ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59873— 2021

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Методика определения критериев безопасности для декларируемых гидротехнических сооружений

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева») при участии Ассоциации организаций и работников гидроэнергетики «Гидроэнергетика России» (Ассоциация «Гидроэнергетика России»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2021 г. № 1569-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Термины,определения и сокращения 2
4 Общие положения 4
5 Требования к определению диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений 5
6 Разработка прогнозных математических моделей гидротехнических сооружений 7
7 Количественные критерии безопасности гидротехнических сооружений и порядок их определения 10
8 Качественные критерии безопасности гидротехнических сооружений и порядок их определения . . 11
9 Регламент разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений 12
10 Требования к организации натурных наблюдений с использованием диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений 13
11 Использование критериальных значений диагностических показателей при принятии решений по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений 14
Приложение А (обязательное) Перечень основных контролируемых количественных и качественных диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений. 16
Приложение Б (обязательное) Методы определения критериев безопасности гидротехнических сооружений 18
Приложение В (справочное) Изменения во времени основных диагностических показателей гидротехнических сооружений из грунтовых материалов 19
Приложение Г (справочное) Изменения во времени основных диагностических показателей бетонных гидротехнических сооружений 20
Приложение Д (рекомендуемое) Особенности прогнозных моделей гидротехнических сооружений из грунтовых материалов 21
Приложение Е (рекомендуемое) Особенности прогнозных моделей бетонных гидротехнических сооружений 23
Библиография 27

Введение

Настоящий стандарт разработан в целях обеспечения требований Федерального закона [1].

Настоящий стандарт является нормативным документом, устанавливающим требования к определению критериев безопасности гидротехнических сооружений в процессе декларирования их безопасности.

В настоящий стандарт включены апробированные многолетним опытом и используемые на практике организационные и методические требования к процедуре определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.

Настоящий стандарт регулирует процессы проведения мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений гидроэлектростанций с использованием критериев безопасности, дополняя в этой области общие требования, изложенные в ГОСТ Р 57793, ГОСТ Р 58719, ГОСТ Р 57792.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Методика определения критериев безопасности для декларируемых гидротехнических сооружений

Hydroelectric power plants. Methodology of setting of safety criteria for waterworks which have to be declared

Дата введения — 2022—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает основные правила и нормы назначения критериев безопасности гидротехнических сооружений гидроэлектростанций в процессе декларирования безопасности, а также требования в части их использования при осуществлении технического контроля состояния гидротехнических сооружений.

Настоящий стандарт регулирует общие вопросы определения критериев безопасности гидротехнических сооружений в соответствии с требованиями действующих нормативных документов на различных стадиях их жизненного цикла, а именно: при их проектировании, эксплуатации, консервации, а также ликвидации.

Настоящий стандарт определяет основные понятия, регламентирует процедуру и последовательность действий при выборе контролируемых и диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений в составе проектной документации и на стадии эксплуатации, определении их критериальных значений, разработке прогнозных математических моделей, применении качественных характеристик, а также определяет порядок разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений.

Общие требования определения критериев безопасности гидротехнических сооружений могут быть использованы на стадиях строительства, капитального ремонта, реконструкции гидротехнических сооружений в целях организации мониторинга состояния.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на декларируемые гидротехнические сооружения всех классов ответственности.

1.3 Положения настоящего стандарта могут быть применены для гидротехнических сооружений, не входящих в состав гидроэлектростанций, в том числе для гидротехнических сооружений:

- объектов тепловой и атомной энергетики;
- комплексов инженерной защиты населенных пунктов и предприятий;
- комплексов накопителей жидких промышленных отходов;
- объектов водохозяйственного комплекса.

1.4 Настоящий стандарт не распространяется на судоходные гидротехнические сооружения.

1.5 Требования и нормы настоящего стандарта следует исполнять при:

- определении критериев безопасности гидротехнических сооружений;
- оценке технического состояния гидротехнических сооружений;
- разработке деклараций безопасности гидротехнических сооружений.

1.6 Требования настоящего стандарта должны соблюдаться всеми организациями и физическими лицами, выполняющими работы или оказывающими услуги по определению критериев безопасности в процессе декларирования безопасности гидротехнических сооружений.

Издание официальное

1.7 Применение настоящего стандарта в целях разработки критериев безопасности для зарубежных объектов определяется соответствующими международными соглашениями.

1.8 При расхождении требований настоящего стандарта с требованиями выпущенной до его утверждения нормативной и технической документации следует выполнять требования в области определения критериев безопасности, установленные в настоящем стандарте.

1.9 При введении в действие уполномоченными федеральными органами исполнительной власти новых нормативных правовых и методических документов, требования которых отличаются от требований, установленных в настоящем стандарте, следует пользоваться вновь введенными требованиями до внесения в стандарт соответствующих изменений.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 19185 Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 27751 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

ГОСТ Р 55260.1.4 Гидроэлектростанции. Часть 1-4. Сооружения ГЭС гидротехнические. Общие требования по организации и проведению мониторинга

ГОСТ Р 57792 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения

ГОСТ Р 57793 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения

ГОСТ Р 58719 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические электростанции. Гидротехнические сооружения. Контрольно-измерительные системы и аппаратура. Условия создания. Нормы и требования

СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»

СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»

СП 39.13330.2012 «СНиП 2.06.05-84* Плотины из грунтовых материалов»

СП 40.13330.2012 «СНиП 2.06.06-85 Плотины бетонные и железобетонные»

СП 58.13330.2019 «СНиП 33-01-2003 Гидротехнические сооружения. Основные положения»

СП 131.13330.2020 Строительная климатология

СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил) в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 19185 и ГОСТ Р 57793, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **аварийная ситуация:** Событие, которое может привести к отказу гидротехнического сооружения, или воздействие внешнего экстремального фактора, способное привести к аварии.

3.1.2 **авария гидротехнического сооружения:** Разрушение либо повреждение гидротехнического сооружения в виде потери прочности или устойчивости сооружения, либо его конструктивных элементов или основания.

3.1.3 **безопасность гидротехнических сооружений:** Свойство гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов.

Примечание — см. Федеральный закон [1], статья 3.

3.1.4 **декларируемые гидротехнические сооружения:** Гидротехнические сооружения, подлежащие обязательному декларированию безопасности в связи с наличием риска возникновения чрезвычайной ситуации при их повреждении.

Примечание — Гидротехнические сооружения перечислены в Федеральном законе [1], статья 3.

3.1.5 **диагностические показатели:** Наиболее значимые для диагностирования и оценки состояния гидротехнического сооружения контролируемые показатели, позволяющие дать оценку безопасности системы «сооружение — основание» в целом или отдельных ее элементов, для которых определяют критериальные значения.

3.1.6 **жизненный цикл гидротехнических сооружений:** Промежуток времени с начала проектирования гидротехнических сооружений до прекращения их существования, включающий в себя все стадии проектирования и строительства гидротехнических сооружений, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию в проектном режиме, временный и (или) постоянный вывод из эксплуатации, а также реконструкцию, капитальный ремонт, восстановление, консервацию и ликвидацию.

3.1.7 **инструментальные наблюдения:** Регулярные измерения показателей тех или иных физических процессов, происходящих в сооружении, осуществляемые с использованием специальной контрольно-измерительной аппаратуры.

3.1.8 **класс ответственности гидротехнического сооружения:** Назначаемая в составе проектной документации в соответствии с действующими нормами проектирования качественно-количественная характеристика, определяющая степень социально-экономической значимости и ответственности гидротехнического сооружения, относящаяся к назначению типа и конструктивно-компоновочных размеров гидротехнического сооружения, определяемых из условия обеспечения устойчивости, механической и фильтрационной прочности системы «сооружение — основание», и назначаемая с учетом социальных последствий возможной аварии гидротехнического сооружения и (или) нарушений его эксплуатации.

3.1.9 **контролируемые показатели:** Определяемые в натурных условиях и (или) вычисленные с использованием результатов этих определений количественные значения или качественные показатели состояния гидротехнического сооружения, из состава которых назначаются диагностические показатели.

3.1.10 **контрольно-измерительная аппаратура:** Приборы, размещаемые на гидротехническом сооружении или в его основании, для проведения наблюдений и оперативной оценки состояния сооружения и (или) его основных элементов.

3.1.11 **критерии безопасности:** Предельные значения количественных и качественных диагностических показателей состояния гидротехнического сооружения, соответствующие допустимой вероятности аварии гидротехнического сооружения, утвержденные в установленном порядке федеральными органами, уполномоченными на осуществление федерального государственного надзора в области безопасности гидротехнических сооружений, в составе декларации безопасности гидротехнического сооружения.

3.1.12 **нормальная эксплуатация гидротехнического сооружения:** Эксплуатация гидротехнического сооружения, осуществляемая в соответствии с действующей проектной и эксплуатационной документацией.

3.1.13 **показатель состояния гидротехнического сооружения:** Количественная и (или) качественная характеристика, используемая для оценки технического состояния и уровня безопасности гидротехнического сооружения.

3.1.14 **прогнозная модель гидротехнического сооружения:** Математическая модель гидротехнического сооружения, применяемая для получения прогнозных значений диагностических показателей поведения гидротехнического сооружения при тех или иных сочетаниях нагрузок и внешних воздействий.

3.1.15 **техническое состояние гидротехнического сооружения:** Состояние гидротехнического сооружения, которое оценивают в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, с использованием критериальных значений диагностических показателей, установленных в технической документации на гидротехническое сооружение.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:
АСДК — автоматизированная система диагностического контроля;
АСО — автоматизированная система опроса;
ГТС — гидротехническое сооружение;
ГЭС — гидроэлектростанция;
ИДС — информационно-диагностическая система;
КИА — контрольно-измерительная аппаратура;
НДС — напряженно-деформированное состояние;
УВБ — уровень верхнего бьефа.

4 Общие положения

4.1 В соответствии с Федеральным законом [1] разработка и своевременное уточнение критериев безопасности являются обязанностью собственника ГТС и (или) эксплуатирующей организации.

4.2 Оценку технического состояния по каждому из диагностических показателей следует выполнять с использованием их критериальных значений первого уровня — К1 (предупреждающий) и второго уровня — К2 (предельный):

- К1 — первый (предупреждающий) уровень критериальных значений диагностического показателя, при достижении которого состояние системы «сооружение — основание» остается работоспособным и еще соответствует проектной документации и условиям нормальной эксплуатации;
- К2 — второй (предельный) уровень критериальных значений диагностического показателя, при превышении которого состояние ГТС становится неработоспособным. Дальнейшая эксплуатация ГТС в проектном режиме без разрешения соответствующего органа государственного надзора запрещена.

4.3 Оперативную оценку технического состояния ГТС следует осуществлять путем сравнения измеренных (или вычисленных на основе измерений) количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями К1 и К2 с учетом прогнозируемого интервала их изменения. Критериальные значения К1, К2 задают границы между возможными техническими состояниями.

Порядок использования критериальных значений при оперативной оценке технического состояния ГТС приведен в разделе 12.

4.4 Для эксплуатируемых ГТС, в зависимости от соотношения фактических значений диагностических показателей и определенных для них критериев безопасности, надлежит устанавливать следующие категории технического состояния:

- работоспособное состояние, при котором значения всех диагностических показателей состояния ГТС не превышают своих критериальных значений К1;
- частично работоспособное состояние, при котором значение хотя бы одного из диагностических показателей состояния ГТС превысило его критериальное значение К1 при данном сочетании нагрузок или внешних воздействий, но еще не достигло критериального значения К2; в этом состоянии ГТС может эксплуатироваться в течение ограниченного времени, необходимого для устранения причин выхода данного показателя состояния ГТС за пределы установленного для него значения К1, либо с ограничением проектных режимов эксплуатации;
- неработоспособное состояние, при котором значение хотя бы одного из диагностических показателей состояния ГТС превысило его критериальное значение К2; в этом случае эксплуатация ГТС в проектном режиме является недопустимой.

