АО «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА»

На правах рукописи

ГАВРИЛЕНКО
Татьяна Валентиновна

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПЛОТИННОГО ВОДОСБРОСА

Специальность 05.23.07 — Гидротехническое и мелиоративное строительство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 1994

Работа выполнена в АО "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева".

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор С.Г. Шульман.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.Д. Гиргидов,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник С.М. Левина.

Ведущая организация - Ленгидропроект.

Защита состоится "3" марта 1995г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 144.03.01 в АО "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева". 195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева".

Автореферат разослан "26" января 1995г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Водосбросные сооружения являются неотъемлемой частью гидроузлов. Как показывает опыт эксплуатации, от надежности водосбросов нередко зависит безаварийная работа других сооружений и всего гидроузла в целом.

Проблеме надежности водосбросов всегда уделялось большое внимание. Однако несмотря на достаточно высокий уровень проводимых исследований в настоящее время отсутствует единый методологический подход к оценке надежности данных сооружений. При расчетах водосбросов в различной степени используются как детерминистический, так и вероятностный подходы. Одни критерии определяются как вероятностные показатели, а другие - как детерминированные, что затрудняет их совместное использование при анализе надежности водосбросов. Специфическим вопросом обеспечения надежности водосбросных сооружений является учет работоспособности затворов и подъемных механизмов. В рамках традиционного подхода без применения методов теории надежности такой учет не представляется возможным.

Диссертационная работа выполнена в рамках ОНТП 0.04 "Экологически чистая гидроэнергетика" и договора № 10-6193 "Оценка надежности плотины и водосбросных сооружений Буреийского гидроузла".

Цель и задачи диссертации. Основной целью работы является создание инженерной методики вероятностной оценки надежности водосбросных сооружений в рамках системного под-

хода. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- выявление и моделирование основных случайных факторов, определяющих надежность водосбросных сооружений;

- формулировка понятия надежности водосброса и критериев его отказов;

- построение деревьев отказов водосбросов;

- разработка методики расчета проектной надежности водосбросов и их конструктивных элементов с учетом комплекса случайных факторов;

- разработка методики оценки надежности плит крепления нижнего бьефа на стадии эксплуатации;

- создание пакета программ для оценки надежности водосбросов по пропускной способности.

Научная новизна работы.

1. Разработана вероятностная методика оценки проектной надежности водосбросных сооружений в рамках системного подхода.

2. Разработана вероятностная методика оценки эксплуатационной надежности плит крепления водобоя с использованием диагностической информации.

3. Разработаны процедуры расчета вероятностей отказа:

- водосброса по пропускной способности с учетом риска сверхрасчетного наводнения, отказов затворов и подъемных механизмов, конструктивного отказа водосбросных отверстий;

- водосбросной плотины на скальном основании по прочности и устойчивости;

- водосбросного тракта в случае образования недопус-

тимых объемов кавитационной эрозии;

- плит крепления водобоя;

- сооружений в нижнем бьефе, вызванного образованием ямы размыва при отбросе струи носком-трамплином.

4. Разработаны основы методики оценки долговечности и ремонтопригодности водосбросных сооружений.

Практическое значение работы. Методика может быть использована для оценки надежности водосбросных сооружений на стадии проектирования и эксплуатации при выполнении сравнительного анализа различных вариантов конструктивных решений и режимов эксплуатации.

Практическая реализация работы. Методика использовалась для оценки надежности водосбросных сооружений Бурейской ГЭС.

На защиту выносятся:

- методика оценки проектной надежности водосбросных сооружений с учетом комплекса случайных факторов;

- методика оценки надежности водосбросов по пропускной способности;

- методика вероятностной оценки надежности /прочности и устойчивости/ водосбросной плотины;

- методика вероятностной оценки кавитационной надежности водосбросного тракта;

- методика вероятностной оценки размывов в нижнем бьефе при отбросе струи носком-трамплином;

- методика вероятностной оценки надежности плит крепления водобоя на стадии проекта и эксплуатации.

Апробация работы. Материалы исследований докладывались на:

- ежегодной научно-технической конференции в Новосибирском инженерно-строительном институте /Новосибирск, 1989/;

- научно-техническом совещании "Динамика энергетических сооружений /ДЭС-91/" /Москва, 1991/;

- научно-техническом совещании "Гидравлика гидротехнических сооружений /ГТС-92/" /Санкт-Петербург, 1992/;

- секции механии жидкости Ученого Совета АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева /Санкт-Петербург, 1994/.

