятые меры по их ликвидации и их техническая эффективность.

Краткая историческая справка по актам расследования

Дата	Краткое описание отказа, повреждения, аварийной ситуации	Мероприятия по ликвидации отказов, повреждений, аварийных ситуаций и их техническая эффективность

**2. ОСНАЩЕННОСТЬ ГТС СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ**

2.1. Наличие проекта и программы натурных наблюдений \_\_\_\_\_

2.2. Соответствие количества и номенклатуры КИА требованиям проекта и норм \_\_\_\_\_

Наименование ГТС и место установки КИА	Наименование аппаратуры	Количество аппаратуры			Примеч.
		по проекту	установленной	действующей	

2.3. Оценка состояния и достаточности КИА \_\_\_\_\_

2.4. Оценка работы средств и систем автоматизированного контроля сбора и обработки результатов измерений (в случае отсутствия автоматизации контроля дать заключение о необходимости ее ввода) \_\_\_\_\_

### **3. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ЗА ГТС**

3.1. Заключение о производственной структуре подразделений ГЭС (подразделений строительной организации), осуществляющих контроль за ГТС и их механическим оборудованием \_\_\_\_\_

3.2. Оценка укомплектованности подразделения технического контроля ГТС специальными нормативными документами, методическими рекомендациями, пособиями, инструкциями по проведению натуральных наблюдений \_\_\_\_\_

(привести перечень документов, оценить достаточность)

3.3. Оценка выполнения требований руководящих материалов и методических указаний в части объема и сроков проведения мероприятий по контролю за ГТС и их элементами \_\_\_\_\_

3.4. Наличие на объекте разработок критериев и показателей безопасности работы ГТМ, кем и когда разработаны \_\_\_\_\_

3.5. Порядок осуществления систематического анализа и оценки эксплуатационной надежности и безопасности ГТС по данным натуральных наблюдений (периодичность оценки, кто проводит, квалификация персонала, контроль руководителями объекта, оценка техотчетов, оперативность работы и т.п.) \_\_\_\_\_

3.6. Привлечение научно-исследовательских и проектных организаций для анализа данных наблюдений и оценки надежности и безопасности ГТС, решения сложных вопросов их эксплуатации и контроля (научно-техническое сопровождение); оценка достаточности выполняемых НИР и ПР \_\_\_\_\_

3.7. Ведение мониторинга ГТС и базы данных натуральных наблюдений (подразделением технического контроля или с участием научно-исследовательских организаций) \_\_\_\_\_

### **4. СОСТОЯНИЕ ГТС<sup>3</sup>**

4.1. Оценка прочности и устойчивости ГТС и их отдельных элементов \_\_\_\_\_

4.2. Оценка фактической способности водопропускных сооружений в створе гидрозла, сведения о тарировке водопропускных трактов и водосбросов \_\_\_\_\_

4.3. Оценка достаточности превышения гребня ГТС и противофильтрационных элементов над НПУ (ФПУ) \_\_\_\_\_

4.4. Оценка состояния конструктивных элементов ГТС \_\_\_\_\_

4.5. Оценка состояния зон сопряжения ГТС \_\_\_\_\_

4.6. Оценка работоспособности и прочности механического оборудования и специальных стальных конструкций ГТС \_\_\_\_\_

4.7. Оценка работы средств противоаварийной защиты и автоматики на ГТС \_\_\_\_\_

4.8. Оценка состояния дорог и сооружений на них; по мостам следует привести сведения о годе его ввода в эксплуатацию, схеме моста, материалах пролетного строения, опор, состоянии конструкций, годе проведения последнего обследования и его результатах, об организации, проводившей обследование \_\_\_\_\_

4.9. Сведения об оценке состояния ГТС, обоснованные выполненными исследованиями (по данным технических отчетов научно-исследовательских и проектных организаций за последние 5 лет) \_\_\_\_\_

### **5. ВЫПОЛНЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ И РЕКОНСТРУКЦИИ ГТС**

5.1. Сведения о плановых ремонтах и реконструкциях ГТС, направленных на повышение их эксплуатационной безопасности, за последние 5 лет \_\_\_\_\_

Наименование ГТС и состав работ	Сроки проведения работ		Сметная стоимость тыс. руб.	Фактические затраты	Примечания
	начало	окончание			

5.2. Оценка достаточности планируемого объема и своевременности выполнения работ по ремонту и реконструкции ГТС \_\_\_\_\_

5.3. Оценка технической эффективности выполненных ремонтных и реконструкционных работ по повышению безопасности ГТС \_\_\_\_\_

5.4. Заключение об организации ремонтов и технического обслуживания ГТС, достаточности объемов и своевременности работ \_\_\_\_\_

### **6. ВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

6.1. Сведения о наличии технической документации, исходя из требований разд. 5 приложения 1 «Положения...» \_\_\_\_\_

6.2. Оценка ведения технической документации \_\_\_\_\_

### **7. ВЫПОЛНЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ ГТС<sup>4</sup>**

Мероприятие и наименование документа	Установленный срок выполнения	Результат выполнения	Дата выполнения	Примечание

### **8. ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ ГИДРОУЗЛА (ГЭС) К ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ОПАСНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГТС**

8.1. Общие сведения о численности населения, населенных пунктах, промышленных и других объектах, расположенных в зоне возможного затопления в НБ в случае прорыва напорного фронта гидроузла \_\_\_\_\_

8.2. Наличие на объекте документов по отказам, повреждениям и авариям ГТС, причинам их возникновения и признакам проявления на начальных стадиях развития; уровень знания указанных сведений эксплуатационным персоналом \_\_\_\_\_

8.3. Наличие на объекте типовых инженерно-технологических решений, проектных проработок или рекомендаций по предотвращению развития и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на ГТС; уровень знания указанных сведений эксплуатационным персоналом \_\_\_\_\_

