

ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидротехнические сооружения (ГТС) и, в частности, бетонные плотины являются сложными природно-техническими объектами. Их основными особенностями, по сравнению с другими инженерными сооружениями и конструкциями, являются, во-первых, чрезвычайно высокая экономическая, экологическая и социальная ответственность, а, во-вторых, их уникальность, связанная с особенностями природных (гидрологических, геологических, климатических, топографических и др.), экономических, водохозяйственных и прочих условий, для которых проектируется, в которых возводится и эксплуатируется каждое конкретное сооружение.

К настоящему времени в Российской Федерации возведено большое количество высоконапорных гидротехнических сооружений. Одной из важнейших задач, стоящих в процессе эксплуатации, является обеспечение их надежной и безопасной работы. В то же время большинство этих сооружений эксплуатируется уже длительное время, что повышает вероятность возникновения и развития различных, часто негативных процессов, не рассматривавшихся при проектировании. В связи с этим, в последние годы одной из важнейших решаемых задач является оценка состояния длительно эксплуатируемых объектов и прогноз их поведения в дальнейшем.

Обеспечение условий надежной и безопасной работы сооружений является неотъемлемым условием эксплуатации любого энергетического объекта и, конечно, в первую очередь высоконапорных плотин. Определение объективных критериев безопасной эксплуатации является сложной научно-технической проблемой.

В соответствии с положениями ГОСТ 27.002-89 [99] и ГОСТ Р 27.002-2009 [100] под *надежностью* технических систем понимается их свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность вы-

полнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Одним из основополагающих понятий теории надежности является *отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Надежность, как неотъемлемое свойство сооружения, закладывается на стадии проектирования, обеспечивается при строительстве и поддерживается в процессе эксплуатации сооружения. В связи с этим принято говорить о надежности, определяемой на стадии проектирования, как о *проектной надежности*, а на стадии эксплуатации как об *эксплуатационной надежности*.

В случае ГТС и, в частности, плотин под надежностью можно понимать комплексное свойство, заключающееся в способности объекта выполнять функции подпорного сооружения при сохранении заданных эксплуатационных и конструктивных показателей в течение срока службы [296].

Под *безопасностью* обычно понимают надежность объекта по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды. Ее основными элементами является способность сооружения сохранять надежность при нештатных и экстраординарных воздействиях, различных нарушениях, ошибках обслуживающего персонала и т.п.

В связи с тем, что гравитационные бетонные плотины на скальных основаниях являются уникальными объектами, возводимыми в различных природно-климатических, геологических и других условиях, а также выполняющими различные народно-хозяйственные функции, их исследования обуславливаются существенной неполнотой исходной информации о параметрах нагрузок и воздействий, характеристик природных условий, свойств материалов плотины и основания, значительными допущениями и упрощениями при создании расчетных схем и другими факторами. Поэтому отказ сооружения или его отдельных подсистем может рассматриваться как случайное событие, а одним из основных показателей надежности сооружения будет служить вероятность его безотказной работы в течение расчетного срока службы.

Существует значительное количество методов оценки надежности сооружений. Однако, что касается бетонных гравитаци-

онных плотин на скальных основаниях, на настоящий момент не имеется единой методики оценки надежности этих сооружений на этапах проектирования, строительства и эксплуатации.

Действующие нормы предлагают рассчитывать сооружения и основания в соответствии с принципом недопущения предельных состояний в детерминистской постановке. Однако, в связи с тем, что рассматриваемые объекты являются весьма сложными природно-техническими системами, для их расчетов, с одной стороны, используются весьма сложные вычислительные методы и математические модели, а, с другой, – для учета неопределенных факторов, оказывающих большое влияние на работу сооружений, вводятся коэффициенты безопасности или нормативные коэффициенты запаса, назначаемые в соответствии с имеющимся опытом без строгого обоснования их применимости. В связи с этим получил достаточно широкое распространение вероятностно-статистический подход, позволяющий, в отличие от детерминистского, получить количественные оценки надежности этих сооружений.

Вместе с тем, для таких сложных и уникальных объектов получить во всей полноте информацию об их реальном эксплуатационном состоянии, а также о параметрах внешних воздействий и характеристиках материалов, необходимую для оценки надежности вероятностными методами, зачастую не представляется возможным. Это обуславливает необходимость, с одной стороны, использовать другие методы оценки надежности в условиях неопределенности, а, с другой стороны, уточнять параметры математических моделей, применяемых для расчетов сооружений на надежность с применением методов параметрической идентификации. Поэтому разработка методик оценки надежности бетонных гравитационных плотин на скальных основаниях, использующих как современные методы учета неопределенности исходной информации, так и методы идентификации математических моделей сооружений при действии нагрузок основного сочетания с применением данных натурных наблюдений эксплуатационного периода, является важной и актуальной задачей.