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы /153 наименования/ и приложения, содержит 134 страницы основного текста, 10 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации.

В первой главе рассматриваются вопросы гидравлических исследований водосбросов, обеспечения их надежности и долговечности; приводятся основные положения теории надежности сооружений и конструкций; формулируются основные задачи исследований.

В настоящее время при расчетах водосбросов применяют

самые разнообразные расчетно-теоретические, экспериментальные и комбинированные методы. Основные параметры сооружений и их конструктивных частей проверяются и уточняются на гидравлических моделях.

При анализе гидрологических факторов используются методы теории случайных величин и функций в сочетании с теорией риска. В работах П. Боккоти, Ф.В. Залесского, А.Ф. Крашникова, С.М. Крицкого, М.Ф. Менкеля, Л. Рунгрена и других надежность водосбросов определяется достоверностью гидрологического прогноза.

Надежность водосбросов зависит от количества водопропускных отверстий, гидравлического режима на водосбросном тракте, работоспособности гидромеханического оборудования. При пропуске паводков и половодий с обеспеченностью меньше расчетной более надежными представляются водосбросы с незамкнутым сечением по сравнению с водосбросами закрытого типа. Вопросами анализа надежности водосбросных сооружений с учетом вероятностного характера пропускной способности и паводочного расхода занимался Ц.Е. Мирцхулава.

Водосбросы без затворов характеризуются высокой надежностью. Если водосброс оборудован затворами, то его отказ возможен и при расчетном паводке. Методика оценки надежности водосбросных сооружений, учитывающая отказ затворов, предложена Д.В. Стефанишиным. Она позволяет использовать простые статистические модели отказов затворов. Методика оценки надежности плоских затворов с применением системного анализа разработана В.Б. Штильманом. Используя ее,

можно уточнить надежность индивидуального затвора, работающего в конкретных условиях.

Весьма сложными являются вопросы долговечности водосбросных сооружений. В настоящее время отсутствуют надежные методы прогнозирования поведения сооружения при возникновении кавитации. В этих условиях обычно придерживаются принципа предотвращения кавитации на водосбросных трактах. Некоторые предложения по кавитационной надежности элементов водосбросов в вероятностной постановке задачи даются в работах Г.А. Воробьева.

Местный размыв за водосбросными сооружениями представляет собой результат сложного взаимодействия сбросного потока и русла. Большой вклад в разработку методики вероятностной оценки размывов грунта в нижнем бьефе внес Ц.Е.Мирцхулава.

Для предотвращения размывов выполняют крепление в нижнем бьефе. Вероятностный подход к оценке устойчивости анкерной плиты выполнен Л.В. Комельковым.

Основные положения теории надежности сооружений и конструкций изложены в трудах Г. Аугусти, А. Баратта, В.В. Болотина, А.П. Кудзиса, М. Майера, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаницына, Н.С. Стрелецкого, С.А. Тимашева, Н.Ф. Хоциалова и других.

Вопросы надежности гидротехнических сооружений нашли свое отражение в работах Э.Г. Газиева, М.И. Гогоберидзе, И.Н. Иващенко, В.М. Лятхера, Д.В. Стефанишина, Г.И. Чоговадзе, С.Г. Шульмана и других.

Одним из основных понятий теории надежности является отказ, который трактуется как случайное событие. Одним из основных показателей надежности является вероятность отказа или ее дополнение к единице - вероятность безотказной работы. В теории надежности исторически сложилось два направления: статистическая и параметрическая теория надежности. Относительно новым направлением является синтез представлений и методов традиционных теорий надежности, метода предельных состояний и системного анализа.

Надежность, определяемую на стадии эксплуатации, называют эксплуатационной. Основные положения эксплуатационной надежности сложных технических объектов были сформулированы в конце 70-х начале 80-х годов. Методология эксплуатационной надежности представляет собой развитие методологии проектной надежности с включением информации об эксплуатации объекта. Среди работ, посвященных надежности объектов на стадии эксплуатации, можно отметить труды В.В. Болотина, И.А. Биргера. Применительно к гидротехническим сооружениям эти вопросы находятся в стадии постановки. Они нашли отражение в работах В.В. Малаханова, М.Г. Тягунова, Е.Ю.Шахмаевой.