4.5 Критериальные значения диагностических показателей (К1 и К2) следует устанавливать на основе расчетов и оценок реакции ГТС на внешние воздействия. Состав нагрузок и воздействий на ГТС, способы их определения и контроля для конкретного сооружения установлены в проектной документации и могут быть уточнены на стадии эксплуатации с учетом условий эксплуатации ГТС в соответствии с требованиями нормативных документов.

4.6 Критериальные значения количественных диагностических показателей надлежит определять в детерминированной форме, поскольку требования и критериальные условия в СП 39.13330.2012, СП 40.13330.2012 и СП 58.13330.2019 также выражены в детерминированной форме с использованием системы коэффициентов надежности, опосредованно обеспечивающих соответствие вероятностей возникновения аварий ГТС допускаемым значениям, приведенным в СП 58.13330.2019.

4.7 В период эксплуатации ГТС, при обосновании и возможной корректировке состава диагностических показателей и их критериальных значений К1 и К2 (см. 10.5), помимо результатов расчетов над-

лежит использовать данные натурных наблюдений, полученные за весь период эксплуатации данного ГТС.

4.8 Состав диагностических показателей состояния ГТС и их критериальные значения должны быть определены при разработке проектной документации в соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию отдельных видов ГТС и в дальнейшем уточнены в процессе эксплуатации ГТС с учетом результатов выполненных наблюдений за работой и состоянием ГТС.

При обосновании состава диагностических показателей состояния ГТС учитывают зоны (участки, элементы) ГТС, наиболее опасные с точки зрения возможности возникновения и развития аварийной ситуации.

4.9 В ходе очередного декларирования безопасности ГТС, при соответствующем обосновании, в состав диагностических могут быть включены дополнительные показатели; отдельные, ранее выбранные диагностические показатели могут быть переведены в состав контролируемых показателей в случае, если с учетом новых данных натурных наблюдений, полученных за истекший междекларационный период, они перестали соответствовать требованиям, предъявляемым к диагностическим показателям.

4.10 Состав контролируемых количественных и качественных показателей состояния эксплуатируемых ГТС следует назначать в соответствии с приложением А. Выбор методов определения критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС следует осуществлять в соответствии с приложением Б.

5 Требования к определению диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений

5.1 Техническое диагностирование ГТС, включающее установление и прогнозирование технического состояния ГТС, а также разработку методов и средств контроля состояния ГТС, следует проводить на всех декларируемых ГТС с целью:

- оценки текущего состояния ГТС с использованием диагностических показателей состояния ГТС из состава контролируемых показателей состояния сооружения;
- прогноза изменения технического состояния ГТС;
- обоснования необходимых мероприятий, направленных на обеспечение работоспособного технического состояния ГТС.

5.2 При проведении технического диагностирования ГТС надлежит из полного состава контролируемых показателей состояния ГТС выделить достаточное для достоверного определения технического состояния эксплуатируемого ГТС количество показателей.

5.3 Диагностические показатели состояния ГТС подразделяют на прямые и опосредованные.

5.3.1 Прямые показатели отражают степень соответствия проектной документации фактических параметров ГТС с учетом нагрузок и факторов внешнего воздействия на ГТС. К таким показателям относят значения отметок гребня плотины и берм на ее откосах, проектные значения ширин гребня и берм ГТС, заложение откосов, наличие и работоспособность дренажных, противофильтрационных систем и пр.

Недостатком диагностирования, проведенного с использованием только прямых показателей, является невозможность прогноза времени наступления предельного состояния, при котором возможен отказ в работе ГТС, в связи с чем применение прямых диагностических показателей в целях определения критериев безопасности ГТС допустимо только в случае отсутствия КИА на сооружении.

Определение критериев безопасности ГТС для прямых диагностических показателей следует осуществлять с использованием детерминистических (расчетных) прогнозных моделей в соответствии с требованиями, изложенными в разделах 7 и 8.

5.3.2 К опосредованным диагностическим показателям относят такие, которые в процессе мониторинга свидетельствуют о состоянии ГТС по результатам сопоставления фактических значений количественных и качественных показателей внутреннего сопротивления системы «сооружение — основание» внешнему воздействию с определенными при эксплуатации ГТС по расчету или по данным натурных наблюдений (инструментальных и визуальных) значениями диагностических показателей, при которых возможно наступление предельного состояния или аварийной ситуации на ГТС.

5.4 Основными видами физических процессов, происходящих в системе «ГТС — основание», являются деформирование, фильтрация и теплоперенос. Ход этих процессов сопровождается изменениями соответствующих им показателей состояния ГТС, которые надлежит использовать в качестве диагностических.

5.4.1 Диагностические показатели состояния ГТС подразделяют на количественные и качественные. Первые имеют численные значения, определяемые расчетом или получаемые в результате инструментальных измерений (с помощью КИА). Состав диагностических показателей приведен в А.1 и А.3.

5.4.2 Качественные диагностические показатели состояния ГТС контролируют визуальным путем.

5.4.3 Состав контролируемых качественных показателей состояния эксплуатируемых ГТС следует определять в соответствии с А.2 и А.4.

5.4.4 При назначении критериев безопасности количественные контролируемые показатели, выбираемые в качестве диагностических (измеряемые или вычисляемые по результатам измерений), должны соответствовать следующим требованиям:

- диапазон изменения значений показателей при работоспособном техническом состоянии должен в несколько раз превосходить погрешность измерительной системы (при отсутствии соответствующего обоснования);
- диагностические показатели должны поддаваться прогнозу с помощью детерминистических расчетных моделей или статистических прогнозных моделей.

5.4.5 Состав количественных диагностических показателей для ГТС из грунтовых материалов в зависимости от конструкции ГТС и оснащенности КИА надлежит определять с учетом требований А.1.

Состав количественных диагностических показателей для бетонных ГТС в зависимости от конструкции ГТС и его оснащенности КИА надлежит определять с учетом требований А.3.

5.4.6 При проектировании и на начальных стадиях эксплуатации ГТС количественные значения каждого из выбранных диагностических показателей состояния ГТС надлежит определять с использованием принятых в проектной документации детерминистических (расчетных) моделей работы системы «сооружение — основание» (см. 7.2). При этом в качестве исходных данных для этих моделей следует использовать фактические для каждой стадии строительства и наполнения водохранилища значения факторов внешних воздействий на ГТС, а также расчетные значения факторов внутреннего сопротивления системы «сооружение — основание», включая значения расчетных характеристик использованных строительных материалов и грунтов оснований ГТС.

5.4.7 В начальный период эксплуатации ГТС корректность детерминистических моделей и достоверность получаемых с их помощью результатов должны быть проверены посредством сопоставления этих результатов с фактическими значениями диагностических показателей, полученными по данным натурных наблюдений при соответствующих значениях нагрузок и воздействий на ГТС.

5.4.7.1 При существенной разнице сопоставляемых расчетных и натурных данных, в несколько раз превосходящей погрешность измерительной системы, детерминистические модели надлежит «калибровать» (см. 7.8).

5.4.7.2 При неудовлетворительных результатах «калибровки» детерминистических моделей и при наличии достаточно представительного временного ряда результатов инструментальных наблюдений за диагностическими показателями (охватывающего не менее 5 лет непрерывных наблюдений при эксплуатации сооружения в диапазоне нагрузок, ранее испытанных ГТС, и содержащего не менее 12 результатов измерений), полученных в процессе натурных наблюдений за ГТС, а также при нормальном ходе их изменений во времени (см. приложения В и Г), надлежит использовать статистические или смешанные прогнозные модели (см. 7.10, 7.15).

5.5 К объектам диагностирования следует относить такие конструктивные элементы ГТС, техническое состояние которых однозначно влияет на надежность и безопасность сооружения в целом.

5.5.1 Для ГТС из грунтовых материалов в качестве объектов диагностирования надлежит использовать:

- верховые и низовые откосы ГТС;
- тело плотин (дамб) и их гребни;
- противофильтрационные устройства в ГТС и в основаниях;
- дренажные устройства ГТС;
- береговые примыкания ГТС и их сопряжения с основанием;
- сопряжения ГТС из грунтовых материалов с бетонными ГТС и т. д.

5.5.2 Для бетонных ГТС в качестве объектов диагностирования надлежит использовать:

- тело плотин;
- несущие строительные конструкции ГТС;
- межсекционные, межстолбчатые и межблочные швы (в зависимости от конструкции ГТС);
- шов по контакту плотины и основания;

- устои;
- быки;
- элементы водоподводящего тракта ГЭС (турбинные водоводы, водозаборные устройства и др.);
- устройства гашения водной энергии (водосбросы, водобойные колодцы, стенки и др.);
- основание ГТС;
- элементы подземного противофильтрационного контура (дренажи, цементационные завесы) и т. д.

5.5.3 В обязательном порядке в качестве объектов диагностирования надлежит выбирать ГТС и их элементы, нарушения прочности или устойчивости которых могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций.

Выявление наиболее ответственных элементов и конструкций ГТС, подлежащих диагностированию, следует осуществлять на основе качественного анализа риска возникновения аварий ГТС, включающего:

- предварительный анализ опасностей, способных привести к аварии ГТС;
- разработку перечня возможных процессов и событий, приводящих к аварии ГТС;
- формирование перечня возможных сценариев аварий ГТС и их последствий.

5.6 Для каждого из диагностируемых элементов ГТС, в зависимости от его конструктивных особенностей, условий эксплуатации и возможных последствий при повреждениях, в разделе проектной документации, который распространяется на натурные наблюдения, должен быть определен состав диагностических показателей состояния (см. приложение А).

5.7 В разделе проектной документации, распространяющемся на натурные наблюдения, для каждого из диагностических показателей должны быть указаны критериальные значения количественных и качественных диагностических показателей состояния ГТС. Критериальные значения, указанные в проектной документации, подлежат уточнению в период начальной эксплуатации ГТС с учетом изменений конструкций и режимов эксплуатации ГТС, внесенных в ходе их проектирования и строительства.

5.8 Обоснование критериальных значений количественных и качественных диагностических показателей состояния ГТС на следующий междекларационный период надлежит выполнять в процессе декларирования безопасности ГТС и приводить в пояснительной записке к критериям безопасности ГТС.

5.9 При очередном декларировании безопасности ГТС состав объектов диагностирования и критериальные значения диагностических показателей их состояния подлежат уточнению. Правила эксплуатации ГТС в части организации натурных наблюдений подлежат корректировке, если в период декларирования безопасности были уточнены критерии безопасности ГТС.

6 Разработка прогнозных математических моделей гидротехнических сооружений

6.1 При оценке состояния систем «сооружение — основание», в ходе определения критериев безопасности ГТС, следует использовать следующие прогнозные модели:

- детерминистические (расчетные), разработанные на стадии проектирования ГТС и уточненные на стадии эксплуатации;
- статистические (регрессионные), разработанные для стадии эксплуатации ГТС;
- смешанные модели, используемые на стадии эксплуатации ГТС.

6.2 Детерминистические модели ГТС (математические расчетные модели ГТС) следует применять для получения расчетных (детерминированных) значений диагностических показателей поведения ГТС при тех или иных сочетаниях нагрузок и внешних воздействий на них, а также при расчетных значениях характеристик физических и механических свойств материалов системы «сооружение — основание».