Существует значительное количество исследований, посвященных оценке надежности ГТС и, в том числе, гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях. Они посвящены раз-

личным аспектам оценки надежности сооружений в детерминистской и вероятностной постановках на разных стадиях их жизненного цикла.

Однако, как уже отмечалось, такие методы не могут быть использованы во всех случаях, так как для уникальных объектов, каковыми являются данные сооружения, в реальных условиях эксплуатации не всегда может быть получена достаточно полная статистическая информация о базовых случайных величинах, входящих в математические модели предельных состояний, с целью установления законов распределения и параметров этих распределений. Это обуславливает применение к оценке надежности методов, основанных на теории возможностей и дающих интервальную оценку надежности.

Существенной особенностью природно-технической системы *сооружение – основание – водохранилище* является значительно различающееся информационное обеспечение входящих в нее подсистем, которые характеризуются различной информационной обеспеченностью: наибольшей – у гидромеханического оборудования, меньшей – у сооружения, еще меньшей – у основания и т.д. Это требует применения методов структурной теории надежности с возможными различными моделями неопределенности на уровне подсистем, то есть применения, например, для сооружения – детерминированного или вероятностного подходов к оценке надежности, для основания – вероятностного или возможностного и т.д. с целью наиболее полного и рационального использования имеющейся информации и максимального сужения интервала оценки надежности системы в целом.

Эти методы уже использовались для обоснования надежности элементов строительных конструкций: балок, плит, сварных соединений и т.п. В настоящее время предложено большое количество комбинированных подходов для решения разнообразных технических и экономических задач. Однако, для оценки надежности системы *гравитационная бетонная плотина – скальное основание* эти методы пока не использовались.

Кроме того, применяющиеся обычно методы расчетов сооружений на надежность до последнего времени оперировали расчетными моделями, параметры которых принимались исходя из

априорной (в основном – проектной) информации. Методы идентификации параметров математических моделей применялись в основном для решения ряда задач, далеких от проблем исследования надежности гидросооружений. В последнее время методы идентификации применялись к решению отдельных задач в исследованиях ГТС, однако единая методика оценки надежности систем *гравитационная бетонная плотина – скальное основание* на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации, основанная на применении идентифицированных расчетных моделей, до настоящего времени не была выработана.

Основное содержание представленной книги посвящено методологии количественной оценки надежности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях, основанной на системном подходе, с применением идентифицированных расчетных моделей, а также разработке методов идентификации параметров таких моделей на основе данных натурных наблюдений и оценке на базе разработанных методик параметров состояния и показателей надежности сооружений на различных этапах их жизненного цикла.

Книга состоит из 13 глав.

Первая глава содержит краткий очерк истории гидротехнического строительства. В ней приводятся результаты анализа данных об авариях и повреждениях бетонных плотин на скальных основаниях. Отмечено, что подавляющее количество серьезных инцидентов произошло на достаточно ранних этапах развития гидротехники. Они в наибольшей степени связаны с ошибками в проектировании сооружений и технологии их возведения ввиду недостаточности инженерных и научных знаний о таких объектах, отсутствия опыта их строительства и эксплуатации.

Вторая глава посвящена классификации бетонных плотин. Рассмотрены различные типы сооружений в зависимости от природных условий в местах их возведения и, в частности, типа основания.

В *третьей главе* рассмотрен комплекс методов, применяющихся для математического моделирования бетонных гидротехнических сооружений на скальных основаниях. Приведены основные математические модели, применяющиеся в расчетных исследованиях ГТС и их оснований. Кроме того, в главе рассмотрены требо-

вания к организации и основные принципы функционирования одного из основных средств технической диагностики эксплуатационного состояния ГТС – системы выполняющихся на них натуральных наблюдений. Также рассмотрен ряд особенностей эксплуатационного режима ГТС, обусловленных различными факторами, включая длительную эксплуатацию сооружений и их работу в северной природно-климатической зоне. Приводится описание ряда технических решений, направленных на выполнение мероприятий по ремонту бетонных плотин и укреплению их оснований.

Четвертая глава содержит обзор методов оценки надежности сооружений. Вместе с тем указывается, что для бетонных гравитационных плотин на скальных основаниях на настоящий момент не существует единой методики оценки надежности этих сооружений на этапах проектирования, строительства и эксплуатации. В главе делается вывод, что для исследований крупных гидротехнических сооружений и, в частности, гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях, которые являются сложными и уникальными природно-техническими системами, на всех этапах жизненного цикла требуется применять комплексный подход, основанный на использовании различных методов и их комбинаций. Их выбор зависит от характера исследуемого объекта, целей и задач исследований и характера исходной информации об исследуемом объекте.