Нормирование показателей надежности - один из ответственных этапов создания технических объектов. Один из способов нормирования базируется на экономических оценках, если ущерб поддается определению в стоимостном выражении. Для объектов с внеэкономической ответственностью показатель надежности может быть назначен на основе уровня, соответству-

ющего статистическим данным для рассматриваемой или смежной отрасли. На основе анализа экономического и социального риска допустимую вероятность отказа водосбросных сооружений С.М. Крицким и М.Ф. Менкелем предлагается назначать не более 10^{-4} событий в год.

В соответствии с вышесказанным были поставлены следующие основные задачи диссертации:

- на основе системного подхода разработать методику оценки проектной надежности водосбросных сооружений, позволяющую получить количественную оценку комплексного показателя надежности;

- разработать методику оценки эксплуатационной надежности крепления нижнего бьефа, базирующуюся на диагностической информации.

Во второй главе приводятся данные о разрушениях и повреждениях водосбросных сооружений, авариях плотин, вызванных отказом водосбросов, исследуются случайные факторы, формулируются понятие надежности и критерии отказа водосброса, описывается расчетная модель надежности водосброса.

Статистический анализ информации об эксплуатации гидроузлов показывает, что около 30% различных аварий гидросооружений приходится на водосбросные сооружения. Наиболее распространенными причинами повреждений водосбросов являются кавитационная и абразивная эрозия, сверхрасчетные гидродинамические нагрузки, усталостные явления, резонансные колебания. Значительное количество аварий плотин вызвано недостаточной пропускной способностью водосбросов. Большие

затруднения в эксплуатации сооружений гидроузла могут вызвать размывы, возникающие в нижнем бьефе при сбросе избыточных расходов.

При исследовании водосбросов оперируют факторами, которые по своей природе являются случайными. Прежде всего это гидрологические характеристики реки, физико-механические свойства основания и бетона, неровности на поверхности водосброса. Неопределенность связана и с турбулентностью пропускаемого потока, неизбежными погрешностями экспериментальных исследований, схематизацией явлений при расчетах. Одним из случайных факторов при оценке надежности водосбросов является работоспособность затворов и подъемных механизмов. И, наконец, источником неопределенностей могут быть сами критерии надежности /отказа/.

Надежность водосброса определим как комплексное свойство, заключающееся в его готовности обеспечить организованный /безаварийный/ сброс излишних объемов воды из верхнего в нижний бьеф в течение расчетного срока службы гидроузла. В понятие надежности водосброса включаются частные свойства: безотказность, долговечность и ремонтопригодность.

Исходя из определения надежности, отказ водосброса понимается как его неготовность выполнить требуемую функцию. Первичным отказом водосброса является отказ по пропускной способности. Его критерием принимается условие, что отм. УВБ превышает максимально допустимое значение для данного года эксплуатации гидроузла. Отказ водосброса по пропускной способности может наступить в случае сверхрасчетного навод-

нения, заклинивания затворов при маневрировании и в результате конструктивного отказа. Под конструктивным отказом понимается событие, при котором фактический расход через водосбросное отверстие при заданной степени открытия затвора меньше проектного.

Вторичный отказ водосброса – ресурсный отказ конструкции и конструктивных элементов. В качестве моделей отказа водосбросной плотины по устойчивости и прочности принимаются критериальные условия аналогичные первому и второму предельным состояниям. Критерием отказа водосбросного тракта может быть взято условие, что объем или глубина разрушений превышают предельно допустимое значение.

Опыт эксплуатации высоконапорных сооружений показывает, что при присутствии в потоке в пристенном слое 2-3% воздуха водосбросы не подвергаются сколько-нибудь заметной кавитационной эрозии. Тогда одним из возможных критериев кавитационной надежности водосброса может быть принято условие, что число кавитации больше коэффициента начала кавитационной эрозии, если при этом воздухосодержание в пристенном слое будет меньше 2%.

В качестве критерия отказа, связанного с размывами в нижнем бьефе, может быть взято условие, что глубина размыва за сооружением превысит глубину заложения фундамента. Если сопряжение бьефов происходит по типу отброшенной струи, то в качестве критерия отказа берется условие, что расстояние от носка-трамплина до края воронки размыва меньше предельно допустимого значения.