6.3 На стадии проектирования должны быть разработаны прогнозные детерминистические модели, с использованием которых должны быть выполнены расчеты НДС, прочности, устойчивости и деформирования элементов ГТС. Расчеты выполняются с учетом изменений во времени параметров фильтрационного режима и температурно-влажностного состояния (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне, в соответствии с СП 131.13330.2020) элементов системы «сооружение — основание».

В связи с большой спецификой указанных задач и сложностью их решений, а также высокой ответственностью результатов данные расчеты необходимо выполнять в специализированных научно-исследовательских или проектных организациях.

Диагностические показатели состояния ГТС и их критериальные значения должны назначаться с использованием результатов вышеприведенных расчетов.

6.4 Расчеты в проектной документации с использованием детерминистических моделей, которые применяются для выбора диагностических показателей состояния системы «сооружение — основание» и назначения для них критериальных значений, должны быть выполнены для расчетных сочетаний факторов внешних воздействий на ГТС и расчетных сочетаний факторов внутреннего сопротивления (несущей способности) системы «сооружение — основание» с учетом наступления предельных состояний в период строительства и эксплуатации (см. 8.2).

Расчетные значения диагностических показателей системы «сооружение — основание» надлежит определять с учетом:

- нелинейности механических свойств грунтов тела и основания ГТС;
- неоднородности строения массива грунтов основания;
- возможных изменений их физико-механических свойств во времени и в зависимости от температурно-влажностного состояния.

6.5 При разработке детерминистических прогнозных моделей следует использовать исходные данные в зависимости от типа и класса ответственности ГТС, основанные на общих результатах:

- оценки условий эксплуатации ГТС;
- оценки инженерно-геологических и гидрологических условий площадки строительства ГТС;
- расчетов прочности и устойчивости системы «сооружение — основание»;
- расчетов фильтрационной прочности системы «сооружение — основание» ГТС;
- расчетов устойчивости склонов и откосов, примыкающих к ГТС;
- расчетов изменений температурно-влажностного состояния тела и основания ГТС, а также его береговых примыканий (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне, в соответствии с СП 131.13330.2020).

6.6 Детерминистические расчетные модели, разработанные на стадии проектирования, могут быть использованы также на стадиях начальной эксплуатации ГТС для прогноза их поведения при существующих на момент выполнения расчетов значениях внешних воздействий на ГТС. С этой целью надлежит выполнять расчеты на все промежуточные значения внешних воздействий при реальных (на стадии возведения ГТС) расчетных значениях характеристик использованных строительных материалов тела сооружения и характеристик грунтов основания.

6.7 На стадиях дальнейшей эксплуатации ГТС разработку детерминистической модели либо «калибровку» расчетной модели, разработанной на стадии проектирования, необходимо осуществлять в случае изменений условий эксплуатации ГТС или показателей их состояния, фиксируемых в ходе натурных наблюдений по отношению к установленным в проектной документации либо определенным на основе статистической прогнозной модели, а также при изменениях в ходе строительства или эксплуатации свойств грунтов системы «сооружение — основание».

6.8 Процедуру «калибровки» расчетной модели следует проводить в следующем порядке:

- вводится некоторая мера погрешности (невязка) между расчетными и измеренными значениями диагностических показателей, превосходящая погрешность измерительной системы;
- принятые в проектной документации значения физико-механических характеристик материалов варьируются (им даются некоторые приращения);
- выполняется серия расчетов при различных («проварьированных») значениях физико-механических свойств, и для каждого из них вычисляется невязка между расчетными и измеренными показателями состояния (перемещениями, напряжениями, расходами фильтрации, температурами и др.);
- по величине невязки для выполненной серии расчетов выбирается первое приближение к «калиброванной» модели — в качестве новых значений физико-механических свойств выбираются те, для которых получена наименьшая невязка между расчетными и измеренными значениями;
- процесс «калибровки» расчетной модели можно продолжить, придавая значениям параметров модели первого приближения новые вариации и выполняя новые серии расчетов.

6.8.1 Варьирование механических параметров расчетной модели должно производиться таким образом, чтобы значения откалиброванных параметров оставались реальными и не выходили за пределы возможной погрешности в их определении.

6.8.2 Описанная выше процедура калибровки может быть обобщена и формализована как задача на минимум функционала невязки Ф ($E_{пл}$, $E_{осн}$):

$$\Phi(E_{пл},E_{осн}) = \sqrt{1/IJ\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}(F_{расч}F_{изм})^2}, \quad (1)$$

где $F_{расч}$ ($F_{изм}$) — расчетное (измеренное) значение диагностического показателя (перемещения, напряжения, фильтрационного расхода и т. д.);

I — количество циклов натурных измерений диагностического показателя, вошедших в базовую последовательность калибровки;

J — количество точек измерения диагностического показателя, вошедших в базовую последовательность калибровки;

$E_{пл}$, $E_{осн}$ — аргументы функционала невязки Ф, в данном случае модули деформации плотины $E_{пл}$ и основания $E_{осн}$.

6.8.3 Минимизация функционала Ф может проводиться любым из известных в прикладной математике численных методов. В качестве начального приближения берутся проектные значения корректируемых (калибруемых) механических параметров (в данном случае проектные значения $E_{пл}$, $E_{осн}$).

6.8.4 В функционале Ф число варьируемых параметров, с помощью которых достигается лучшее приближение результатов измерений и расчетов, взято для определенности равным двум (модуль плотины $E_{пл}$ и основания $E_{осн}$). В общем случае число калибруемых механических параметров может быть иным.

6.8.5 Если после калибровки откорректированные механические параметры (коэффициенты уравнений) расчетной модели нереальны и существенно отличаются от исходных (проектных), то это означает, что выбранная для калибровки расчетная модель не может быть прогнозной и должна быть заменена на другую, более адекватную реальной работе сооружения.

6.9 При оценке погрешности детерминистической расчетной модели надлежит выполнить одну или несколько серий расчетов при одинаковых значениях фактора внешнего воздействия на ГТС при характеристиках фактора внутреннего сопротивления модели, изменяемых в диапазоне их реальных значений.

6.10 При соблюдении условий, приведенных в 6.4.7.2, надлежит использовать статистические модели диагностических показателей — математические регрессионные модели, применяемые при обработке натурных данных, полученных на стадии эксплуатации ГТС, для определения наиболее вероятных значений диагностических показателей, а также их допустимых отклонений (в большую и меньшую стороны).

6.11 Статистические модели следует применять для прогноза значений диагностических показателей на стадии эксплуатации ГТС при наличии достаточно представительного временного ряда натурных данных о диагностических показателях (охватывающего не менее 5 лет непрерывных наблюдений при эксплуатации сооружения в диапазоне нагрузок, ранее испытанных ГТС, и содержащего не менее 12 результатов измерений диагностического показателя), изменяемых в диапазоне реальных внешних воздействий, ранее испытанных ГТС.

6.12 Построение статистической модели необходимо выполнять в следующей последовательности:

- из временного ряда имеющихся данных натурных измерений диагностического показателя формируют базовую последовательность натурных данных $F_{изм}$;
- прогнозируемое значение каждого диагностического показателя $F_{прог}$ представляют в виде эмпирической формулы, аргументами которой могут быть время t, обобщенные внешние нагрузки p, температурные воздействия T с неопределенными коэффициентами (в простейших случаях эмпирическая формула имеет вид степенного многочлена от аргументов p и T);
- из условия минимума невязки между $F_{прог}$ и $F_{изм}$ (методом наименьших квадратов) определяют численные значения неизвестных коэффициентов многочлена $F_{прог}$;
- определяют погрешность прогноза δ по формуле

$$\delta = k\sigma, \quad (2)$$

где σ — среднеквадратическая погрешность прогноза на элементах базовой последовательности;

k = 1, 2, 3 — целые числа (при k = 3 вероятность попадания $F_{изм}$ в интервал значений $F_{прог} \pm \delta$ составляет более 99 %, поэтому при назначении критериальных значений не следует использовать значения $k \geq 3$);

- оценивают значимость (или весомость) каждого из коэффициентов функции $F_{прог}$ и исключают малозначащие члены;

- построенную прогнозную статистическую (регрессионную) модель проверяют на данных натурных измерений, не вошедших в базовую последовательность (верификация модели);

- при необходимости осуществляют корректировку принятой прогнозной модели.

6.13 Полученная статистическая (регрессионная) модель должна быть представлена в эксплуатирующую организацию в виде формул для вычисления $F_{прог}$ или в виде компьютерных программ, с помощью которых по текущим значениям t, p и T определяются значения $F_{прог}$ и их погрешность.

6.14 В процессе эксплуатации ГТС (при каждом очередном декларировании безопасности) статистическую модель необходимо корректировать с учетом значений диагностических показателей, полученных в междекларационный период.

Корректировку статистической прогнозной модели следует выполнять с соответствующим обоснованием; в случае увеличения погрешности прогноза и (или) наличия признаков появления негативной динамики изменения диагностического показателя в обязательном порядке необходимо выполнять расчетную оценку состояния ГТС (устойчивость, деформации и фильтрационная прочность системы «сооружение — основание»).

6.15 Смешанные прогнозные модели надлежит использовать в тех случаях, когда фактические значения диагностических показателей существенно отличаются от их значений, определенных как по детерминистическим, так и по статистическим моделям. В этих случаях для разных диапазонов изменений значений факторов внешнего воздействия и временных интервалов надлежит применять различные модели (так, например, при описании обратимых составляющих критериальных значений диагностических показателей внутреннего сопротивления системы «сооружение — основание» следует использовать детерминистические модели, а при описании необратимых составляющих критериальных значений диагностических показателей надлежит использовать статистические модели).

6.16 Специфика разработки прогнозных моделей ГТС приведена в приложениях Д и Е.

7 Количественные критерии безопасности гидротехнических сооружений и порядок их определения

7.1 Оперативную оценку технического состояния ГТС по каждому из диагностических показателей надлежит выполнять по результатам сопоставления их фактических значений (измеренных в натурных условиях или вычисленных по результатам измерений) с назначенными для них критериальными значениями уровней К1 и К2.

7.2 Количественные значения критериев К1 и К2 диагностических показателей надлежит устанавливать по результатам оценки реакции ГТС на факторы внешних воздействий при их основном и особом сочетаниях соответственно.

Реакцию ГТС определяют на основе вычисления значений диагностических показателей с использованием расчетных прогнозных моделей при нагрузках и воздействиях основного и особого сочетаний. Состав нагрузок в указанных сочетаниях и способы их определения должны быть приняты для ГТС в зависимости от его типа и класса ответственности в соответствии с СП 20.13330.2016 и СП 38.13330.2018.

7.3 Значения К1 и К2 для каждого из диагностических показателей состояния ГТС надлежит устанавливать на стадии проектирования ГТС и при его дальнейшей эксплуатации, с использованием детерминистических расчетных моделей. При невозможности (по тем или иным причинам) выполнения удовлетворительной «калибровки» детерминистических моделей ГТС на стадии дальнейшей эксплуатации ГТС и обязательном наличии достаточно представительного временного ряда инструментальных наблюдений за диагностическими показателями состояния ГТС, охватывающего не менее 5 лет непрерывных наблюдений при эксплуатации сооружения в диапазоне нагрузок, ранее испытанных ГТС, и содержащего не менее 12 результатов измерений, а также при нормальном ходе их изменений во времени (см. приложения В и Г) значения К1 и К2 устанавливаются с использованием статистических или смешанных прогнозных моделей (см. раздел 7).