В *пятой главе* приводятся результаты применения разработанных методик к оценке надежности гравитационных бетонных плотин на стадии возведения. На примере плотины Бурейской ГЭС рассмотрено влияние на параметры НДС гравитационной бетонной плотины последовательности возведения ее конструктивных элементов – различных вариантов конфигурации пускового профиля, обусловленных столбчатой разрезкой и степенью омоноличенности строительных швов. Для решения данной задачи применена методика оценки надежности плотины с помощью регрессионных моделей, построенных на основе метода планирования вычислительного эксперимента. На основе применения методики идентификации параметров температурного режима бетона секции плотины с помощью промежуточных регрессионных моделей исследованы вопросы влияния на температурный режим бетонных

массивов параметров технологии возведения сооружений: температуры бетонной смеси, удельного тепловыделения, расхода цемента, параметров трубного охлаждения и теплоизоляции. На основании результатов проведенных исследований получена оценка надежности пускового профиля строящейся гравитационной бетонной плотины на скальном основании, даны оценка параметров НДС секции плотины при различных вариантах последовательности возведения и рекомендации по омоноличиванию швов плотины. Кроме того, предложенная методика решения обратных задач теплопроводности позволила идентифицировать теплофизические характеристики бетона в наращиваемых бетонных массивах, возводимых в суровых климатических условиях. Расчеты по идентифицированным моделям позволяют осуществлять выбор эффективной технологии бетонирования с целью недопущения температурного трещинообразования в процессе возведения бетонных плотин.

Шестая глава посвящена вопросам исследований параметров расчетных моделей фильтрации в скальных основаниях бетонных плотин. В главе приводятся результаты применения методики параметрической идентификации расчетных моделей фильтрации для оценки одной из эксплуатационных нагрузок основного сочетания – фильтрационного противодействия по контакту гравитационной бетонной плотины и скального основания. Оно обладает наибольшей степенью неопределенности среди всех нагрузок и воздействий в силу невозможности прямого измерения. Показана возможность уточнения расчетных моделей эксплуатационного фильтрационного режима в системе *гравитационная бетонная плотина – скальное основание* по данным натурных наблюдений. Продемонстрировано применение данных методов к решению задач идентификации параметров фильтрационного режима в приконтактной зоне гравитационной бетонной плотины Братской ГЭС на р. Ангара в детерминистской и вероятностной постановках.

В *седьмой главе* рассмотрена методика оценки надежности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях с позиций структурной теории надежности. При этом используется метод построения деревьев отказов. Оценка надежности осуществляется в детерминистской и вероятностной постановках. Поскольку

для применения вероятностных методов имеются некоторые ограничения (в том числе, отраженные в действующих нормах), связанные, в частности, с такими аспектами, как малопредставительность выборок и значительные разбросы исходных данных, в этих случаях их применение становится некорректным и используются интервальные оценки. В главе приведен пример такой оценки, основанной на положениях теории возможностей. Посредством данной методики получены оценки уровня безопасности для возможных сценариев развития аварий применительно к гравитационной бетонной плотине Красноярской ГЭС. Кроме того, на примере водосливной секции бетонной плотины Бурейской ГЭС рассмотрена задача оценки надежности водосливной секции бетонной плотины на скальном основании по условиям прочности и устойчивости. Оценка проводится в рамках структурной теории надежности в вероятностной постановке, при этом использовались модели отказов, обусловленные необходимостью соблюдения принципа недопущения предельных состояний, установленного в действующих нормативных документах.

Восьмая глава посвящена исследованиям, связанным с влиянием суровых климатических условий на эксплуатационную надежность гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях. Рассмотрены особенности построения расчетных моделей сооружений, решаются задачи идентификации их параметров на основе данных натурных наблюдений. Идентификация параметров моделей осуществлялась с использованием двух расчетных методов решения обратной задачи – метода условного антиградиента (градиентного метода I порядка) и метода функций чувствительности. Приведено сопоставление результатов, полученных разными методами. В главе приводятся результаты оценки надежности бетонной плотины по условию устойчивости на сдвиг по контакту со скальным основанием с учетом сезонного характера работы сооружения в суровых климатических условиях. На примере одной из секций бетонной плотины Братской ГЭС продемонстрированы результаты оценки надежности сооружения в рамках нормативного подхода посредством трех различных методов: детерминистского; вероятностного и возможностного, учитывающего неполноту исходной информации и дающего интервальную оценку вероятности отказа.

Показано, что переход от детерминированных величин воздействий на сооружение и характеристик расчетных моделей к случайным и далее – к нечетким позволяет произвести оценку надежности в условиях большей неопределенности исходных данных.

Также приводятся основные положения методики упрощенного учета случайного характера ледовой нагрузки в задачах по оценке надежности бетонных плотин.