Отказ водосброса по готовности может быть вызван и тем, что за межпаводковый период времени не удалось осуществить его ремонт. Критерий такого отказа выразим условием, что период времени между паводками окажется меньше времени, требующегося на ремонт или восстановление до необходимого уровня частично или полностью утраченных при сбросе расходов технико-эксплуатационных характеристик водосброса.

В качестве основной расчетной модели надежности водосброса используется дерево отказов, которое представляет собой графическое отображение причинно-следственнных отношений между различными событиями и отказами, ведущими к аварии объекта. В качестве меры надежности принимается коэффициент готовности – вероятность выполнения водосбросом требуемых функций в течение срока службы гидроузла. Он определяется по формуле:

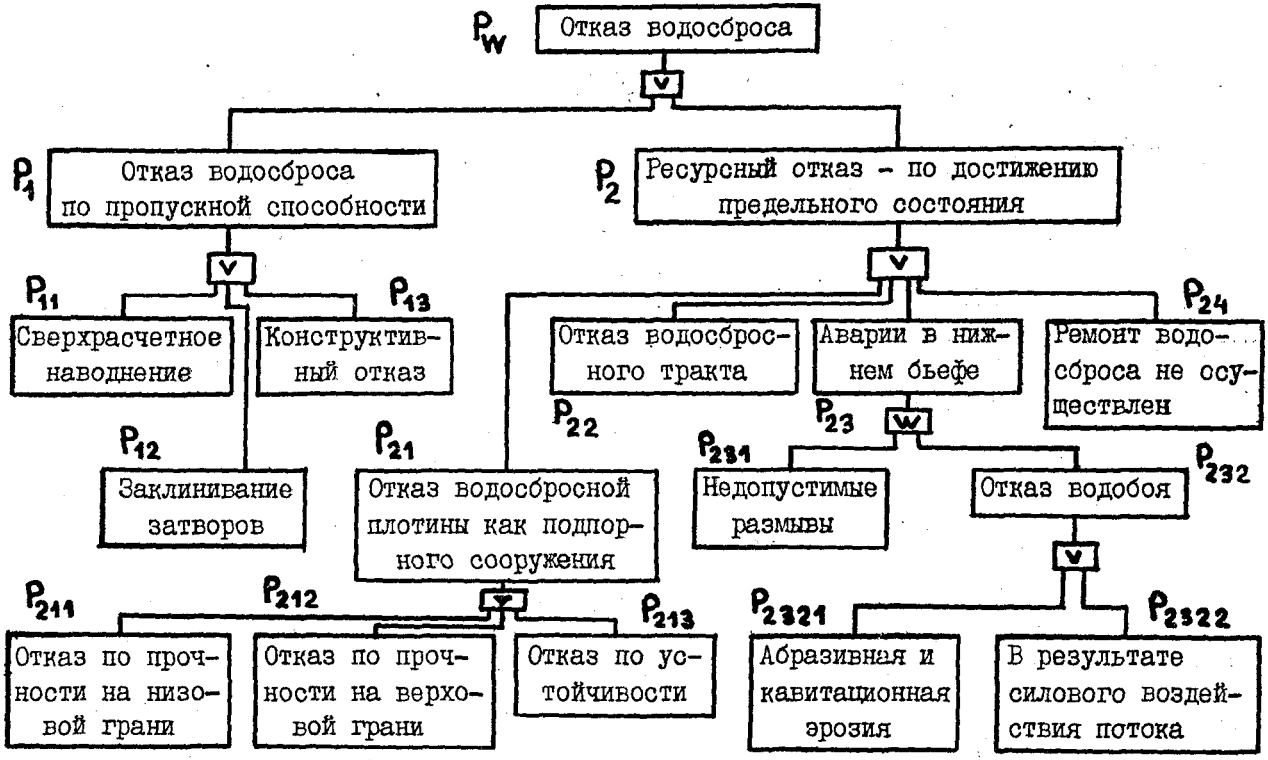
$$H_w = 1 - P_w, \qquad /1/$$

где P_w – обобщенный риск отказа водосброса по учитываемым факторам, который вычисляется с помощью дерева отказов, изображенного на рис.1.

На схеме события соединены логическими операторами "или", "или зависимое", "или исключительное", которым соответствуют расчетные формулы:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_i), \qquad /2/$$

$$P = \rho \cdot \max_i P_i + (1-\rho)\left(1 - \prod_{i=1}^{N}(1 - P_i)\right), \qquad /3/$$



Условные обозначения: ∨ – "или"; ▼ – "или зависимое"; W – "или исключительное

Рис. 1. Дерево отказов водосброса

$$P = P_1(1-P_2) + P_2(1-P_1), \qquad /4/$$

где P – вероятность наступления события-следствия, $P_1, \ldots, P_N$ – исходные события, ρ – обобщенный коэффициент вариации.