7.4 На стадии проектирования ГТС из грунтовых материалов должны быть определены детерминированные значения К1 и К2 для следующих диагностических показателей (при наличии соответствующей КИА) (см. приложения А и Б):

- напряжений и деформаций в теле ГТС;
- осадок и горизонтальных смещений внешней поверхности ГТС;
- положений поверхности депрессии и величин удельных фильтрационных расходов;
- устойчивости верховых и низовых откосов;
- распределений и изменений во времени температуры грунтов в теле ГТС и его основании (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне, в соответствии с СП 131.13330.2020) и пр.

7.5 На стадии проектирования бетонных и железобетонных ГТС на основании расчетов прочности и устойчивости системы «сооружение — основание» по предельным состояниям первой группы по ГОСТ 27751 должны быть определены детерминированные значения К1 и К2 для следующих диагностических показателей (при наличии соответствующей КИА) (см. приложения А и Б):

- напряжений и деформаций в бетоне и арматуре;
- вертикальных смещений (осадок) ГТС и их оснований;
- горизонтальных смещений (по потоку) контролируемых точек ГТС, входящих в состав напорного фронта;
- распределений и изменений во времени температуры бетона ГТС и грунта основания под действием эксплуатационных температурных воздействий при квазистационарном режиме;
- градиента напора на цементационной завесе в основании бетонной плотины;
- устойчивости ГТС в целом или его основных элементов (например, анкерных опор шпунтовых подпорных стен).

7.6 Критериальные значения перечисленных диагностических показателей надлежит определять в детерминированной форме с использованием соответствующих коэффициентов надежности, обеспечивающих соответствие вероятностей возникновения аварий ГТС допускаемым значениям, установленным в СП 58.13330.

7.7 На стадии эксплуатации ГТС корректировки состава диагностических показателей и их критериальных значений К1 и К2 следует выполнять с использованием «откалиброванных» детерминистических (расчетных), статистических (регрессионных) или смешанных моделей с учетом данных натурных измерений за весь период наблюдений, включая данные, полученные в строительный период.

7.8 В период эксплуатации ГТС уточнение значений критериев К1 и К2 надлежит выполнять в ходе очередного декларирования безопасности ГТС.

7.9 Обоснование состава контролируемых показателей состояния ГТС, принятых диагностических показателей состояния ГТС и их критериальных значений К1 и К2 (критериев безопасности) надлежит приводить в пояснительной записке к критериям безопасности ГТС.

7.10 Измеряемые или вычисляемые по результатам натурных измерений количественные показатели, выбираемые в качестве диагностических, должны соответствовать требованиям, установленным в 6.4.4.

8 Качественные критерии безопасности гидротехнических сооружений и порядок их определения

8.1 При проведении мониторинга технического состояния ГТС в период эксплуатации наряду с измерениями количественных диагностических показателей надлежит по результатам визуальных наблюдений определять качественные диагностические показатели (признаки) технического состояния ГТС.

Состав и критериальные значения качественных диагностических показателей $\tilde{K}1$ и $\tilde{K}2$ устанавливают экспертным путем на основе анализа сценариев потенциально возможных аварий и прогноза возможных изменений состояния эксплуатируемого ГТС под действием различных деструктивных процессов, неисправностей и отказов в работе, а также природных и (или) техногенных нагрузок и внешних воздействий.

8.2 В общем случае в состав контролируемых визуальными наблюдениями качественных диагностических показателей (признаков) технического состояния эксплуатируемых ГТС следует включать:

- наличие и развитие очагов фильтрации на низовых откосах плотин (дамб);
- наличие очагов фильтрации на береговых склонах в нижнем бьефе;

- наличие и развитие признаков нарушения фильтрационной прочности в теле плотин (дамб) из грунтовых материалов, в их основаниях и береговых примыканиях;
- потерю работоспособности (частичная или полная) дренажных устройств (засорение, зарастание, перемерзание и пр.);
- наличие и развитие трещин, локальных воронок проседания грунтов (на гребне, бермах и откосах ГТС из грунтовых материалов);
- наличие признаков, а также развития оползневых процессов и очагов пучения грунтов на откосах ГТС;
- повреждения волнозащитных креплений откосов ГТС из грунтовых материалов;
- образование наледей на откосах, у дренажей, на береговых склонах;
- обнажение и коррозию рабочей арматуры железобетонных элементов ГТС;
- трещины и другие повреждения на бетонных поверхностях несущих элементов ГТС, свидетельствующие о развитии недопустимых напряжений или нарушающие статическую работу конструкций (значительные по площади повреждения защитного слоя бетона с оголением рабочей арматуры, развитые трещины, сквозные трещины, трещины со струйной фильтрацией, трещины большой протяженности, развивающиеся во времени трещины);
- механические повреждения элементов водосбросного тракта, способные привести к ограничению пропуска расчетных расходов;
- повреждения затворов, кранов и другого механического и грузоподъемного оборудования.

Приведенный перечень не является исчерпывающим и зависит от типа, класса ответственности ГТС, а также от условий эксплуатации ГТС с учетом действующих на сооружение нагрузок и воздействий.

8.3 Состав контролируемых качественных диагностических показателей (признаков) для каждого конкретного ГТС следует назначать, уточнять, а при необходимости и дополнять исходя из особенностей его конструкции, условий и опыта эксплуатации, фактического технического состояния, наличия (или отсутствия) и характера развития деструктивных процессов (см. приложение А).

Если в период эксплуатации ГТС по результатам обследований выявлено наличие деструктивных процессов, развитие которых может привести к снижению надежности ГТС, то показатель состояния ГТС из состава контролируемых переходит в состав диагностических. Порядок контроля, а также необходимость выполнения мероприятий в данном случае должны устанавливаться при соответствующем обосновании при назначении критериев безопасности.

8.4 Качественные диагностические показатели эксплуатируемого ГТС необходимо считать превысившими критерии предупреждающего уровня $\tilde{K}1$, если они характеризуются признаком начальной стадии проявления и отсутствием развития во времени деструктивных процессов. При этом техническое состояние ГТС считают частично работоспособным.

8.5 Предельный уровень критериев $\tilde{K}2$ качественных диагностических показателей характеризуется не только явным проявлением этих признаков, но и развитием деструктивных процессов во времени, способных привести к значительным повреждениям или аварийной ситуации на ГТС. При этом следует считать, что ГТС перешло в неработоспособное состояние.

8.6 Качественные и количественные критериальные значения диагностических показателей состояния ГТС следует приводить в табличной форме. В обязательном порядке для качественных показателей состояния ГТС указывают признаки, характеризующие работоспособное техническое состояние ГТС, признаки, свидетельствующие о переходе из работоспособного в частично работоспособное состояние, а также показатели, превышение которых характеризует переход в неработоспособное состояние ГТС.

9 Регламент разработки и утверждения критериальных значений диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений

9.1 Согласно требованиям Федерального закона [1] (статья 9) для ГТС на стадиях проектирования, эксплуатации, консервации и ликвидации необходимо устанавливать критериальные значения диагностических показателей состояния сооружения (критерии безопасности).

9.2 Требования действующих нормативных правовых актов в части разработки декларации безопасности ГТС распространяются на разработку критериев безопасности ГТС.

9.3 Согласно требованиям Федерального закона [1] (статья 13) критерии безопасности подлежат утверждению в составе декларации безопасности ГТС органом государственного надзора за безопасностью ГТС.

9.4 Состав и значения критериев безопасности, установленных в проектной документации, должны корректироваться на стадии эксплуатации ГТС, включая начальный ее период.

9.5 Корректировку критериев безопасности эксплуатируемых ГТС осуществляют в ходе очередного декларирования безопасности ГТС.

9.6 Критерии безопасности могут быть откорректированы собственником и (или) эксплуатирующей организацией ГТС в случае изменения состояния системы КИА, влияющего на достоверность мониторинга состояния ГТС и оценки технического состояния ГТС.

9.7 Собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация должны представить критерии безопасности с пояснительной запиской к ним в орган государственного надзора за безопасностью ГТС в составе очередной декларации безопасности после ее рассмотрения экспертным центром в ходе проведения процедуры экспертизы декларации безопасности ГТС.

9.8 Экспертизу критериев безопасности следует осуществлять на основании рассмотрения критериев безопасности и пояснительной записки к ним, содержащих следующие материалы:

- перечень контролируемых показателей состояния ГТС;
- обоснование выбора диагностических показателей из состава контролируемых показателей состояния ГТС;
- таблицы диагностических показателей и их критериальных значений;
- схемы размещения средств измерений и состава наблюдений за ГТС;
- анализ данных натурных наблюдений за ГТС, оценку достаточности и достоверности показаний установленной на ГТС КИА, обоснование использованных методов определения критериев безопасности, включая расчеты по оценке состояния ГТС, обоснование назначенных количественных критериев безопасности, прогнозную модель изменения критериев безопасности на последующий междекларационный период, представляемые в составе пояснительной записки.

9.9 В процессе экспертизы критериев безопасности экспертной комиссии следует анализировать:

- обоснованность назначенного состава контролируемых и диагностических показателей состояния ГТС;
- обоснованность и корректность использованных методов определения критериев безопасности, включая все требуемые расчетные обоснования (см. 10.8).

10 Требования к организации натурных наблюдений с использованием диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений

10.1 При разработке проектной документации КИА в ГТС должна быть размещена таким образом, чтобы для каждого критериального значения количественного диагностического показателя состояния ГТС имелась соответствующая измеренная величина данного показателя.

10.2 КИА должна быть установлена в первую очередь в тех зонах или точках, которые наиболее «чувствительны» к изменениям состояния конструкции, а также на участках, на которых, по данным расчетов, показатели имеют максимальные значения.

К таким зонам (участкам) следует относить трещины и разломы в скальных основаниях, участки слабых пород в них, контакты примыкания к скальным бортам плотин, гребни плотин и зоны сопряжения с основанием наиболее высоких участков ГТС из грунтовых материалов, зоны возможной контактной фильтрации, места сопряжений бетонных и грунтовых ГТС и др.

10.3 Учитывая возможность неизбежного выхода из строя отдельных измерительных преобразователей, а также 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. и дублировать измерения различными способами, включая расчетные.

Показания закладных приборов, действующих за пределами гарантийного срока, не могут быть использованы для назначения по ним критериев безопасности.

10.4 Измерения диагностических показателей состояния ГТС следует выполнять возможно более простыми и надежными средствами. В случае применения недостаточно долговечных измерительных средств в проектной документации необходимо предусмотреть методы и способы их своевременной замены.

10.5 Для упрощения способов сопоставления значений измеренных диагностических показателей с критериальными значениями служба мониторинга ГТС должна составлять специальную таблицу

для всех ГТС и их конструктивных элементов. В этой таблице для строительного периода должны быть приведены следующие данные:

- наименование всех показателей состояния ГТС, контролируемых натурными наблюдениями;
- способы определения значений каждого показателя по данным измерений;
- первоначальные расчетные значения показателей в соответствии с проектной документацией;
- значения показателей по данным измерений на характерные периоды работы ГТС.

10.6 В период эксплуатации ГТС в таблицу (базу данных), составленную в соответствии с требованиями 11.5, дополнительно вносят уточненные по данным измерений значения диагностических показателей (абсолютная величина, интенсивность изменения во времени и пр.) и значения показателей по данным измерений в характерные периоды работы ГТС. Также в таблице указывают параметры нагрузок и воздействий на ГТС, действующие на сооружение в период диагностирования состояния.