В *девятой главе* рассмотрены вопросы оценки надежности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях в условиях длительной эксплуатации. Особенности их работы характеризуются тем, что закладная тензометрическая КИА системы эксплуатационного приборного контроля за состоянием сооружений, обеспечивавшая контроль параметров НДС, деградировала и в ряде случаев частично или полностью вышла из строя. Вследствие этого для оценки таких параметров разработана и реализована методика использования результатов косвенных наблюдений, основанная на контроле параметров НДС при помощи расчетных моделей, параметры которых идентифицированы с использованием данных натурных наблюдений.

В *главе* приводятся результаты оценки параметров НДС системы *бетонная плотина – скальное основание* Красноярской ГЭС с помощью расчетных моделей, характеристики которых идентифицированы по данным наблюдений за горизонтальными перемещениями контрольных секций плотины. Приведены результаты исследований с помощью откалиброванных моделей МКЭ параметров напряженного состояния плотины, а также результаты решения задачи оценки надежности бетонной плотины по условию непревышения величинами горизонтальных смещений гребня контрольных секций вдоль потока их критериальных значений K_1 с помощью откалиброванных регрессионных моделей.

В *десятой главе* даются оценки влияния тектонических проявлений на состояние бетонных плотин на скальных основаниях. Рассмотрены особенности такого влияния на современное состояние ряда бетонных плотин России и бывшего СССР. Выделены основные факторы, оказывающие влияние на состояние ГЭС вследствие развития геодинамических процессов в основании, а также намечены основные направления работ по исследованию

влияния геотектонических явлений на состояние бетонных плотин Российской Федерации.

Одиннадцатая глава посвящена рассмотрению вопросов учета случайных и неопределенных факторов в задачах сейсмостойкости сооружений, взаимодействующих с основанием и водной средой. Получены вероятностные и интервальные оценки гидродинамического давления на плотину (плоская задача) при гармонических и нестационарных колебаниях. Рассмотрены задачи об учете влияния наносов при решении задач о сейсмическом давлении воды на напорную грань плотин, а также об учете поглощения энергии дном водохранилища при определении сейсмических нагрузок на плотину по линейно-спектральной теории сейсмостойкости.

В *двенадцатой главе* описаны основные положения методики проверки сейсмостойкости плотины и системы *плотина – основание* в рамках динамической теории, позволяющей учитывать влияние любого количества неопределенных факторов. Методика основана на использовании в качестве окончательного критерия вероятности годового отказа с учетом вероятности возникновения землетрясения заданной интенсивности в течение нормативного срока службы сооружения. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что обоснование надежности сооружения и основания при сейсмическом воздействии существенно зависит от объема и характера исходной информации о параметрах системы и нагрузки.

В заключительной, *тринадцатой главе* рассмотрены некоторые вопросы оценки долговечности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях. Приведены результаты оценки долговечности по признаку прочности при учете стохастической природы процесса заиления (на примере Тобарской ГЭС, Грузия) и по признаку предельной высоты слоя наносов (на примере Твишской ГЭС, Грузия) на основе метода, использующего кумулятивные модели отказа. В главе также приведены результаты оценки долговечности гравитационной плотины с учетом особенностей деформирования скального основания в месте его контакта с носком плотины под действием колебаний гидростатической нагрузки.

Как отмечено выше, книга посвящена в основном изучению проблем оценки состояния и показателей надежности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях. В то же время, в ряде глав, в целях сохранения логического единства изложения, рассматриваются бетонные плотины других типов (арочные, арочно-гравитационные, массивно-контрфорсные и т.д.).

Остался за пределами изложения или был только кратко упомянут ряд вопросов, связанных с проблематикой данной книги – с задачами оценки параметров состояния и показателей надежности бетонных плотин. К ним, в частности, относятся подходы к оценке надежности, основанные на использовании теоремы Байеса, методов технической диагностики, экспертных оценок, теории принятия решений и т.п.

В книге в основном представлены результаты работ, полученные во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева за последние два – три десятилетия.

В разработке отдельных вопросов принимали участие Е.А. Андрианова (п. 9.3), Н.В. Вознесенская (п. 9.2, 9.3), Т.В. Гавриленко (п. 7.2), А.Ю. Егоров (п. 3.4), М.Г. Зуриашвили (гл. 13), Б.Д. Кауфман (гл. 11, 12), Н.Г. Кузьмин (п. 9.2, 9.3), Д.В. Новицкий (п. 9.3), М.А. Садович (п. 3.7), Н.Я. Шейнкер (п. 5.2, гл. 8), Т.Ф. Шляхтина (п. 3.7).

Авторы признательны сотрудникам редакционно-издательской группы АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» за большую работу, проделанную при подготовке рукописи книги к печати.