(указать, какие документы и рекомендации имеются, проверить знания персонала)

8.4. Наличие на объекте необходимых резервов строительных материалов (открытые карьеры и отвалы грунтов, склады цемента, металл и т.п.), землеройной техники (экскаваторы, бульдозеры и др.), автотранспорта и других механизмов для оперативной ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на ГТС \_\_\_\_\_

(перечислить, что имеется, оценить достаточность)

8.5. Наличие на объекте и оценка работоспособности аварийных средств открытия всех водосливных отверстий в случае выхода из работы механизмов и оборудования и возникновения угрозы перелива воды через гребень ГТС \_\_\_\_\_

8.6. Состояние дорог, мостов и подъездов в районе и на территории ГТС, состояние аварийных выходов для эксплуатационного персонала \_\_\_\_\_

8.7. Наличие на объекте средств для ликвидации подводных повреждений ГТС и оборудования \_\_\_\_\_

8.8. Наличие на объекте плана оперативных действий эксплуатационного персонала при ликвидации аварийных ситуаций на ГТС, уровень знания этого плана персоналом

8.9. Наличие аварийных средств связи с персоналом ГТС при аварийных ситуациях, а также системы оповещения населения при угрозе прорыва напорного фронта \_\_\_\_\_

8.10. Наличие на объекте плана, согласованного с региональными органами МЧС и ГО, по совместной локализации и ликвидации гидрологических аварий и их последствий с участием спецподразделений и использованием материально-технических средств предприятий региона \_\_\_\_\_

8.11. Способы информирования населения и общественности по вопросам эксплуатации и безопасности ГТС \_\_\_\_\_

8.12. Общее Заключение о готовности гидроузла к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на ГТС \_\_\_\_\_

### **9. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

9.1. Общий вывод о техническом состоянии ГТС и возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации \_\_\_\_\_

9.2. Общий вывод о готовности гидроузла к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на ГТС \_\_\_\_\_

9.3. Мероприятия, ремонтные, реконструктивные и другие работы, направленные на обеспечение безопасности ГТС, со сроками их исполнения \_\_\_\_\_

9.4. Оценка уровня эксплуатации ГТС \_\_\_\_\_

Председатель комиссии

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы)

\_\_\_\_\_  
(должность, организация)

Заместитель председателя комиссии

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы)

\_\_\_\_\_  
(должность, организация)

Члены комиссии:

\_\_\_\_\_  
(фамилия, инициалы)

\_\_\_\_\_  
(должность, организация)

#### *Примечания.*

1. При обследовании каскада ГЭС допускается составление общего акта по каскаду.

2. При проведении обследования, предшествующего декларированию безопасности ГТС, проектные параметры по ГЭС не приводятся. При составлении акта обследования строящейся ГЭС приводятся проектные параметры постоянных и временных ГТС; для всех строящихся ГТС даются сведения по объему выполненных строительных работ.

3. Оценку состояния ГТС давать, исходя из фактических значений осадок, горизонтальных перемещений, напряжений, деформаций и фильтрационных параметров с учетом влияния на них геотехнических, гидрологических, водохозяйственных и других показателей.

4. Приводятся сведения о выполнении рекомендаций комиссий предыдущих обследований, предписаний органов надзора.

### *Приложение 3. Методические основы анализа и оценки риска аварий ГТС*

Внедрение анализа и оценок риска в программы обеспечения безопасности плотин, происходящее в последние 10 лет в ряде стран, передовых в плотиностроении (Канада, США, Китай, Бразилия, Австралия, Норвегия, Италия, Испания, Россия и др.), показывает, что в применении концепции анализа риска к ГТС остается ряд трудностей, однако такой подход уже приносит ощутимую пользу при контроле безопасности ГТС.

К преимуществам методологии анализа и оценки риска относятся:

- 1) комплексность процедуры исследований, так как анализируются все возможные причины, способы и сценарии отказов, учитываются последствия аварий по всем сценариям;
- 2) возможность учета факторов, не поддающихся пока количественной оценке (суффозия грунтов, «человеческий фактор» и др.);
- 3) возможность ранжирования опасностей, присущих данному ГТС и его группе, по уровню риска для населения, экономики и окружающей среды;
- 4) ясность процесса анализа риска, позволяющая улучшить понимание особенностей ГТС и уровня его безопасности и выявить эффективные пути предупреждения аварий, локализации и ликвидации их последствий.

Однако в России и за рубежом практическое применение анализа риска аварий ГТС пока немногочисленно и методически разобщено, что объясняется отсутствием единого подхода к решению таких задач. Кроме того, большие затруднения при оценке риска связаны с вопросом о критериях приемлемого риска аварий ГТС, особенно риска для жизни людей.

В 2003 году Технический комитет по безопасности плотин Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) выпустил Бюллетень №130 «Оценка риска при контроле безопасности плотин», в котором сделан обзор используемых в анализе риска ГТС методов и приемов, их достоинств и недостатков [12]. По мнению авторов проекта Бюллетеня, «в будущем раз-

*витии вероятностной оценки риска, включая количественную оценку, за-  
ключен потенциал значительного повышения безопасности плотин».*

СИГБ рекомендует оценивать риск в виде математического ожидания последствий наступления опасного события (как произведение вероятности этого события на математическое ожидание величины его последствий) или в виде комбинации (сценария) вероятностей наступления событий и их последствий. Таким образом, риск зависит от вероятности аварии плотины и ее последствий и представляет собой значительную величину, даже если эта вероятность очень мала.