10.7 С целью повышения эффективности контроля состояния ГТС периодичность контроля технического состояния и измерений должна быть назначена с учетом положений ГОСТ Р 55260.1.4, а также следующих факторов:

- класса ответственности сооружения и величины ущерба, возможного вследствие аварии или повреждения ГТС;
- технического состояния ГТС и его конструктивных элементов;
- информативности и надежности системы контроля;
- прогнозных моделей изменения состояния ГТС.

10.8 Для повышения безопасности эксплуатации ГТС следует использовать АСДК, позволяющие обеспечивать автоматизацию процессов измерения параметров, характеризующих состояние ГТС, предварительную и окончательную обработку и анализ результатов контрольных измерений, сопоставление измеренных показателей с их критериальными значениями.

Оснащение ГТС АСДК осуществляют согласно ГОСТ Р 55260.1.4. Уровень автоматизации определяют исходя из состава и объема КИА, условий расположения и эксплуатации ГТС.

Для эксплуатируемых ГТС, не оснащенных в соответствии с проектной документацией дистанционными измерительными устройствами, допускается применять АСДК (ИДС) без АСО КИА. При отсутствии АСО КИА регулярные измерения по приборам в ГТС проводят вручную переносными вторичными приборами опроса с последующим занесением в базу ИДС для обработки, интерпретации и анализа.

10.9 В программу натурных наблюдений должны быть включены указания относительно состава и порядка проведения визуальных наблюдений, являющихся одним из основных источников информации при определении критериальных значений $\tilde{K}1$ и $\tilde{K}2$ качественных диагностических показателей состояния ГТС. Особое внимание следует уделять контролю зон:

- сопряжения ГТС с основанием;
- сопряжения ГТС с берегами (береговые примыкания);
- сопряжения различных ГТС;
- приложения сосредоточенных нагрузок;
- переменного влажностного и температурного режима;
- изменения конфигурации ГТС, концентрации напряжений и пр.

11 Использование критериальных значений диагностических показателей при принятии решений по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений

11.1 Безопасность ГТС следует считать необеспеченной, если техническое состояние ГТС соответствует категории неработоспособное.

11.2 В случае наступления технического состояния, диагностируемого как частично работоспособное, при превышении одним или несколькими диагностическими показателями значений К1 или выхода диагностических показателей за пределы прогнозируемого при данном уровне нагрузок интервала значений следует организовать учащенные натурные наблюдения и выполнить внеочередную оценку состояния ГТС, включая проверку достоверности результатов вычислений с учетом действующих нагрузок и воздействий, достоверности показаний КИА, а также обоснованности принятого значения К1 для данного диагностического показателя.

Оценку состояния ГТС следует проводить с использованием данных натурных наблюдений, в том числе расчетным путем. При этом наряду с диагностическими показателями следует привлекать для анализа результаты измерений и вычислений других контролируемых показателей.

11.3 Собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация осуществляет с привлечением специализированной организации, участвовавшей в разработке критериев безопасности, оценку технического состояния ГТС в случае превышения диагностическими показателями критериальных значений уровня К1.

Если после выполненного анализа состояния ГТС подтверждается факт превышения первого (предупреждающего) уровня критериальных значений, собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация должны оповестить орган надзора о наступлении частично работоспособного состояния ГТС и принять оперативные меры по переводу ГТС в работоспособное состояние.

11.4 Превышение любым из диагностических показателей второго (предельного) уровня критериальных значений К2 следует считать признаком наступления технического состояния, соответствующего категории неработоспособное, при котором дальнейшая эксплуатация ГТС в проектных режимах недопустима.

С наступлением данного состояния собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация должны известить об этом надзорные органы и незамедлительно приступить к проведению мероприятий по восстановлению требуемой категории технического состояния.

До восстановления требуемой категории технического состояния ГТС должны быть введены ограничения на режим эксплуатации ГТС (например, вплоть до понижения УВБ). Все мероприятия по восстановлению работоспособного состояния и ограничения на режим эксплуатации ГТС необходимо выполнять в установленном законодательством порядке.

При наступлении неработоспособного состояния ГТС, а также если значения диагностических показателей состояния отклоняются от границ прогнозируемого интервала с возрастающей интенсивностью, свидетельствуя о быстром развитии деструктивных процессов, собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация должны в соответствии с Федеральным законом [1] осуществлять взаимодействие по вопросам предупреждения аварий ГТС с органом управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям; незамедлительно информировать об угрозе аварии ГТС региональные органы надзора за безопасностью ГТС, другие заинтересованные государственные органы, органы местного самоуправления и в случае непосредственной угрозы прорыва напорного фронта осуществлять оповещение согласно схеме, имеющейся на объекте.

11.5 С целью выявления причин превышения критериальных значений уровня К2, уточнения технического состояния ГТС и разработки рекомендаций по обеспечению безопасности ГТС, собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация должны сформировать экспертную комиссию с привлечением эксплуатационного персонала, специализированной организации, участвовавшей в разработке критериев безопасности, при необходимости — проектной организации, а также представителей федеральных органов, уполномоченных в области экологического, технологического и атомного надзора, Министерства по чрезвычайным ситуациям.

Задачами работы комиссии являются разработка перечня первоочередных мероприятий по обеспечению безопасности ГТС и осуществление контроля их исполнения.

Приложение А
(обязательное)

Перечень основных контролируемых количественных и качественных диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений

А.1 При оценке состояния эксплуатируемых ГТС из грунтовых материалов надлежит контролировать следующие количественные диагностические показатели, определяемые в процессе проведения инструментальных наблюдений:

- осадки и горизонтальные смещения характерных точек ГТС и (или) его основания;
- напряжения и относительные деформации в теле ГТС и (или) в его основании;
- отметки депрессионной поверхности в ГТС и в его береговых примыканиях;
- пьезометрические напоры и их расчетные градиенты в теле ГТС;
- поровое давление и интенсивность его рассеивания в элементах ГТС;
- фильтрационные расходы воды, поступающей в дренажные устройства;
- интенсивность суффозионного выноса грунта в дренажные устройства ГТС;
- распределение температуры грунтов в теле ГТС и на поверхности его низового откоса, а также их сезонные и многолетние изменения во времени (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне, в соответствии с СП 131.13330).

А.2 Визуальному контролю и экспертной оценке подлежат следующие качественные диагностические показатели состояния ГТС из грунтовых материалов, характеризующие наличие деструктивных процессов:

- появление и развитие во времени просадок, мест пучения грунтов, оползней и других нештатных деформаций на поверхности ГТС и его береговых примыканиях;
- возникновение и развитие во времени криволинейных трещин на гребне ГТС;
- появление и развитие во времени повреждениий волнозащитных креплений откосов ГТС, приводящее к нарушению защитной функции креплений;
- оползни (в том числе локальные) на откосах ГТС и береговых склонах;
- возникновение полостей и каверн в теле ГТС и в его основании;
- засорение, зарастание, перемерзание дренажных устройств в теле ГТС;
- появление очагов фильтрации и намокание низовых откосов и береговых примыканий, появление новых ключей и грифонов;
- образование наледей на откосах, у дренажей, на береговых склонах;
- наличие и изменения во времени мутности воды, фильтрующей через ГТС;
- механические повреждения, трещинообразование и выщелачивание бетона в элементах галерей, потерн и иных подземных сооружений в теле ГТС;
- протечки воды и суффозионный вынос грунта через швы бетонных потерн и галерей в теле плотины;
- появление и развитие во времени засорения русел каналов.

А.3 Для оценки состояния эксплуатируемых бетонных и железобетонных ГТС необходимо контролировать следующие количественные (измеряемые с помощью технических средств и вычисляемые на основе измерений) показатели:

- вертикальные и горизонтальные смещения и деформации ГТС, их оснований (в пределах активной зоны) и приконтактной зоны;
- деформации и напряжения в ГТС и их основаниях (бетон, арматура, скала, грунт и другие);
- деформации и напряжения на контакте бетонных ГТС с основанием, с различного рода засыпками и земляными сооружениями;
- параметры сейсмических колебаний оснований и динамической реакции ГТС;
- взаимные смещения по межсекционным швам бетонных и железобетонных ГТС;
- раскрытие трещин, межблочных швов в бетонных и железобетонных ГТС;
- глубину распространения трещины по контакту бетонной плотины со скальным основанием;
- углы поворота характерных сечений бетонных и железобетонных ГТС;
- фильтрационный расход воды (суммарный и по отдельным участкам ГТС и их оснований), поступающий в дренажные устройства и подземные выработки или выходящий на дневную поверхность;
- пьезометрические напоры и их градиенты в теле ГТС, основании и береговых примыканиях;
- фильтрационное давление на подошвы бетонных ГТС;
- температура и химический состав профильтровавшейся воды;
- температура ГТС и их оснований в приконтактной зоне (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне).

А.4 Визуальному контролю и экспертной оценке подлежат следующие качественные диагностические показатели состояния эксплуатируемых бетонных и железобетонных ГТС, их оснований и береговых примыканий, характеризующие наличие деструктивных процессов:

- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени очагов обходной фильтрации в зоне сопряжения бетонной плотины с берегами;
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени признаков деформаций в зоне сопряжения бетонной плотины с берегами (трещин, просадок, оползней, воронок оседания и т. п.);
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени признаков деформаций береговых откосов в нижнем бьефе;
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени высачивания воды и намокания береговых откосов в нижнем бьефе в результате водопроявлений природных источников (ключей), появление мутности воды природных источников;
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени фильтрационных проявлений в галереях и на низовой грани плотины, нарушение сезонного характера водопроявлений;
- работоспособность затворов, кранов и другого механического и грузоподъемного оборудования;
- работоспособность дренажных устройств в основании ГТС, в бетонной кладке;
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени трещин и других повреждений на бетонных поверхностях несущих элементов ГТС, свидетельствующих о развитии недопустимых напряжений или нарушающих статическую работу конструкций (значительные по площади повреждения защитного слоя бетона с оголением рабочей арматуры, развитые трещины, сквозные трещины, трещины со струйной фильтрацией, трещины большой протяженности, развивающиеся во времени трещины);
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени механических повреждений элементов водосбросного тракта, способных привести к ограничению пропуска расчетных расходов;
- возникновение в ходе эксплуатации и развитие во времени трещин и других повреждений, в том числе язвенной коррозии внутренней металлической облицовки напорных турбинных водоводов (в ходе периодических плановых обследований по утвержденному графику);
- появление и развитие во времени засорения бетонных элементов сооружений деривации.

А.5 Для оценки состояния ГТС необходимо контролировать также действующие на сооружение нагрузки и воздействия, с учетом которых назначены количественные критерии безопасности, к числу которых согласно ГОСТ 27751 относятся:

- гидростатическое давление со стороны верхнего и нижнего бьефов (уровни воды, графики наполнения и сработки водохранилища);
- температура окружающих ГТС сред (воздуха, воды);
- давление наносов (их уровень и механические характеристики);
- воздействие льда на ГТС и механическое оборудование;
- динамические воздействия на ГТС (от сбрасываемого потока воды, работы гидроагрегатов, железнодорожного и автомобильного транспорта, промышленных взрывов);
- сейсмические воздействия (динамические перемещения, скорости, ускорения основания во время сейсмособытия).

А.6 Перечни, приведенные в А.1—А.5, не являются неизменными и исчерпывающими и должны уточняться и дополняться для каждого конкретного ГТС с учетом наличия и состояния КИА, природных условий, класса и конструктивных особенностей ГТС и условий эксплуатации.