В третьей главе излагается методика оценки надежности водосбросной плотины на скальном основании, оценки вероятностей отказа водосброса по пропускной способности и отказа водосбросного тракта, вызванного кавитационной эрозией, рассматриваются показатели долговечности и ремонтопригодности.

Вероятность сверхрасчетного наводнения определится как обеспеченность расчетного максимального расхода, на пропуск которого запроектирован водосброс.

Вероятность отказа водосброса, оборудованного однотипными затворами, из-за заклинивания затворов определится по формуле:

$$P_{12} = \sum_{\ell=1}^{M} N_\ell \cdot P_z^{\ell} (1-P_z)^{M-\ell} \cdot P(q > Q_\ell), \qquad /5/$$

где M – количество водосбросных отверстий, N_ℓ – число сочетаний ℓ отказавших затворов, P_z – вероятность отказа затвора, $P(q > Q_\ell)$ – обеспеченность паводка, для пропуска которого необходимо поднять ℓ затворов.

Вероятность конструктивного отказа $P_{13} = P(q_w < Q_p)$. В предположении, что пропускная способность водосброса подчиняется нормальному закону,

$$P(q_w < Q_p) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{Q_p - M(q_w)}{\sqrt{D(q_w)}}\right], \qquad /6/$$

где q_w, Q_p – соответственно фактический расход через водосбросное отверстие и расчетный максимальный расход сброса. $\Phi[\cdot]$ – табулированная функция Лапласа, $M(q_w), D(q_w)$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия q_w.

При оценке надежности гравитационной плотины на скальном основании использовались модели отказа, аналогичные нормативным предельным состояниям. В качестве случайных величин рассматривались: прочность бетона на сжатие, прочностные характеристики скального основания, которые моделировались согласно нормальному закону распределения, и противодавление на подошву плотины, для которого использовался экспоненциальный закон в соответствии с моделью работоспособности дренажа. Для численной реализации интервал изменения значений эпюры противодавления разбивался на классы. Тогда вероятность отказа плотины

$$P_{21} = \sum_{j=1}^{n} P(F_H > R_H \mid W_{j-1} < W_\varphi \leq W_j) \cdot P(W_{j-1} < W_\varphi \leq W_j), \qquad /7/$$

где $P(F_H > R_H \mid W_{j-1} < W_\varphi \leq W_j)$ – условная вероятность отказа плотины при значениях противодавления из j -го класса, определяемая по формуле /3/, $P(W_{j-1} < W_\varphi \leq W_j) = F(W_j) - F(W_{j-1})$, $F(W_j)$ – функция распределения противодавления, F_H, R_H – обобщенное силовое воздействие и несущая способность плотины соответственно.

Вероятность отказа плотины в результате нарушения

прочности по низовой грани

$$P_{211} = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{|\sigma_3| - M(R_в)}{\sqrt{D(R_в)}}\right], \qquad /8/$$

по верховой грани –

$$P_{212} = \begin{cases} 0, \text{ при } & в_р \leq в_{пр} \\ 1, \text{ при } & в_р > в_{пр} \end{cases}. \qquad /9/$$

Вероятность отказа плотины в результате нарушения устойчивости

$$P_{213} = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{N - M(F_{уд})}{\sqrt{D(F_{уд})}}\right]. \qquad /10/$$

Здесь приняты обозначения: σ_3 – главное сжимающее напряжение, $в_р, в_{пр}$ – глубина растянутой зоны и ее предельное значение соответственно, $R_в$ – прочность бетона на сжатие, $N, F_{уд}$ – сдвигающая и удерживающая сила по контактному сечению соответственно, $M(\cdot), D(\cdot)$ – математическое ожидание и дисперсия соответствующих случайных величин.