В настоящее время отмечается три уровня применяемости анализа и оценок приемлемости риска при контроле безопасности ГТС [12]:

1) в первой группе стран анализ риска аварий ГТС рекомендован и широко используется; например, в Норвегии, где новыми нормами регламентирован детальный анализ опасностей и риска; в Нидерландах также разработаны и применяются процедуры и критерии, основанные на анализе риска;

2) во второй группе стран ведутся исследования в области безопасности ГТС, но имеются трудности в их применении; например, в Швеции анализ риска рекомендован, но применяется только к критическим ситуациям;

3) в третьей группе пока принята позиция выжидания, причем в ряде стран анализ риска систематически используется в промышленности, но не применяется пока в гидротехнике; например, Россия Франция, Англия.

Анализ и оценка риска аварий ГТС в России регламентированы требованиями Федерального закона «О безопасности ГТС» [1] и распространяются на ГТС: плотины, здания ГЭС, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, сооружения для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, берегов и русел рек, а также ограждающие дамбы жидких отходов промышленных организаций (хвостохранилищ), повреждения которых могут привести к возникновению чрезвычайной ситуации.

В СНиП 33-01-2003 [16] для полноты раскрытия неопределенностей по факторам, определяющим безопасность ГТС, уточнения расчетных характеристик и схем, сочетаний нагрузок, а также предельных состояний допускается применение вероятностного анализа. Впервые в этот СНиП были включены допускаемые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС I-III классов. Кроме того, научные институты по гидротехнике (ОАО «НИИЭС», «ВНИИГ» и «НИИ ВОДГЕО») подготовили свои пособия [11, 14] и стандарты предприятий [24, 26] для анализа и оценки риска.

Главной проблемой, с которой сталкиваются специалисты при оценке риска аварий плотин, это не то, смогут ли они оценить этот риск (это вполне возможно), а то, насколько адекватной ситуации принятия решения будет эта оценка. При оценке риска аварий плотин следует учитывать, что риск этих аварий всегда носит условный, относительный характер, определяется не только объективными, но и субъективными факторами. Адекватность оценки риска аварии каждой плотины зависит и от методики и квалификации эксперта и его умения работать с этими факторами.

В общем случае при исследованиях техногенного риска решается комплекс взаимосвязанных задач (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема основных задач исследований техногенного риска

1. Задачи анализа риска, в основе которых лежит идентификация (определение) опасностей и факторов риска. Задача анализа риска сводится к выявлению опасных обстоятельств и влияний, контролировать которые в данных условиях невозможно, а также объектов (ГТС) риска, которые испытывают опасные воздействия. Обычно опасные последствия для объектов риска рассматривают как факторы риска. В анализе риска устанавливают не только причинно-следственные отношения между опасностями и факторами риска, воздействиями на ГТС и его ответными реакциями, анализируют потенциальные ущербы, но могут оценивать и вероятности их возникновения с целью последующей оценки риска.

2. Задачи оценки риска, среди которых различают задачи оценки приемлемости риска, задачи расчета (оценки количественных значений риска) и задачи оценивания риска (проверки значений риска на допустимость).

3. Задачи управления риском.

Одной из самых сложных задач исследований риска аварий плотин является оценка его приемлемости. Количественные расчеты риска могут быть приближенными (имеется в виду приближение «сверху», т. е. исходя из принципа «лучше переоценить риск, чем его недооценить»). Можно определять верхнюю, максимально возможную границу риска. Оценку приемлемого (допустимого) риска следует устанавливать в каждом случае по принципу практически обоснованного минимального риска (*as low as reasonably practicable risk principle, ALARP*).

Оценка риска аварий плотин может проводиться в рамках различных подходов и с использованием разных методов. При этом может использоваться как априорная, так и апостериорная информация, статистические данные и субъективные суждения об условных вероятностях реакций ГТС на внешние воздействия. Специалисты часто не имеют возможности непосредственно применить вероятностные модели, на которых могут базиро-

ваться рациональные выводы. Среди основных сложностей следует выделить невозможность четко моделировать большинство форм аварий плотин. Следовательно, оценки вероятностей реализации разных форм аварии ГТС в разной мере будут страдать субъективизмом.

Оценку риска аварий ГТС можно осуществлять не только сопоставлением расчетных значений риска с допустимыми, но выбором среди возможных решений варианта, при котором риск минимизируется (*согласно принципу ALARP*).

Анализ и оценку риска связывают, прежде всего, с анализом и оценкой техногенной безопасности. При этом риск выражают через вероятность аварии, которую рассматривают как количественный показатель безопасности, как, например, вероятность отказа – как показатель надежности.

Представление риска аварий в форме вероятности при оценке безопасности плотины оправдано. Для любого опасного режима загрузки (гидрологического, статического, сейсмического и т. п.), как правило, последствия аварии плотины практически одинаковы. Нет больших отличий в том, из-за чего состоялся прорыв напорного фронта: был ли он вызван обрушением откоса плотины в результате землетрясения и разжижения грунтов, вследствие перелива воды из-за осадки гребня или отказа водосбросов, заклинивания затворов, суффозии грунтов и др. Последствия аварии могут сильно не отличаться. Экологические и экономические последствия прорыва напорного фронта от разных причин могут быть близкими. Социальные последствия также могут быть близкими, особенно в тех случаях, когда количество жертв мало зависит от времени добегания волны прорыва. При такой постановке задачи оценка риска сильно упрощается, так как нет необходимости оценивать и учитывать при расчетах число потенциальных жертв, экономические и экологические потери. Это приемлемо и в тех случаях, когда расхождение в вероятностях наступления опасных событий отвечают расхождениям соответствующих рисков или когда последствия аварии на-

столько катастрофичны, что их очень трудно оценить количественно.

Выбор метода анализа и оценки риска определяется целью исследований риска. Объединение цели исследований риска с методом его анализа и оценки определяет перспективы оценки риска аварий плотин и использование результатов этих исследований на практике. Это могут быть задачи, связанные с раскрытием неопределенности, задачи оптимизации и выбора среди возможных решений вариантов с минимальным риском.

В вопросе раскрытия неопределенности оценка риска аварий плотин может проводиться для решения следующих задач.