Приложение Б
(обязательное)

Методы определения критериев безопасности гидротехнических сооружений

Таблица Б.1

Диагностический показатель	Методы определения значений K1 и K2
1 Отметки депрессионной поверхности в теле ГТС из грунтовых материалов	Аналитические методы расчета безнапорной фильтрации в ГТС из грунтовых материалов и напорной фильтрации в основаниях, с определением значений пьезометрических напоров и расходов. Методы расчета показателей фильтрационного режима ГТС и их оснований с использованием численных компьютерных программ по определению основных показателей фильтрационных процессов. На стадии эксплуатации критериальные значения K1 и K2 уточняют с использованием натурных данных и по созданным по ним статистическим прогнозным моделям
2 Пьезометрические напоры в теле ГТС и в основании	
3 Градиенты напора в теле ГТС и в основании	
4 Удельные расходы фильтрации через тело и основание ГТС	
5 Избыточное поровое давление и скорость его рассеивания в теле ГТС из грунтовых материалов и в основании	Расчеты НДС тела ГТС и их основания с учетом консолидации в их грунтовых элементах с использованием численных компьютерных программ
6 Осадки элементов ГТС и его основания	Расчеты НДС, прочности и устойчивости элементов ГТС и их оснований с использованием численных компьютерных программ, созданных на базе методов механики сплошных сред, теории упругости, а также теорий пластичности и ползучести. На стадии эксплуатации критерии безопасности уточняют поверочными расчетами с использованием расчетных моделей, «откалиброванных» по данным натурных наблюдений, а также на основании статистических прогнозных моделей
7 Смещения элементов ГТС и его основания	
8 Напряжения и деформации ГТС и их оснований	
9 Трещины в противофильтрационных устройствах	
10 Углы поворота характерных сечений бетонных и железобетонных ГТС	
11 Раскрытие трещин и межблочных швов бетонных и железобетонных ГТС	Расчеты по предельным состояниям второй группы по ГОСТ 27751, выполненные в соответствии с указаниями СП 58.13330.2019. Численные методы расчета НДС с учетом образования и раскрытия трещин
12 Взаимное смещение секций по швам бетонных и железобетонных ГТС	Определение допустимого взаимного смещения секций по швам относительно друг друга из условия сохранения герметичности шпонок. На стадии эксплуатации — использование статистических моделей
13 Температура и (или) температурный градиент в системе «сооружение — основание» (для бетонных ГТС и возводимых в северной климатической зоне ГТС из грунтовых материалов)	Расчеты термонапряженного состояния ГТС и их оснований численными методами. На стадии эксплуатации критериальные значения показателя уточняют посредством расчета с учетом реального температурного режима окружающей среды
14 Параметры динамической реакции сооружений на сейсмические воздействия (на ГТС класса I[1)], расположенные в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на ГТС класса II[1)] в районах с сейсмичностью 8 баллов)	Расчет сейсмостойкости ГТС численными методами согласно СП 358.1325800.2017
[1)] Классификация ГТС в соответствии с СП 58.13330.2019.	

Приложение В
(справочное)

Изменения во времени основных диагностических показателей гидротехнических сооружений из грунтовых материалов

В.1 Для ГТС из грунтовых материалов характерны три следующих типа кривых изменений во времени основных диагностических показателей: нормальные, аномальные и аварийные. В качестве примера на рисунке В.1 схематично показаны типичные графики изменений во времени диагностических показателей осадок элементов ГТС.

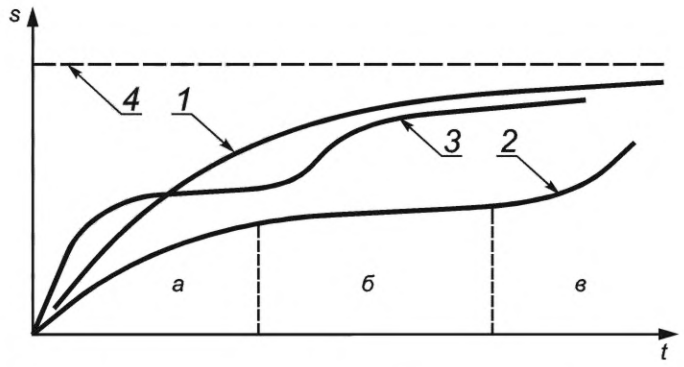


Рисунок В.1 — Характерные кривые изменений во времени основных диагностических показателей ГТС из грунтовых материалов

Как видно из рисунка В.1, для кривых типа 1 изменений во времени значений осадок элементов ГТС характерно плавное затухание интенсивности приращений этих диагностических показателей. Кривые этого типа, считающиеся нормальными, стремятся к асимптотам, соответствующим предельным значениям этих показателей.

В.2 В этих случаях, при отсутствии исходных данных, достаточных для создания достоверной детерминистической расчетной модели, значения критериев безопасности допустимо определять с использованием статистической прогнозной модели. При этом в качестве простейшей прогнозной модели возможно использование следующей аппроксимирующей зависимости:

$$\pm S_t = \pm S^* \cdot \left(\frac{t_i}{T_o + t_i} \right), \qquad \text{(В.1)}$$

где S_t — прогнозное значение диагностического показателя на любой момент времени t_i;

S^* — предельное значение этого диагностического показателя;

T_o — временной параметр.

В.3 Кривые типа 2, соответствующие прогрессирующему во времени увеличению приращений значений рассматриваемого диагностического показателя, считаются аварийными, поскольку они неизбежно ведут к наступлению предельного состояния ГТС.

В.4 Кривые типа 3 соответствуют аномальному характеру изменений во времени данных диагностических показателей. В этом случае на величины приращений диагностических показателей во времени, по всей видимости, влияли некоторые другие факторы, не учтенные в анализе натурных данных. Такими факторами могут быть проявления ползучести грунтов, сезонные изменения их температурного состояния, влажности, характеристик их механических свойств и др.

Приложение Г
(справочное)

Изменения во времени основных диагностических показателей бетонных гидротехнических сооружений

Г.1 Кроме сравнения измеренных диагностических показателей с их критериальными значениями К1, К2 в процессе контроля технического состояния ГТС обязательна проверка тенденции изменения временных рядов диагностических показателей (вычисление их трендов).

Г.2 Оценка изменения значений диагностических показателей во времени выполняется на основе анализа характера поведения невязки между измеренными и расчетными значениями.

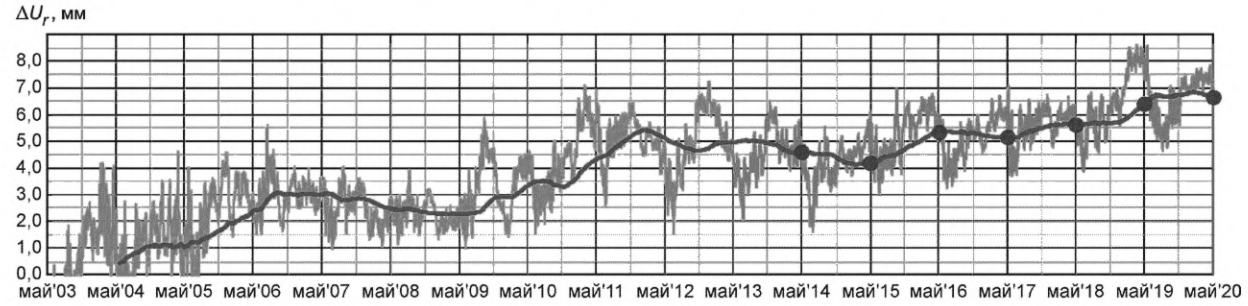
Г.3 ГТС считают работоспособным при нормальном ходе изменения во времени диагностических показателей его состояния, когда скорости изменения диагностических показателей пренебрежимо малы или затухают во времени.

Г.4 Ниже в качестве иллюстрации приведен алгоритм оценки необратимых изменений во времени радиальных смещений гребня центральной секции бетонной арочно-гравитационной плотины.

Шаг 1. Выполняют расчеты плотины методом конечных элементов, в результате которых получают расчетные перемещения гребня плотины.

Шаг 2. На основе полученных расчетных данных вычисляют невязку (разность) между измеренными и расчетными перемещениями гребня плотины. При этом допускается использование смешанной модели с подбором регрессионных коэффициентов.

Шаг 3. Строится линейный тренд невязки либо скользящее среднее от невязки либо применяют алгоритм монотонной (изотонной) регрессии (см. рисунки Г.1, Г.2).

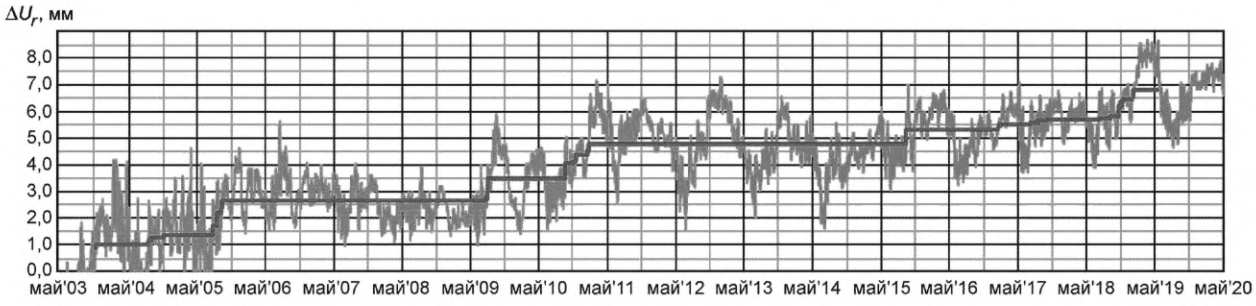


– хронограмма погрешности (отклонение натурных данных от расчета);

– годичное скользящее среднее от погрешности;

– величина скользящего среднего на 1 мая очередного года

Рисунок Г.1 — Отклонение натурных данных от расчетных в радиальных перемещениях гребня центральной секции бетонной арочно-гравитационной плотины, мм



– хронограмма погрешности (отклонение натурных данных от расчета);

– монотонная регрессия от погрешности

Рисунок Г.2 — Отклонение натурных данных от расчетных в радиальных перемещениях гребня центральной секции бетонной арочно-гравитационной плотины, мм

Шаг 4. Определяют приращение необратимого перемещения гребня за рассмотренный временной промежуток. Выполняют оценку найденной величины.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Особенности прогнозных моделей гидротехнических сооружений из грунтовых материалов

Д.1 Детерминистические расчетные модели ГТС из грунтовых материалов

Д.1.1 Как было указано в 6.4, основными видами физических процессов, происходящих в ГТС из грунтовых материалов, являются деформирование грунтов, фильтрация воды через поры грунтов и обусловленный этим теплоперенос.

Д.1.2 На стадии проектирования ГТС из грунтовых материалов для их характерных сечений в рамках детерминистических расчетных моделей надлежит определять детерминированные значения следующих диагностических показателей:

- напряжения и деформации грунтов основных конструктивных элементов ГТС, а также места возможного образования в них нарушений сплошности;
- величины осадок и горизонтальных смещений дневной поверхности ГТС в его расчетных сечениях при различных значениях нагрузок и внешних воздействий;
- величины фильтрационных расходов через тело ГТС и его основание, а также градиенты напора и фильтрационную прочность грунтов системы «сооружение — основание»;
- распределение температуры грунтов системы «сооружение — основание» и закономерности ее сезонных изменений (для ГТС, расположенных в северной строительно-климатической зоне, в соответствии с СП 131.13330.2020);
- прочность и устойчивость основных конструктивных элементов ГТС, разрушение которых приведет к невозможности эксплуатации всего сооружения в проектном режиме.