В качестве возбудителя кавитации рассматривается выступ навстречу потоку. Случайными величинами считаются высота неровности, угол наклона лобовой грани и давление потока. Их распределение моделируется согласно нормальному закону. Используя метод линеаризации применительно к расчетным формулам для определения числа кавитации K и критического числа кавитации $K_{кр}$, и, учитывая, что $K_{эр} = 0{,}85 K_{кр}$, получим значения математических ожиданий и дисперсий K и $K_{эр}$: $M(K), M(K_{эр}), D(K), D(K_{эр})$. Тогда вероятность отказа водосброса, вызванного кавитационной эрозией, вычислится по формуле:

$$P_{22} = P(K < K_{эр} \mid c_a < 2\%) \cdot P(c_a < 2\%), \qquad /11/$$

где

$$P(K < K_{эр} \mid c_a < 2\%) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{M(K_{эр}) - M(K)}{\sqrt{D(K_{эр}) - D(K)}}\right], \qquad /12/$$

В условиях ограниченной информации о статистических характеристиках воздухосодержания c_a допустимо оценить вероятность $P(c_a < 2\%)$ по формуле:

$$P(c_a < 2\%) = 1 - \frac{M(c_a) - 2}{\sup c_a}, \qquad /13/$$

где $M(c_a)$, $\sup c_a$ – математическое ожидание и верхняя граница возможных значений воздухосодержания.

В качестве показателя долговечности принята средняя наработка до ресурсного отказа:

$$\overline{T} = \frac{1}{N_p \cdot N_K} \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_K} \overline{\tau}_{ji}, \qquad /14/$$

где N_p – число режимов работы водосброса, N_K – количество возбудителей кавитации, $\overline{\tau}_{ji}$ – среднее время достижения предельного состояния для j-го режима в окрестности i-го возбудителя кавитации. Если заданы предельные объемы разрушений, то $\overline{\tau}_{ji}$ складывается из инкубационного периода и времени работы водосброса в режиме кавитационной эрозии.

Время восстановления работоспособного состояния водосброса и допустимое время на его ремонт являются случайными величинами, для которых статистические данные отсутствуют. Однако всегда можно оценить их минимальные и максималь-

ные значения. В этом случае изменчивость случайных величин удобно моделировать равномерным законом распределения. Тогда вероятность отказа водосброса по неготовности /ремонт не осуществлен/

$$P_{24} = 1 - \frac{(T_{пр}^{макс} - T_{р}^{макс}) + (T_{пр}^{мин} - T_{р}^{мин})}{T_{пр}^{макс}}, \qquad /15/$$

где $T_{пр}^{макс}$, $T_{пр}^{мин}$, $T_{р}^{макс}$, $T_{р}^{мин}$ – максимальные и минимальные значения допустимого времени на ремонт и времени восстановления работоспособного состояния.

<u>В четвертой главе</u> рассматриваются вопросы надежности водосброса, связанные с образованием ямы размыва за носком-трамплином и разрушением крепления водобоя; приводятся методы оценки надежности плит крепления на стадии эксплуатации.

Расстояние от носка-трамплина до края воронки L представляется функцией следующих случайных величин: угла схода струи с носка-трамплина, высоты носка-трамплина, угла наклона верхового откоса ямы размыва, крупности скальных отдельностей. При этом используется гипотеза нормального распределения расчетных параметров. Вероятность отказа, вызванного размывами, определится по формуле: $P_{231} = P(L < L_{кр})$, где

$$P(L < L_{кр}) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{L_{кр} - M(L)}{\sqrt{D(L)}}\right], \qquad /16/$$

$L_{кр}$ – критическое значение L. При определении математического ожидания и дисперсии расстояния от носка-трамплина до края воронки $M(L)$ и $D(L)$ используются из-

вестные эмпирические формулы и экспериментальные данные.

Крепление водобоя представляет собой систему, состоящую из N взаимозависимых элементов /плит/. Вероятность его отказа вычисляется по формуле /3/. Основными причинами отказа плит являются абразивная и кавитационная эрозия, нарушение прочности и устойчивости. Вероятность отказа плиты, вызванного эрозией,

$$P_{2321} = P(K < K_{эр}) + P(S_A) - P(K < K_{эр} | z_н = z_A) \cdot P(S_A). \quad /17/$$

Вероятность возникновения кавитационной эрозии $P(K < K_{эр})$ вычисляется аналогично вероятности P_{22} при проектных параметрах неровностей. Условная вероятность возникновения кавитационной эрозии $P(K < K_{эр} | z_н = z_A)$ вычисляется для шероховатостей, образованных абразивным истиранием. Вероятность возникновения абразивной эрозии $P(S_A)$ оценивается как вероятность появления плановых водоворотов и сбойных течений, определяемая схемами открытий отверстий водосброса.