1. Ранжирование опасностей и факторов риска с выявлением среди них приоритетных. Риск тонко реагирует на вариабельность и неопределенность данных, широко изменяется, диагностируя проблемные факторы.

2. Исследование поведения ГТС с точки зрения вариабельности его реакций на случайные изменения внешних влияний и условий эксплуатации.

3. Обоснование потребности в дополнительной информации и дополнительных исследованиях. Разные изменчивость и неопределенность факторов и параметров продуцируют различные вклады этих факторов и параметров в общий риск аварий. Риск указывает на те места, где неопределенность проявляется наибольшим образом. При этом в процессе исследований риска раскрываются и пути раскрытия неопределенности.

4. Оценку риска аварий на плотинах следует рассматривать как итерационный процесс, повторяющийся, когда поступает новая информация. Знание рисков помогает сформулировать альтернативы, способные эффективно снижать идентифицированные риски с учетом ограниченности ресурсов для обеспечения безопасности. Выбор в пользу того или иного решения может быть сделан с учетом приоритета рисков.

5. С новыми данными оценки риска модифицируются, устанавливаются новые определяющие факторы и параметры (см. рис. 2). Эффективность мероприятий, направленных на уменьшение риска, оценивается при сопос-

тавлении рисков, прогнозируемых до и после внедрения соответствующих мероприятий. В таком виде оценка риска аварий плотин становится интегральной составляющей процесса обеспечения ее безопасности.

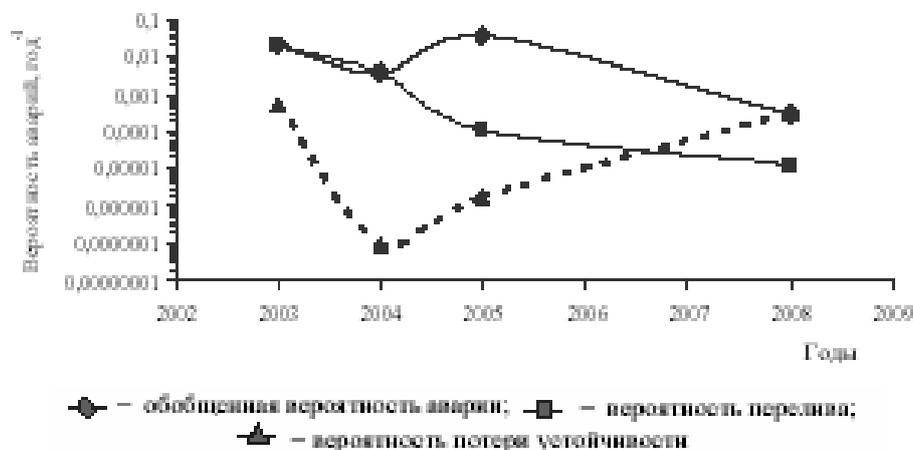


Рис. 2. Результаты расчетов вероятности аварии на строящейся бетонной плотине Бурейской ГЭС

С учетом больших сложностей в анализе риска ГТС в связи с их уникальностью, разнообразием процессов, способных привести к аварии, недостаток информации о ГТС заставляет специалистов использовать как количественные, так и качественные оценки уровня безопасности ГТС с широким применением экспертных суждений и статистических данных об авариях ГТС, имевших место в России и за рубежом. Эти причины способствуют и разнообразию приемов анализа и оценки риска аварий ГТС.

В 2000 г. в ОАО ВНИИГ разработаны «*Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений*», устанавливающие методические принципы, термины и определения анализа риска, основные требования к процедуре и оформлению результатов, а также методы анализа риска аварий ГТС различных типов и классов [24].

При разработке этих указаний использованы Бюллетени СИГБ [3, 4, 12], труды Международных конгрессов по большим плотинам [5, 25], публикации, данные анализа и оценки риска аварий российских и зарубежных ГТС.

Процедура анализа риска наиболее эффективна, если ее осуществляет группа экспертов, включающая проектировщиков ГТС, специалистов в об-

ласти гидрологии, гидротехники, устойчивости и фильтрационной прочности ГТС и представителей предприятия, эксплуатирующего данное ГТС.

Методические указания состоят из следующих разделов.

*В первом разделе* сформулированы цель, назначение и сфера применения.

*Второй раздел* содержит перечень терминов и определений в области анализа риска и обеспечения безопасности ГТС.

*В третьем разделе* изложено понятие анализа риска аварий ГТС, основанное на методе системного анализа риска, применяемой в опасных отраслях промышленности (атомной энергетике, нефтехимии) с учетом особенностей ГТС, их проектирования, строительства и эксплуатации.

*Риск* – динамическая характеристика (мера) опасности – сочетание частоты (вероятности реализации за известное время) и последствий данного опасного события. В общем понимании риск включает два элемента: ожидаемую частоту реализации данного опасного события и его последствия.

*Анализ риска* – процесс идентификации опасностей и оценка риска для отдельных людей или групп лиц, имущества и окружающей природной среды. Анализ риска заключается в использовании всей информации для идентификации опасностей и оценки риска, определенных по результатам идентификации опасных событий – аварий ГТС и связанных с ними ситуаций.

*Идентификация опасности* – процесс выявления и признания существования опасности источника потенциального ущерба людям, имуществу и окружающей природной среде.

*Вычисление риска* – определение уровня риска анализируемой опасности для здоровья человека, имущества и окружающей среды. Вычисление риска включает анализ и количественную оценку ожидаемой частоты реализации опасного события, анализ и оценка последствий опасного события и их сочетание. Кроме того, вычисление риска, как правило, содержит анализ неопределенностей в оценках частоты и последствий опасного события.

*Оценка риска* – процесс выработки решения, являются ли имеющиеся

(вычисленные) риски приемлемыми, а меры контроля за ГТС – адекватными, и, если это не так, какие дополнительные меры контроля требуются.

*Приемлемый (допустимый) риск* – риск, уровень (степень) которого допустим, обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

**Основные вопросы, на которые анализ риска должен давать ответы:**

- Что плохого может произойти? (*идентификация опасностей*)
- Как часто это может случаться? (*анализ частоты*)
- Какие будут последствия? (*анализ последствий*)

*Четвертый раздел* содержит основные требования к процедуре и подробную характеристику этапов анализа риска: организация и планирование работ; идентификация опасностей; вычисление и оценка риска; разработка рекомендаций по уменьшению риска; оформление результатов анализа риска.

*В пятом разделе* даны рекомендации по выбору методов анализа риска на этапе идентификации опасностей с учетом срока эксплуатации ГТС.

Приведены краткие характеристики следующих методов анализа риска:

1) «что будет, если ?» (What-if ?); 2) проверочный лист (Check-List); 3) анализ опасности и работоспособности ГТС (Hazard and Operability Study – HAZOP); 4) аварии ГТС и их последствия (Failure Mode and Effects – FMEA); 5) анализ аварий, их последствий и критических состояний ГТС (Failure Mode, Effects and Critical Analysis – FMECA); 6) анализ «дерева отказов» (Fault Tree Analysis – FTA); 7) анализ «дерева событий» (Event Tree Analysis – ETA).

*В шестом разделе* содержатся требования к оформлению результатов анализа риска аварий ГТС с учетом поставленных целей и задач.

*Приложения* к методическим указаниям [25] содержат:

1. Рекомендации по оценке риска аварий, эксплуатационной надежности и безопасности ГТС.
2. Алгоритм оценки риска отказов грунтовых плотин (методика R. Fell).
3. Методику количественной оценки риска аварии дамбы.

4. Алгоритм оценки вероятности отказов золошлакоотвалов.
5. Алгоритм оценки вероятности отказа механического оборудования ГТС.
6. Оперативную количественную оценку уровня безопасности ГТС.

Основные положения процедуры анализа и оценки риска распространяются на ГТС всех типов, классов и назначений, однако приведенные здесь конкретные методики представляют собой отдельные фрагменты реализации основных положений и ориентированы, в первую очередь, на грунтовые и водосбросные сооружения (Приложения 2–5). Анализ риска бетонных плотин, накопителей промышленных отходов, сооружений для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, других ГТС также может выполняться согласно данным этих указаний (Приложения 1, 3, 6), которые в дальнейшем будут дополнены методиками анализа и количественной оценки риска аварий ГТС различных типов и назначений.

Разнообразие приведенных в этих указаниях методик наглядно демонстрирует динамичность современного состояния проблемы анализа и оценки риска аварий ГТС в России и за рубежом. Сегодня, как отмечено в Бюллетене №130 СИГБ [12], невозможна и вряд ли нужна единая методика анализа риска аварий ГТС. Более продуктивной является формулировка общих принципов и положений методики анализа и оценки риска аварии ГТС. При этом конкретные методики, реализующие положения общей методики для разных типов ГТС, позволяют решать практические задачи по обеспечению их безопасности и уточнять общие положения методики в целом.

Следует отметить, что декларирование безопасности ГТС – не единственная сфера применения этих методических указаний. Весьма актуальной представляется роль этих указаний в работе по обеспечению безопасности ГТС, таких как выбор и обоснование проектных решений, оценка эффективности мероприятий по повышению безопасности ГТС, обоснование страховых тарифов и ставок и др. В этих указаниях приведен обширный, но не полный перечень практических целей анализа риска ГТС на различных

этапах их «жизненного цикла».

### **Области применения анализа риска аварий ГТС**

- *На этапе размещения и проектирования ГТС:*

1) идентификация возможных опасностей и сравнительная оценка риска аварий ГТС для различных вариантов его размещения и проектных решений при обосновании оптимального варианта;

2) обоснование приемлемости риска аварий проектируемого ГТС для персонала, населения, имущества и окружающей природной среды территории;

3) обеспечение информацией для разработки инструкций по обеспечению безопасности проектируемого ГТС, планов ликвидации аварийных ситуаций, планов действий в чрезвычайных ситуациях и т.д.;

4) обоснование страховых тарифов и ставок для заключения договора страхования гражданской ответственности объекта – владельца ГТС;

- *На этапе эксплуатации и реконструкции ГТС:*

1) уточнение информации об основных опасностях (например, при изменении социально-экономической инфраструктуры в НБ гидроузла);

2) оценка соответствия состояния; ГТС и условий его эксплуатации современным нормам и правилам;

3) определение приоритетных мер по ремонту и реконструкции ГТС, обоснование эффективности затрат на ремонт и реконструкцию;

4) уточнение страховых тарифов и ставок;

5) тщательное расследование причин аварий и неполадок ГТС;

6) разработка рекомендаций по организации безопасной эксплуатации ГТС, взаимодействию с органами надзора, лицензирования и т.д.;

7) совершенствование планов локализации аварийных ситуаций и действий в чрезвычайных ситуациях;

8) разработка антитеррористических паспортов объектов.

#### Приложение 4

Список программ, используемых для оценки безопасности ГТС на кафедре гидравлики и гидросооружений РУДН

Код и название программы	Владелец программы, ее статус	Операционная среда (пред- и постпроцессорная обработка)	Пользователи программ
Проф. пакет <i>MIKE-11</i> . Одномерные гидравлич. и гидрологич. расчеты пропускания паводков (вкл. волны прорыва) и последствия их воздействий в НБ	Компания DHI Water and Environmental (Дания), лицензионный	Windows 98/XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать исходных и расчетных данных)	Магистры, аспиранты
Проф. пакет <i>MIKE-21</i> . Двухмерные гидравлич. и гидрологич. расчеты пропускания паводков и последствий их воздействий в ВБ	Компания DHI Water and Environmental (Дания), лицензионный	Windows 98/XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать исходных и расчетных данных)	Магистры, аспиранты
Проф. пакет <i>Visual ModFlow</i> . Расчет установившейся и неустановившейся фильтрации в грунтовых основаниях и сооружениях	Компания Schlumberger (Германия), лицензионный	Windows 98/XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать исходных и расчетных данных)	Бакалавры, магистры
Проф. пакет <i>CADAM</i> . Вероятностные расчеты (метод Монте – Карло) НДС и устойчивости бетонных гравитационных плотин	Политех. университет Монреала (Канада), свободный	Windows 98/XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать всех данных)	Магистры, аспиранты
Проф. пакет <i>FLAC-5 (2D)</i> . Расчеты статич. и сейсмич. НДС, устойчивости, консолидации и фильтрации в грунтовых сооружениях	Корпорация ITASCA (США), лицензионный	Windows 98/XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать исходных и расчетных данных)	Магистры, аспиранты

## Литература

1. *Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений»* (в ред. от 21.07.97 № 117-ФЗ).
2. *Малик Л.В.* Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. – М.: Наука, 2005, 350 С.
3. *ICOLD Bulletin №125.* Dams and Floods. Guidelines and case histories. ICOLD Publ., Paris, France, – 2003.
4. *ICOLD Bulletin №99.* Dams failures. Statistical analysis. ICOLD Publ., Paris, France, – 1995.
5. *XXII International Congress on Large Dam.* Q. 87 (Flood and drought evaluation and management), Vol. 4. ICOLD Publ., Paris, France, – 2006.
6. *Нежиховский Р.А.* Наводнения на реках и озерах.– Л: Гидрометеиздат, 1988.
7. *Ляпичев П.А.* Методика регулирования стока и водохозяйственных расчетов. – М.: Стройиздат, 1972, 270 С.
8. *CADAM* – Пакет программ статических и сейсмических (в том числе вероятностных) расчетов устойчивости и прочности бетонных плотин.– Политехническая Школа Монреаля, кафедра гидросооружений и плотин), 2004.
9. *Mike-11.* Пакет программ одномерных гидравлических и гидрологических расчетов пропуска катастрофических паводков (включая волны прорыва) и последствий их воздействий в НБ. – DHI Water and Environmental (Дания), 2003.
10. *Mike-21.* Пакет программ двухмерных гидравлических и гидрологических расчетов потоков течений и паводков в водохранилищах и озерах и последствий их воздействий.– DHI Water and Environmental (Дания), 2003.
11. *Методика* оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений. ОАО «НИИЭС», – М: 2003, 85 С.
12. *ICOLD Bulletin №130.* Risk analysis for dam safety. Guidelines and management, ICOLD Publ., Paris, France. – 162 С.
13. *Risk and uncertainties in dam safety.* – Edited by J.Hardrow. CEA Group Co. – Canada, – 2005, 580 P.
14. *Пособие* к «Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений (РД 153-34.2-21.342-00)». ОАО «НИИЭС», – М.: 2004.
15. *Малаханов В.В.* Техническая диагностика грунтовых плотин. – М.: Энерго-атомиздат. 1990.
16. *СНиП 33-01-2003.* Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. Госстрой РФ, М.:–2003.
17. *СНиП 2.06.06-85.* Плотины бетонные. Госстрой СССР, М.:–1986.

18. *СНиП 2.06.05-84\**. Плотины грунтовые. Госстрой РФ, М.:–1998.
19. *СНиП 2.02.02-85*. Основания гидросооружений. Госстрой СССР, М., 1988.
20. *Ляпичев Ю.П., Пономарев Н.К.* Гидротехнические сооружения. – Учебное пособие, изд-во РУДН.–М.:– 20087, 502 С.
21. *Рекомендации по оценке надежности гидротехнических сооружений*. П-842-86/Гидропроект им. С.Я. Жука. –М.: изд-во Гидропроект, 1986.
22. *Технические указания по наблюдению за осадками бетонных гидросооружений, возводимых на нескальных грунтах*. ВИ 19-80 /Минэнерго СССР. М.: НИС Гидропроекта, 1980.
23. *Liapichev, Yu.* Problems with piping resistance of embankment dams. 19-th Inter. Congress on Large Dams, Italy, May, 1997. Quest. 73, Vol. 2, С. 28, p. 939-955.
24. *Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС (СТП ВНИИГ. 230.2.001-00)*. Под ред. Е.Н. Беллендира. Санкт-Петербург: ОАО «ВНИИГим. Б.Е. Веденеева». 2000 г.
25. *XX International Congress on Large Dam*. Q. 76 (Use of risk analysis to support dam safety decisions and management), Vol. 1. ICOLD Publ., Paris, France, – 2000.
26. *Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов / ФГУП НИИ ВОДГЕО*. М.: 2002.

## ОПИСАНИЕ КУРСА И ПРОГРАММА

---

### Программа курса

В программе курса «Безопасность гидросооружений (ГТС)» кратко рассмотрены основные аспекты этой проблемы: гидрологические (включая гидродинамические), технические (мониторинг состояния или поведения ГТС при действии статических и сейсмических воздействий, фильтрационные, гидравлические, геотехнические), а также экономико-правовые аспекты проблемы: оценка основных ущербов (экономического, социального и экологического), Федеральный закон о безопасности ГТС и страховании гражданской ответственности за причинение вреда при аварии ГТС, представление деклараций безопасности ГТС.

Рассмотрены основные причины аварий грунтовых и бетонных плотин с учетом времени их постройки в разных странах (статистические данные Международной комиссии по большим плотинам), примеры разрушений крупных плотин с большим экономическим и социальным ущербами.

Изложены основы методики оценки уровня безопасности ГТС, структура факторов их безопасности, таблицы для ранжированной оценки факторов и уровня безопасности ГТС. Методика предназначена для детерминированной оценки возможного риска аварий и состояния эксплуатируемых ГТС и применяется при составлении деклараций безопасности ГТС и при проведении их обследований.

Изложены основы методики определения критериев безопасности ГТС включая определение критериальных значений диагностических показателей их состояния, прогностических математических моделей ГТС и процедуру назначения и уточнения критериев их безопасности на этапах их проектирования и эксплуатации.

Более подробно рассмотрены особенности определения критериальных значений различных диагностических показателей состояния бетонных и грунтовых плотин: их осадки и горизонтальные перемещения, трещинообразование в водоупорных элементах грунтовых плотин, фильтрационная прочность и фильтрационные расходы грунтовой плотины и ее основания. Рассмотрены примеры определения критериальных значений диагностических показателей состояния бетонных и грунтовых плотин Воткинской ГЭС.

Изложены основы вероятностных расчетов для количественной оценки безопасности плотин (расчет степени риска аварий плотин), построения вероятностных математических моделей аварий плотин.

Рассмотрены основы методики расчета волны прорыва напорного фронта гидроузла: выбор сценария аварии плотины, метода расчета волны прорыва, исходные данные для моделирования этой волны, использование программ расчета волны прорыва и ее распространения в НБ.

Изложены основы методики ориентировочной и укрупненной оценки экономического и социально-экологического ущербов от прорыва напорного фронта гидроузла (разрушения плотин), более подробно рассмотрен пример укрупненной оценки этих ущербов.

## **Перечень тем курсовых работ по курсу «Безопасность ГТС»**

*Тема курсовой работы 1:*

«Вероятностный расчет устойчивости и напряжений в бетонной гравитационной плотине по программе *CADAM* (Канада)»

Объем работы: пояснительная записка 25-30 с., 2 чертежа (формат А3).

Цель работы: закрепление и углубление студентами теоретических знаний, полученных при изучении курса «Безопасность ГТС» (тема 7).

*Тема курсовой работы 2:*

«Расчет волны прорыва напорного фронта гидроузла по программе *MIKE-11* (Дания)»

Объем работы: пояснительная записка 20-25 с., 2 чертежа (формат А3).

Цель работы: закрепление и углубление студентами теоретических знаний, полученных при изучении курса «Безопасность ГТС» (тема 8).

## **Перечень рефератов по темам**

**12 тем рефератов (по выбору 2 темы из 12 для получения зачета):**

1. Актуальность проблемы безопасности ГТС (плотин) в России и основные цели Федерального закона о безопасности ГТС в России.

2. Учет требований охраны окружающей среды и оценка воздействий на окружающую среду (ОВОС) при проектировании и строительстве ГТС в России.

3. Нормативные (*СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования*) условия пропуска максимальных паводков, отвечающие основному и поверочному расчетным случаям.

4. Основные причины аварий грунтовых и бетонных плотин в мире.
5. Общие положения методики оценки уровня безопасности ГТС.
6. Ранжированная оценка факторов и уровня безопасности эксплуатируемых ГТС
7. Общие понятия и положения методики определения критериев безопасности ГТС.
8. Особенности определения критериальных значений диагностических показателей состояния бетонных плотин.
9. Особенности определения критериальных значений диагностических показателей состояния грунтовых плотин.
10. Общие положения методики расчета волны прорыва напорного фронта гидроузла (выбор сценария аварии плотины и метода расчета волны прорыва).
11. Основы методов ориентировочной и укрупненной оценок экономического, социального и экологического ущербов от аварии плотин.
12. Основы метода детальной оценки экономического, социального и экологического ущербов от аварии плотины.

### **Перечень вопросов к экзамену по курсу «Безопасность ГТС»**

1. В чем состоит актуальность проблемы безопасности ГТС в России?
2. Основные цели Федерального закона о безопасности ГТС в России?
3. Чем отличаются условия пропуска паводков, отвечающие основному и поверочному расчетным случаям?
4. Из каких основных разделов состоит декларация безопасности ГТС?

5. Назовите основные причины разрушений грунтовых плотин в мире?
6. Назовите основные причины разрушений бетонных плотин в мире?
7. Назовите главные общие положения методики оценки уровня безопасности ГТС?
8. Перечислите или нарисуйте структуру главных факторов безопасности ГТС?
9. В чем состоит ранжированная оценка факторов и уровня безопасности эксплуатируемых ГТС?
10. Изложите общие понятия методики определения критериев безопасности ГТС?
11. Изложите общие положения методики определения критериев безопасности ГТС?
12. На чем основано определение критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС?
13. На чем основаны прогностические математические модели ГТС?
14. В чем состоят особенности определения критериальных значений диагностических показателей состояния бетонных и грунтовых плотин?
15. Как определить критериальные значения осадок, горизонтальных перемещений и напряжений в бетонных плотинах?
16. Как определить критериальные значения горизонтальных перемещений гребня грунтовой плотины?
17. Как определить критериальные значения трещинообразования в водоупорных элементах грунтовых плотин?
18. Как определить критериальные значения положения поверхности депрессии в земляной плотине?
19. Как определить критериальные значения фильтрационной прочности и расходов фильтрации в грунтовой плотине и ее основании?

20. Каковы основные особенности определения критериальных значений диагностических показателей состояния плотин за рубежом и чем они отличаются от российских?

21. В чем заключаются основы вероятностных расчетов для количественной оценки безопасности плотин (расчет степени риска аварий плотин)?

22. В чем заключаются основы построения вероятностных математических моделей аварий плотин?

23. Приведите схему количественной оценки безопасности (надежности) грунтовой плотины.

24. Перечислите общие положения методики расчета волны прорыва напорного фронта гидроузла (выбор сценария аварии плотины и метода расчета волны прорыва).

25. В чем заключаются типичные негативные последствия от прорыва напорного фронта гидроузла и меры по уменьшению?

26. Перечислите основные исходные данные для математического моделирования волны прорыва.

27. Перечислите основы метода ориентировочной оценки экономического, социального и экологического ущербов от аварии плотин.

28. Перечислите основы метода укрупненной оценки экономического, социального и экологического ущербов от аварии плотин.

29. Перечислите основы метода детальной оценки экономического, социального и экологического ущербов от аварии плотины.

30. В чем заключаются преимущества определения значений укрупненных показателей для оценки основных видов ущербов при аварии плотин?

**Интернет-ресурсы, используемые в электронном пособии  
«Безопасность гидросооружений»**

***Сайты государственных организаций по управлению и контролю  
за гидротехническим строительством в России:***

1. законодательством России об охране окружающей среды
2. нормативными документами Ростехнадзора
3. <http://enerb.ru/main1/main.php> (ФГУ «НТЦ Энергобезопасность»)
4. <http://www.gidroogk.ru/> (ГидроОГК)
5. <http://www.ampe.ru/web/guest/russian> (ВНИИ ГОЧС)

***Сайты российских проектных и научных институтов:***

6. Проектно-изыскательский и научный институт Гидропроект (Москва) - <http://www.hydroproject.ru/>

7. Проектный институт Гидроспецпроект - <http://www.gidrospetsproekt.ru/>

8. Научно-исследовательский институт энергетических сооружений НИИЭС - <http://www.niies.ru/new/about.htm>

8. Научно-исследовательский институт гидротехники ВНИИГ им. Веденеева (Санкт-Петербург) - <http://www.vniig.ru/>

10. Институт Водных Проблем АН СССР - <http://www.iwp.ru/>

11. Институт Физики Земли РАН - <http://www.ifz.ru/>; <http://seismos-u.ifz.ru/>

12. Научный институт по водоснабжению и гидрогеологии НИИ ВОДГЕО - <http://www.watergeo.ru/>

***Сайты компаний - разработчиков программ расчетов гидросооружений, используемых в курсе:***

13. <http://www.nipinfor.ru/goods.html?id=19> (программа *Plaxis*)

14. [http://www.swstechnology.com/software\\_product.php?ID=28](http://www.swstechnology.com/software_product.php?ID=28)  
(программа *ModFlow*)

15. <http://www.itascacg.com/flac/overview.html> (программа *FLAC-5*)

16. <http://www.itascacg.com/flacslope/overview.htm> (программа *FLAC-Slope*)

17. <http://www.volgaltd.ru/software/?id=5> (программа *Mike-11*)

18. <http://www.adina.com/educ.shtml> (программа *ADINA*)

**Сайты международных организаций и журналов по гидротехническому строительству:**

19. Международная комиссия по большим плотинам (ICOLD-СИГБ) - (<http://icold-cigb.net/>; <http://icold-cigb.net/listepaismembres.aspx>)

20. Международная ассоциация по гидроэнергетике – <http://www.hydropower.org>

21. Международная ассоциация по гидравлическим исследованиям - <http://www.iahr.net/site/index.html>

22. Международное общество по геосинтетике – <http://www.geosyntheticssociety.org/indexigs.htm>

23. Международная компания по геомембранам (CARPI)- <http://www.carpitech.com/index.php>

24. Международное общество по механике грунтов и геотехнике - <http://www.issmge.org/home/>

25. Китайская гидроэнергетическая консультативная компания - <http://www.checc.cn/English/pages/Technology/Technology.jsp>

26. Международный журнал ICOLD по гидроэнергетике и плотинам - <http://www.hydropower-dams.com/>

27. Международный журнал по гидроэнергетике - <http://www.waterpowermagazine.com/home.asp>

28. Журнал по мировой гидроэнергетике (США) - <http://www.hcipub.com/hrw/index.asp>

***Сайты технических университетов мира - ведущих в гидротехнике:***

29. Институт ЮНЕСКО повышения квалификации инженеров-гидротехников (Нидерланды): <http://www.unesco-ihe.nl/>

30. Технический университет Дельфт (Нидерланды): <http://www.citg.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=4807bd3d-131f-4004-ba64-5806648683e5&lang=en>

31. Политехническая школа Лозанны (Швейцария): [http://lchwww.epfl.ch/lch/default\\_e.asp](http://lchwww.epfl.ch/lch/default_e.asp)

32. Технический университет провинции Ухань (Китай): <http://www.whu.edu.cn/en/index.html>

33. Политехнический университет Валенсии (Испания): [http://www.edams.upv.es/index\\_E.html](http://www.edams.upv.es/index_E.html)

34. Университет Каталонии (Испания): [http://www.uca.es/index\\_E.html](http://www.uca.es/index_E.html)

35. Университет Сан-Пауло (Бразилия): [http://www.usao-pa.br/index\\_E.html](http://www.usao-pa.br/index_E.html)

36. Национальный автономный университет Мехико: [http://www.unam.mx/index\\_E.html](http://www.unam.mx/index_E.html)

***Сайты нормативных пособий Корпуса военных инженеров США и Бюро Мелиорации США по гидросооружениям:***

37. <http://www.usace.army.mil/>

38. <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/>

39. <http://www.iwr.usace.army.mil/>

40. <http://www.usbr.gov/dataweb/>

***Сайты национальных комитетов ряда стран – членов Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ):***

41. Канада - <http://www.cda.ca/>

42. Бразилия - <http://www.cbdb.org.br/>

43. Венесуэла - <http://www.covenpre.org.ve/>
44. Китай - <http://www.icold-cigb.org.cn/english.asp>
45. Испания - <http://www.spancold.es/>
46. Италия - <http://www.itcold.it/index.asp>
47. Франция - <http://www.barrages-cfbr.org/index2.html>
48. Швейцария - <http://www.swissdams.ch/>