Д.1.3 Решение задач о НДС любых ГТС из грунтовых материалов надлежит выполнять численными методами (например, методом конечных элементов), реализуемыми с использованием современного программного обеспечения. В таких программах достаточно эффективно учитываются не только неоднородности строения оснований ГТС, но и различия их конструктивных элементов, нелинейность механических свойств грунтов, а также проявления их пластичности и ползучести.

Как правило, при решении задач о НДС ГТС из грунтовых материалов с использованием подобных программ одновременно определяются значения осадок и горизонтальных смещений элементов дневной поверхности ГТС и его основания, соответствующие принятой схеме нагружения системы «сооружение — основание».

Д.1.4 Решения задач о фильтрации в ГТС из грунтовых материалов и в их основаниях также надлежит выполнять численными методами с использованием соответствующего программного обеспечения.

По результатам решений подобных задач определяются не только фильтрационные расходы в теле ГТС и основании, но и градиенты фильтрационных напоров и фильтрационная прочность грунтов системы «сооружение — основание».

Д.1.5 В настоящее время при решении задач о температурном состоянии ГТС из грунтовых материалов, расположенных в северной строительно-климатической зоне, надлежит преимущественно использовать численные методы расчетов, в которых учитывают не только перенос тепла фильтрующей в теле ГТС водой, но и его количественные сезонные изменения, а также перенос тепла в элементах ГТС, сложенных пористым воздухопроницаемым строительным материалом в виде каменной наброски (как в упорных призмах ГТС, так и в креплении откосов).

Д.1.6 Коэффициенты устойчивости низовых и верховых откосов ГТС из грунтовых материалов, как правило, определяют традиционными способами оценки устойчивости откосных сооружений по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. Для получения значений этих диагностических показателей в основном используют численные методы вычислений, реализуемые с использованием современного компьютерного программного обеспечения. Расчетные значения коэффициентов устойчивости, умноженные на соответствующие значения коэффициентов надежности, как правило, принимают за детерминированные значения показателей, которые надлежит использовать в качестве диагностических.

Д.1.7 Отмеченные в Д.1.3—Д.1.6 особенности проведения расчетов по определению детерминированных значений характеристик НДС, фильтрации и теплопереноса в ГТС из грунтовых материалов приводят к необходимости выполнения таких расчетов в специальных научно-исследовательских организациях.

Д.2 Статистические прогнозные модели диагностических показателей

Д.2.1 Как указано в 6.4.7.2, при неудовлетворительных результатах «калибровки» детерминистических моделей ГТС и наличии достаточно представительного временного ряда инструментальных наблюдений за диагностическими показателями состояния ГТС, а также при нормальном ходе их изменений во времени рекомендуется использовать статистические прогнозные модели изменений во времени диагностических показателей состояния ГТС.

Д.2.2 Построение статистических прогнозных моделей рекомендуется производить в следующей последовательности:

- из полученного в натурных наблюдениях ретроспективного ряда данных натурных измерений S_i формируют их базовую последовательность; при этом в базовую последовательность не должны включать данные, относящиеся к явно ошибочным или случайным событиям (например, полученным при нагрузках, превышающих их реальные пределы, или при возможных изменениях физико-механических характеристик грунтов тела и основания ГТС);

- выбирают прогнозирующую функцию F базовой последовательности натурных данных; например, в случае осадок или смещений грунтовой плотины эта функция может быть принята в виде линейного многочлена $S_{for} = F(t, h, \theta)$ с неизвестными значениями коэффициентов, зависящих от трех аргументов (наиболее важных внешних воздействий), таких как: t — время, отсчитываемое от начала измерений; h — гидростатический напор на плотину, θ — температура окружающей среды;

- по данным натурных наблюдений формируют систему линейных алгебраических уравнений, полученных из натурных данных; матрица этой системы, как правило, имеет существенно большее количество строк (соответственно числу значений t) в сравнении с количеством неопределенных коэффициентов многочлена $S_{for} = F(t, h, \theta)$;

- полученная система линейных уравнений является существенно переопределенной, для решения которой могут быть использованы либо метод наименьших квадратов, либо метод Гаусса;

- оценка значимости каждого из коэффициентов многочлена t, h, θ на величину значений S_{for}, в ходе которой следует выполнить тестовый расчет по аппроксимирующей зависимости с вариативным изменением значений каждого из них. Сопоставление полученных результатов позволяет исключить слабо влияющие коэффициенты из базовой последовательности значений S_i;

- по результатам сопоставления фактических значений S_i (оставшихся в базовой последовательности) и расчетных прогнозных значений S_{for} определяют погрешность прогноза δ по формуле

$$\delta = k\sigma,$$

где σ — среднеквадратическая погрешность прогноза;

$k = 1,2, 3$ — целые числа, при этом следует иметь в виду, что при $k = 3$ вероятность попадания значений S_{for} в интервал $S_{for} \pm \delta$ составляет 99 %, поэтому при назначении критериальных значений не следует использовать значения $k \geq 3$;

- построенную статистическую (регрессионную) модель проверяют на данных натурных измерений, не вошедших в базовую последовательность и (в случае необходимости) осуществляют корректировку значений коэффициентов многочлена модели;

- на каждом этапе такой корректировки надлежит учитывать все натурные данные, полученные к моменту проведения корректировки модели.

Приложение Е
(рекомендуемое)

Особенности прогнозных моделей бетонных гидротехнических сооружений

Е.1 Детерминистические расчетные модели бетонных ГТС

Е.1.1 Основными видами физических процессов, происходящих в бетонных ГТС, являются изменение под действием эксплуатационных нагрузок температурного и фильтрационного режимов системы «сооружение — основание» и НДС системы. Ход этих процессов сопровождается изменениями соответствующих им показателей состояния ГТС, которые надлежит использовать в качестве диагностических.

Е.1.2 На стадии проектирования бетонных и железобетонных ГТС в рамках детерминистических расчетных моделей должны быть определены детерминированные значения следующих диагностических показателей:

- прочности и устойчивости системы «сооружение — основание»;
- напряжений и деформаций в бетоне и арматуре (при наличии соответствующей КИА);
- вертикальных смещений (осадки) ГТС и их оснований;
- горизонтальных смещений (по потоку) контролируемых точек ГТС;
- распределений и изменений во времени температуры бетона ГТС и грунта основания под действием эксплуатационных температурных воздействий при квазистационарном режиме;
- градиента напора на цементационной завесе в основании бетонной плотины;
- устойчивости ГТС в целом или его основных элементов (например, анкерных опор шпунтовых подпорных стен).

Е.1.3 Детерминистические расчеты ГТС выполняются в соответствии с ГОСТ 27751 и должны удовлетворять требованиям (критериям), соответствующим предельным состояниям первой и второй групп предельных состояний по ГОСТ 27751:

- первая группа предельных состояний — состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной расчетной ситуации;
- вторая группа предельных состояний — состояния, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация строительных конструкций, исчерпывается ресурс их долговечности или нарушаются условия комфортности.

Для оценки возможности наступления предельных состояний первой группы выполняют расчеты общей прочности и устойчивости системы «сооружение — основание», прочности отдельных элементов ГТС, разрушение которых может привести к прекращению его эксплуатации; расчеты деформаций конструкции, от которых зависит прочность и устойчивость ГТС в целом и др.

Для оценки возможности наступления предельных состояний второй группы выполняют расчеты местной прочности оснований, расчеты деформаций, расчеты по образованию или раскрытию трещин и строительных швов, расчеты прочности отдельных элементов ГТС, не подлежащих расчету по оценке возможности наступления предельных состояний первой группы.

При расчетах общей прочности и устойчивости ГТС, а также местной прочности отдельных элементов должно выполняться следующее условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний:

$$\gamma_n \gamma_{lc} F \le \gamma_{cd} R, \qquad (Е.1)$$

где γ_n — коэффициент надежности по назначению ГТС,

γ_{lc} — коэффициент сочетания нагрузок,

γ_{cd} — коэффициент условий работы, принимаемые согласно СП 58.13330.2019;

F — расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или другого параметра, по которому выполняют оценку предельного состояния;

R — расчетное значение обобщенной несущей способности, деформации или другого параметра (при расчетах по первой группе предельных состояний — расчетное значение; при расчетах по второй группе предельных состояний — нормативное значение).

Е.1.4 На стадии эксплуатации ГТС выполняют калибровку (идентификацию параметров) расчетной детерминистической модели — уточнение физико-механических характеристик материалов ГТС и основания с целью наилучшего приближения данных расчета к результатам натурных измерений, накопленным в процессе эксплуатации.

Можно выделить три основные группы методов и частных приемов решения задач параметрической идентификации:

- так называемые «прямые методы» или более точно — методы обращения решения прямой задачи. В них результаты наблюдений подставляют непосредственно в математическую модель, после чего посредством проведения различных преобразований выражают неизвестные параметры;
- различные методы «подбора», которые сводятся к решению серии прямых задач при варьировании значений параметров и сопоставлении соответствующих расчетных и экспериментальных значений. Результаты могут

быть представлены в виде графиков, таблиц, номограмм и т. п., используемых в дальнейшем для оценки параметров модели по имеющимся экспериментальным данным;

- различные экстремальные методы, основанные на минимизации невязки между расчетными и экспериментальными значениями. Наиболее часто условие качества решения рассматривают в виде критерия наименьших квадратов, когда минимизируется среднеквадратическое отклонение идентифицируемых параметров от измеренных значений.

Например, последовательность действий при использовании наиболее часто применяемой процедуры калибровки детерминистической расчетной модели методом подбора изложена в 7.8.

Е.1.5 Решение задач о НДС системы «сооружение — основание» с целью определения величин *F* силовых воздействий (сил, моментов, напряжений) надлежит выполнять численными методами (например, методом конечных элементов), реализуемыми на компьютерах с использованием современного программного обеспечения.

Е.2 Статистические прогнозные модели диагностических показателей бетонных ГТС

Е.2.1 Условия применения статистических (регрессионных) моделей для прогноза значений диагностических показателей состояния ГТС изложены в 7.11.

Е.2.2 Последовательность построения статистической модели определена в 7.12.

Е.2.3 Требования по форме представления статистической модели в эксплуатирующую организацию установлены в 7.13.

Е.2.4 Получение корректных прогнозных оценок параметров состояния ГТС с помощью статистических (регрессионных) моделей возможно только в случаях, когда входные параметры расчета находятся в пределах области разброса данных, на основе которых построена данная модель. Для экстраполяции за пределы данной области необходимы дополнительные исследования по оценке тенденций изменения соответствующего контролируемого показателя.

Е.2.5 Примеры построения статистических прогнозных моделей горизонтальных смещений (по потоку) бетонных плотин

При построении статистических прогнозных моделей учитывают, что закономерности изменения во времени смещений тела бетонной плотины (так же как и напряжений в бетоне напорной грани) характеризуют определенную схему статической работы плотины и ее конструктивных элементов. Контролируемые параметры зависят как от действующих факторов (гидростатическое давление, температурный режим), так и от монолитности сечения секций (наличие трещин, раскрытых горизонтальных строительных швов, качество цементации межстолбчатых швов).

Работа бетонной плотины в период постоянной эксплуатации (после наполнения водохранилища проектных уровней УВБ, завершения всех работ по омоноличиванию профиля и завершения процесса остывания бетона плотины и достижения квазистационарного температурного режима) определяется главным образом УВБ и сезонным изменением температуры окружающего воздуха.

Результаты статистической обработки данных натурных наблюдений за диагностическими показателями (горизонтальными смещениями плотины, наклонами горизонтальных сечений, напряжениями на напорной грани и т. п.) представляют в виде стохастических регрессионных моделей, устанавливающих связь между величиной контролируемых показателей и действующих на ГТС факторов.