Методика вычисления вероятности отказа плит по прочности и устойчивости разработана применительно к конструкции крепления, выполненного в виде бетонных блоков, разделенных неуплотненными температурно-усадочными швами. Устойчивость блоков обеспечивается сцеплением бетона со скалой.

В этом случае вероятность отказа плиты /блока/ $P_{2322} = P(\sigma > \sigma_{кр})$, где σ – напряжение в контактном сечении, $\sigma_{кр}$ – его критическое значение. Для расчетов напряжений использовалась квазистатическая модель, разработанная С.М. Мищенко, в которой случайными величина-

ми считались давление турбулентного потока и ширина межблочных швов. Они моделировались нормальным законом распределения. Используя метод линеаризации, а также результаты экспериментальных и натурных исследований, получим математические ожидания и дисперсии σ и $\sigma_{кр}$: $M(\sigma), M(\sigma_{кр})$, $D(\sigma), D(\sigma_{кр})$. Тогда

$$P(\sigma > \sigma_{кр}) = 0{,}5 - \Phi\left[\frac{M(\sigma) - M(\sigma_{кр})}{\sqrt{D(\sigma) + D(\sigma_{кр})}}\right], \qquad /18/$$

При решении задачи оценки эксплуатационной надежности крепления вводятся критерии для максимально допустимых значений диагностических параметров, описывающих дискретно состояние сооружения комплексом простых признаков $K = (k_1, k_2, \ldots, k_n)$, имеющих два разряда:

$$k_j = \begin{cases} 0, \text{ при } & x_j \leq X_j \\ 1, \text{ при } & x_j > X_j \end{cases}, \qquad /19/$$

где $j = 1, \ldots, n$; k_j – признак, 0 и 1 – его разряды, x_j – значение параметра, X_j – предельное значение параметра, n – количество признаков.

Фактически наблюдаемое состояние крепления соответствует определенной реализации комплекса признаков, обозначенной верхним индексом ж. Пусть крепление находится в одном из случайных состояний D_1 /работоспособное/ или D_2 /неработоспособное/. Объект с комплексом признаков K^* относится к диагнозу D_i /i=1 или i=2/, если

$$P(D_i | K^*) = max(P(D_1 | K^*), P(D_2 | K^*)), \qquad /20/$$

где $P(\mathcal{D}_i|K^*)$ – вероятность диагноза $\mathcal{D}_i$ после того как стали известны результаты обследования по комплексу признаков K. Она определится по правилу:

$$P(\mathcal{D}_j|K^*) = \frac{P(\mathcal{D}_j)\cdot P(K^*|\mathcal{D}_j)}{P(\mathcal{D}_1)\cdot P(K^*|\mathcal{D}_1) + P(\mathcal{D}_2)\cdot P(K^*|\mathcal{D}_2)}. \qquad /21/$$

Здесь обозначено: $P(\mathcal{D}_j)$ – проектная вероятность диагноза $\mathcal{D}_j$, $P(K^*|\mathcal{D}_j)$ – вероятность появления реализаций признаков K^* в случае диагноза $\mathcal{D}_j$, определяемая по натурным данным.

Для вышеуказанной конструкции крепления неработоспособным принималось состояние, когда сцепление блоков с основанием нарушено. Тогда $P(\mathcal{D}_1) = P(\sigma < \sigma_{кр})$; $P(\mathcal{D}_2) = 1 - P(\mathcal{D}_1)$. В качестве диагностических параметров рассматривались вертикальные и горизонтальные перемещения верхней грани блока.

<u>В пятой главе</u> излагаются примеры расчета по разработанной методике. В первом примере выполнена оценка проектной надежности поверхностного водосброса Бурейской ГЭС по полной методике. Во втором примере проиллюстрировано применение методики для оценки эксплуатационной надежности крепления. При этом использовались результаты натурных исследований водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС.

<u>В приложении</u> приведены сведения о повреждениях водосбросов и авариях на гидроузлах, вызванных отказами водосбросных сооружений.

<u>В заключении</u> сделаны основные выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлены основные случайные факторы и параметры, оказывающие наибольшее влияние на надежность водосбросов, в том числе: гидрологические характеристики реки, работоспособность затворов и подъемных механизмов, кавитационная и абразивная эрозия, сверхрасчетные гидродинамические нагрузки, размывы, возникающие в нижнем бьефе при сбросе расходов.

2. Сформулировано понятие надежности водосброса как комплексное свойство, заключающееся в его готовности обеспечивать безаварийный сброс воды из верхнего в нижний бьеф в течение расчетного срока службы гидроузла.

3. Предложен в качестве показателя надежности водосброса коэффициент готовности - вероятность выполнения водосбросом заданных функций в течение расчетного периода времени. Он используется на стадии проектирования при сопоставлении различных вариантов конструктивных решений водосбросов и режимов эксплуатации по надежности.

4. Построено дерево отказов водосброса, предназначенное для вычисления обобщенного риска отказа водосброса по учитываемым факторам.

5. Разработана методика оценки вероятности отказа водосброса по пропускной способности с учетом риска сверхрасчетного наводнения, отказа затворов и подъемных механизмов, конструктивного отказа водосбросных отверстий. Она реализована в виде пакета программ GRMAIN для ЭВМ типа ЕС.

6. Выполнена вероятностная оценка надежности водосбросной плотины на скальном основании по прочности и устойчивос-

ти. При этом использовались модели отказа аналогичные нормативным предельным состояниям. В качестве случайных величин рассматривались прочность бетона на сжатие, характеристики скального основания и противодавление.

7. Реализован вероятностный подход к определению кавитационной надежности водосбросного тракта, который базируется на условии недопущения кавитационной эрозии. В качестве возбудителя кавитации рассматривался выступ навстречу потоку. Его высота и угол наклона грани считались случайными величинами.

8. Предложены в качестве показателя долговечности водосбросных сооружений средняя наработка до ресурсного отказа, а ремонтопригодности - вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния водосброса не превысит допустимого значения, например, периода между паводками.

9. Решена задача вероятностной оценки размывов при сопряжении бьефов отбросом струи, в которой случайными факторами считались угол схода струи с носка-трамплина, высота носка-трамплина, крупность скальных отдельностей, угол наклона верхового откоса ямы размыва.

10. Реализован вероятностный подход к расчетам надежности крепления водобоя, рассматриваемого как система взаимозависимых элементов. Основными причинами отказа плит крепления считались абразивная и кавитационная эрозия, нарушение прочности и устойчивости.

11. Выполнена вероятностная оценка эксплуатационной надежности плит крепления водобоя с использованием диагности-

ческой информации. Для плит, имеющих сцепление с основанием, работоспособным считалось состояние, когда сцепление обеспечено, и неработоспособным, когда оно нарушено. В качестве диагностических параметров рассматривались вертикальные и горизонтальные перемещения верхней грани плит.

12. Проведены расчеты проектной надежности поверхностного водосброса Бурейской ГЭС для двух режимов эксплуатации /пропуск поверочного расхода и работа сооружения по схеме свободного истечения через водослив/. Обобщенный риск отказа водосброса в случае пропуска поверочного расхода составил $1{,}14 \cdot 10^{-4}$, при этом основной вклад в показатель внесен вероятностью отказа по пропускной способности. Для второго режима обобщенный риск отказа водосброса составил $4{,}67 \cdot 10^{-3}$. Он связан с возможностью кавитационной эрозии.

13. Выполнена оценка эксплуатационной надежности плит крепления в методическом примере с использованием результатов натурных исследований водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Некоторые предложения по количественной оценке надежности водосбросов// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. - 1991. - Т.225. - С.29-33 /соавтор Д.В.Стефанишин/.

2. К оценке спектра гидродинамического воздействия// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. - 1991. - Т.225. - С.143-145 /соавтор С.П.Фетисов/.

3. Натурные исследования динамики массивных бетонных

и железобетонных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС// Гидротехническое строительство. – 1992. – № 1. – С.5–10 /соавторы В.В.Буханов, В.А.Уляшинский, В.Н.Шабанов/.

4. Некоторые проблемы обеспечения надежности и безопасности водосбросных сооружений гидроузлов// Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Гидравлика гидротехнических сооружений. – СПб: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – 1993. – С.214–217 /соавтор Д.В.Стефанишин/.

5. Анализ надежности водосброса на основе системного подхода// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – 1993. – Т.227. – С.84–90.

6. К оценке эксплуатационной надежности бетонного крепления водобоя на основе диагностической информации// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – 1993. – Т.227. – С.90–94.

Тип. АО „ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева". Заказ 646. Т.100. 26.12.94