Горизонтальные смещения плотины по потоку являются одним из основных показателей работы системы «плотина — основание» в период постоянной эксплуатации.

При построении прогнозных моделей в качестве силовой нагрузки используется гидростатическая нагрузка на напорную грань плотины, зависящая от УВБ. Температурное влияние моделируется, как правило, с помощью температуры окружающего воздуха, измеренной в определенное время суток в одном и том же месте, максимально приближенном к створу плотины. При наличии достаточно представительного ряда достоверных данных о температурах бетона по данным измерений закладной дистанционной КИА используют температуры, измеренные в бетоне плотины.

Пример 1. Прогнозная регрессионная модель горизонтальных смещений (по потоку) станционной секции бетонной гравитационной плотины

Ниже приведена модель, описывающая горизонтальные смещения (по потоку) станционной секции гравитационной бетонной плотины:

$$U_r = a_0 + a_1 \cdot H + a_2 \cdot H^2 + a_3 \cdot T_{ср_45} + a_4 \cdot T_{ср_30} \cdot H + a_5 \cdot H_{ср_30} + a_6 \cdot H_{ср_150}, \qquad (Е.2)$$

где U_r — *расчетная величина смещений;*

a_0—a_6 — *коэффициенты модели;*

H = *УВБ минус 220 м на дату, на которую вычисляется перемещение;*

$T_{ср_45}$ — *средняя температура за предыдущие 45 дней к дате, на которую вычисляется перемещение;*

$T_{ср_30}$ — *то же за предыдущие 30 дней;*

$H_{ср_30}$ — *среднее значение УВБ минус 220 м за предыдущие 30 дней к дате, на которую вычисляется смещение;*

$H_{ср_150}$— *то же за 150 дней.*

Коэффициенты модели получены на основании статистической обработки данных многолетних наблюдений за смещениями плотины (отклонениями от вертикали, проведенной через неподвижную точку в основании), измеренными с помощью геодезической КИА (прямых и обратных отвесов), УВБ и температурами воздуха с использованием специального пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений. При построении модели использовались сглаженные данные о смещениях.

Коэффициенты моделей, отличные для разных отметок, и величины среднеквадратического отклонения σ_U приведены в таблице Е.1. Графики смещений по данным наблюдений и полученных по модели приведены на рисунке Е.1.

Таблица Е.1 — Параметры модели горизонтальных смещений (по потоку) станционной секции гравитационной бетонной плотины

Отметка, м	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	σ_U, мм
172,00	4,808	0,225	–0,0014	–0,0688	0,0026	–0,1231	0,1191	0,19
190,00	5,306	0,291	–0,0013	–0,1091	0,0035	–0,1744	0,1995	0,29

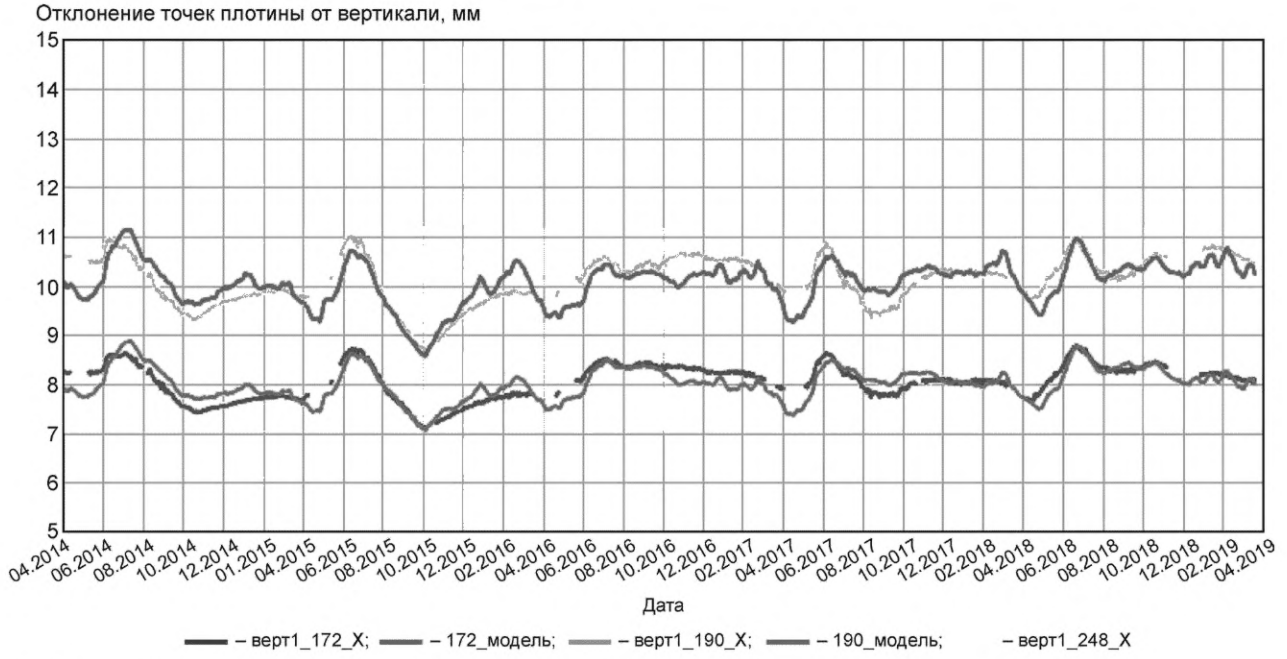


Рисунок Е.1 — Графики горизонтальных смещений станционной секции гравитационной бетонной плотины, построенные по данным натурных наблюдений по отвесам и полученные по прогнозным регрессионным моделям

При построении прогнозных регрессионных моделей горизонтальных смещений (по потоку) гравитационной плотины следует учитывать, что оголовки глухих, водосливных и станционных секций, в силу конструктивных особенностей, имеют различные температурные режимы и не отражают характер НДС плотины в целом.

Пример 2. Прогнозная модель горизонтальных (радиальных) смещений ключевой секции арочной бетонной плотины

Модель, аппроксимирующая результаты измерений радиальных смещений ключевой секции арочной плотины, имеет следующий вид:

$$U_r = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot H + a_3 \cdot T + a_4 \cdot \cos(2\pi \cdot t/365) + a_5 \cdot \sin(6\pi \cdot t/365), \qquad (Е.3)$$

где U_r — расчетная величина смещений, мм;

a_0—a_5 — коэффициенты модели (Н — УВБ), м;

T — значение температуры бетона плотины, °С, определенное по показаниям двух датчиков ПТС-60, расположенных на отметке 141,50 м на расстоянии 1,2 и 1,4 м от напорной грани;

t — время в сутках, отсчитываемое от начальной даты периода обработки данных (параметр, отвечающий за цикличность наблюдений).

Коэффициенты модели радиальных смещений гребня арочной бетонной плотины, полученные на основании обработки данных наблюдений (с января 2002 г.), и величина среднеквадратического отклонения σ_U приведены в таблице Е.2.

Таблица Е.2 — Коэффициенты модели горизонтальных (радиальных) смещений по потоку ключевой секции арочной бетонной плотины

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	σ_U, мм
–18	–0,0002267	0,1641	–0,351	4,424	0,4122	1,1

Графики измеренных смещений (Uizm) гребня, расчетных значений смещений (U_r) и значений $U_r \pm 3\sigma$, определяющих коридор, в пределах которого должны находиться измеренные значения смещений, приведены на рисунке Е.2.

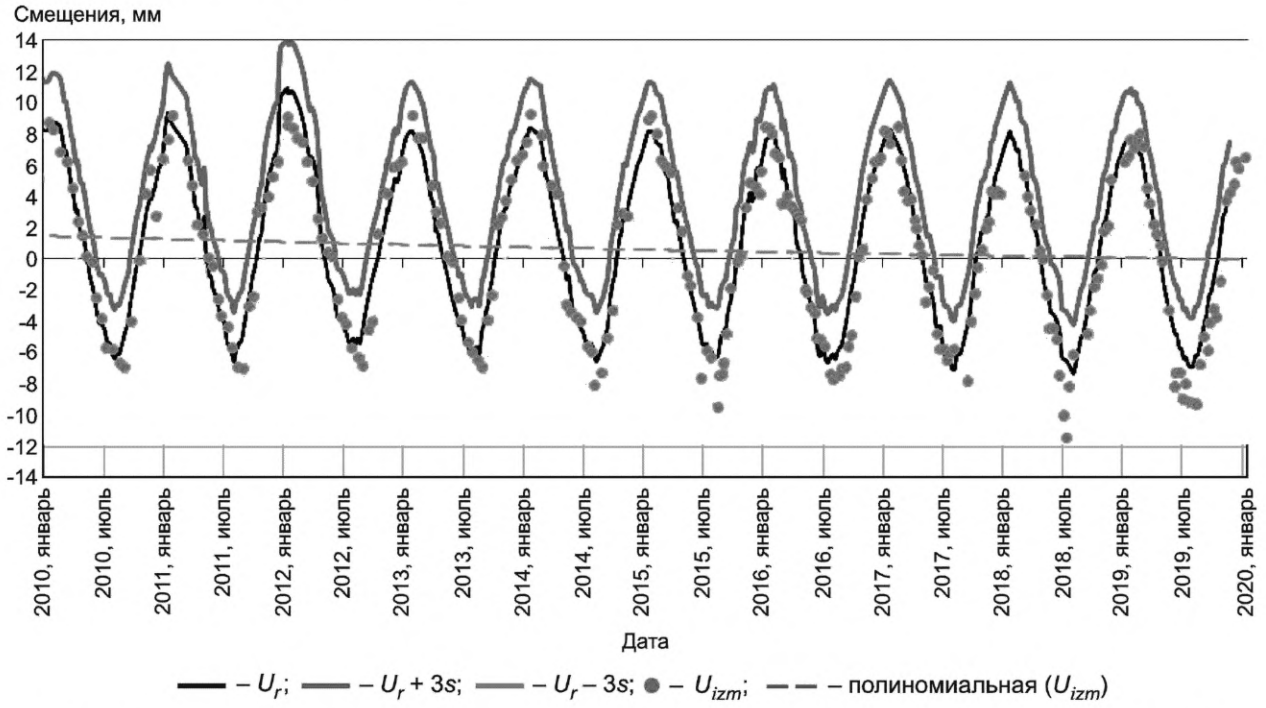


Рисунок Е.2 — Графики измеренных перемещений (U_{izm}) гребня, расчетных значений перемещений (U_r) и значений $U_r \pm 3\sigma$, определяющих коридор, в пределах которого должны находиться измеренные значения перемещений

Смещения плотины, измеренные по показаниям отвесов, следует сравнивать с расчетными смещениями U_r, полученными с помощью прогнозной модели. Измеренные величины перемещений должны находиться в пределах интервала: $U_{izm} = U_r \pm 3\sigma$.

При увеличении расхождения между измеренными и посчитанными по прогнозной модели значениями перемещений необходимо проведение анализа для выяснения причин отмеченного явления и оценки его влияния на безопасность ГТС.

Как видно из рисунка Е.2, наблюдается тенденция крайне незначительного необратимого смещения гребня в верхний бьеф (за последние 10 лет меньше, чем на 2 мм), при этом наблюдается затухание скорости изменения смещения.

Библиография

[1] Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений»

[2] Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

УДК 621.22:006.354 ОКС 27.140

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, обеспечение безопасности, критерии безопасности, техническое состояние, контролируемые показатели, диагностические показатели

Редактор *З.Н. Киселева*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 26.11.2021. Подписано в печать 21.12.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,34.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru