

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 5
**АНАЛИЗ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ ОТКАЗОВ**

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПЕРЕДОВОЙ ПРАКТИКИ ПО
БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОТИН



THE WORLD BANK
IBRD • IDA | WORLD BANK GROUP



GWSP
GLOBAL WATER
SECURITY & SANITATION
PARTNERSHIP

О Глобальной Практике по Водным Ресурсам

Начавшая свою деятельность в 2014 году, Глобальная Практика по Водным Ресурсам группы Всемирного Банка в рамках единой платформы объединяет механизмы финансирования, управление знаниями и механизмы реализации. Объединяя глобальные знания Банка с инвестициями в страны, эта модель создает больше экономического потенциала для преобразовательных решений, с целью оказания помощи странам в устойчивом росте.

Посетите нашу веб-страницу по адресу www.worldbank.org/water или следите за нашими новостями в социальной сети Twitter по адресу [@WorldBankWater](https://twitter.com/WorldBankWater).

О Глобальном Партнерстве в области Водной Безопасности и Санитарии (GWSP)

Данная публикация стала возможной благодаря поддержке Глобального партнерства в области водной безопасности и санитарии (GWSP). GWSP – это многосторонний донорский трастовый фонд, администрируемый Глобальной практикой Всемирного банка по водным ресурсам и финансируемый Министерством иностранных дел и торговли Австралии, Федеральным министерством финансов Австрии, Фондом Билла и Мелинды Гейтс, Министерством иностранных дел Дании, Министерством иностранных дел Нидерландов, Министерством экономических отношений и цифровой трансформации Испании (MINECO), Шведским агентством международного сотрудничества и развития, Государственным секретариатом Правительства Швейцарии по экономическим вопросам, Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству, и Агентством США по Международному Развитию.

Посетите нашу веб-страницу по адресу www.worldbank.org/gwsp или следите за нашими новостями в социальной сети Twitter по адресу [@TheGwsp](https://twitter.com/TheGwsp).

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 5
**АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ ОТКАЗОВ**

© 2023 Международный Банк Реконструкции и Развития / Всемирный Банк

1818 H Street NW, Washington, DC 20433

Телефон: 202-473-1000; веб-сайт: www.worldbank.org

Данный документ был первоначально опубликован Всемирным банком на английском языке в 2021 году. В случае расхождений преимущественную силу должен иметь исходный язык.

Данная публикация является результатом работы сотрудников Всемирного банка при участии сторонних организаций. Содержащиеся в настоящем документе выводы, толкования и заключения принадлежат его авторам и не обязательно отражают мнения Всемирного банка, его Совета Исполнительных Директоров или правительств, которые они представляют.

Всемирный банк не гарантирует точность данных, содержащихся в настоящей публикации. Национальные границы, цвета, обозначения и прочая информация, помещенная на картах в настоящей публикации, не являются выражением мнения Всемирного банка относительно юридического статуса какой-либо территории и не означают подтверждение или признание какой-либо территории таких границ.

Права и Разрешения

Материалы, содержащиеся в данной публикации, охраняются авторским правом. Поскольку Всемирный банк приветствует распространение своих публикаций, данная работа может быть воспроизведена полностью или частично в некоммерческих целях при условии указания полной ссылки на эту работу.

Данная Техническая Записка по Анализу Потенциальных Режимов Отказов является дополнительным документом к Рекомендации по применению передовой практики по Безопасности Плотины. Ссылка на данный документ должна оформляться следующим образом: World Bank. 2021. “Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 5: Potential Failure Mode Analysis.” World Bank, Washington, DC.

Любые вопросы относительно прав и лицензий, включая производственные права, следует направлять по адресу: Издательский Отдел Всемирного Банка, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA; факс: 202-522-2625; электронная почта: pubrights@worldbank.org.

Фотография на обложке: Многоцелевая плотина Виктория [Victoria] (Шри-Ланка) © Сатору Уэда (Satoru Ueda)/Всемирный Банк.

Дизайн обложки: Билл Праглуски, Critical Stages, LLC.

Техническая Записка 5: Анализ Потенциальных Режимов Отказов

Содержание

Определение и происхождение АПРО	1
Цели и применение АПРО	2
Критическая оценка АПРО после инцидента в Оровилле	4
Приложение А: Факторы, способствующие развитию ПРО	16
Приложение В: Пример АПРО (качественный анализ) для отдельной плотины	17
Приложение С: Пример АПРО (полуколичественного анализа) для отдельной плотины	19
Справочная литература	21
Дополнительная справочная литература	21

Определение и происхождение АПРО

Анализ потенциальных режимов отказов (АПРО) — это процесс систематического выявления, описания и оценки того, как плотина и вспомогательные сооружения могут выйти из строя или разрушиться при предполагаемых условиях нагрузки.

В соответствии с нормативными положениями¹ Федеральной Комиссии США по регулированию энергетики (FERC) с 2002 года АПРО стала применяться в рамках пятилетних инспекций для нефедеральных плотин гидроэнергетических комплексов в Соединенных Штатах. В главе 14 Руководства² FERC приводится подробное описание процедуры АПРО, включая основные цели и результаты, обзор исходной информации, инспекцию объекта, проведение семинаров с использованием «мозгового штурма» для определения и оценки потенциальных режимов отказов, последствий и мер по смягчению последствий.

В соответствии с АПРО собственники плотин должны провести качественную оценку риска для выявления Потенциальных Режимов Отказа (ПРО) и оценить необходимые восстановительные работы, приборы для мониторинга и прочие меры для снижения риска и повышения безопасности. В отличие от традиционных подходов, основанных на стандартах, АПРО создает основу для оценки эффективности безопасности плотины и предоставляет возможность для целенаправленного повышения безопасности плотины. Например, установка конкретных приборов для мониторинга или проведение периодических целевых инспекций плотины с целью выявления и предотвращения конкретных режимов разрушения.

¹ Согласно нормативным положениям:

- Part 12: Safety of Water Power Projects and Project Works—Subpart D: Inspection by Independent Consultant under the Code of Federal Regulations
- Title 18: Conservation of Power and Water Resources Chapter I: Federal Energy Regulatory Commission, Department of Energy—Subchapter B: Regulations Under the Federal Power Act.

² См. See <https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap14.pdf>.

АПРО может проводиться на нескольких уровнях. Существует несколько полезных руководств (см. справочную литературу), включающих АПРО и другие аналогичные методы³ оценки риска. В качестве дополнения к инженерному проектированию, основанному на стандартах, качественный или полуколичественный АПРО, скринингового или предварительного уровня, является ценным риск-ориентированным инструментом обеспечения безопасности плотины.

Цели и применение АПРО

Цель АПРО - дать понимание того, как и почему плотины разрушаются, путем изучения состояния плотины, определения возможных ранних признаков нарушения, понимания опасностей и рисков, связанных с плотинной, и формирования готовности к неожиданным изменениям, приводящим к разрушению.

АПРО может использоваться как при проектировании, так и при эксплуатации плотин для:

- Определения применимых ПРО
- Определения дополнительных защитных мер для снижения вероятности разрушения
- Определения ключевых параметров и обеспечения приборов для их мониторинга
- Разработки планов эксплуатации, инспекции, технического обслуживания и аварийной готовности с учетом ПРО

В ходе реализации крупных проектов водной инфраструктуры, таких как плотины и гидроэлектростанции, переход от строительства к эксплуатации часто является сложным этапом. Во многих случаях организация, которая принимает на себя эксплуатацию объекта, не является организацией, осуществлявшей надзор за строительными работами. Процесс прием-передачи подразумевает передачу значительного объема информации, включая элементы, относящиеся к управлению рисками, возникшими в ходе строительства и первого наполнения водохранилища. Семинар по АПРО особенно полезен при переходе от этапа строительства к этапу эксплуатации проекта плотины

Опыт Всемирного банка в поддержке применения АПРО для анализа безопасности крупных существующих плотин⁴ во многих странах, подтвердил полезность этого инструмента в определении приоритетов в проведении необходимых дополнительных изысканий и ремонтно-восстановительных работ в координации с основными заинтересованными сторонами, включая собственников, операторов и проектировщиков.

Данная Техническая записка содержит руководство по подготовке технического задания на АПРО для: (а) стандартного метода АПРО на основе FERC и (b) упрощенного метода АПРО. Последний может быть уместен для оптимизации времени и ресурсов или при ограниченном знании плотины, что является частой проблемой для

³ Другие аналогичные и не менее полезные методы качественного и полуколичественного анализа рисков включают анализ видов и последствий отказов и анализ видов, последствий и критичности отказов.

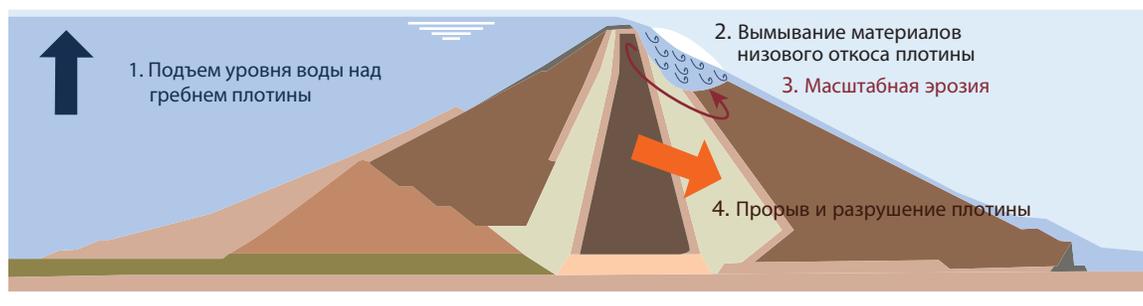
⁴ Плотины Легадади [Legadadi] и Дире [Dire] в Эфиопии; плотина Туямюн [Tuaymyun] в Узбекистане и Туркменистане; Вальдезия [Valdesia], Джигуэй [Jiguey], Агуакате [Aguacate] и Лас Барнас [Las Varias] в Доминиканской Республике; плотина Нурек [Nurek] в Таджикистане; плотина Джатилухур [Jatiluhur] в Индонезии; плотина Сва Чаунг [Swa Chaung] в Мьянме; и Поечос [Pochos] в Перу. Также в рамках программы безопасности плотин «Инициатива по бассейну Нила» Технический региональный офис Восточного Нила проводились тренинги по АПРО для четырех стран бассейна.

небольших и старых плотин. В зависимости от результатов, за упрощенным методом может последовать или не последовать полноценный АПРО. Также в записке представлено руководство по применению упрощенного АПРО к отдельной плотине и портфелю плотин.

На рисунке 1 приведен пример определения ПРО для перелива воды через гребень грунтовой плотины. Сильное наводнение, недостаточная пропускная способность водосбросов или невозможность открыть затворы водосбросов приводят к подъему уровня воды над гребнем плотины. Переливающийся через гребень поток вымывает материалы низового откоса плотины и вызывает масштабную эрозию, которая прогрессирует, приводя к неустойчивости откоса, прорыву и разрушению плотины.

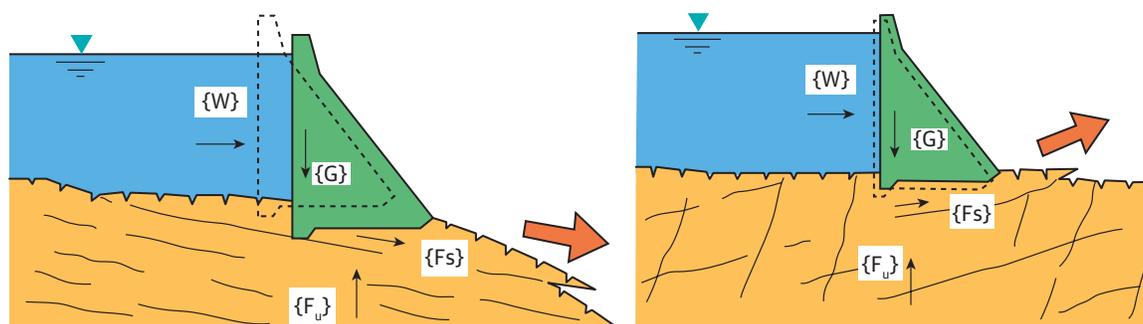
На рис. 2 приведен еще один пример ПРО бетонной гравитационной плотины при сдвиге в основании плотины по плоскости ослабления. Гравитационные плотины особенно чувствительны к гидростатическому противодействию, поэтому наличие плоскостей ослабления в основании должно подвергаться тщательной проверке. Небольшие деформации могут быть достаточными для возникновения разрушений при неблагоприятной направленности трещин в основании. В то же время выветривание основания и невыявленные зоны высокого противодействия являются проблемами, которые также необходимо тщательно рассмотреть.

РИСУНОК 1. Режим разрушения при переливе воды через гребень грунтовой плотины



Источник: CWC (2019).

РИСУНОК 2. Режим разрушения бетонной плотины при сдвиге основания по плоскости ослабления



Источник: Витке (2014)

Примечание: Fs = Сила Сдвига; Fu = Сила противодействия; G = Гравитационная сила; W = Давление воды.

Критическая оценка АПРО после инцидента в Оровилле

После аварийного инцидента с одновременным разрушением всех водосбросов плотины в калифорнийском Оровилле в феврале 2017 года FERC потребовала от Департамента водных ресурсов Калифорнии привлечь независимую судебно-экспертную группу для разработки выводов и заключений о причинах инцидента. Независимая судебно-экспертная группа пришла к выводу, что:

...несмотря на то, что АПРО является очень полезным инструментом, который, применим для большинства плотин, текущий метод АПРО может иметь сложности в правильной характеристике рисков для больших или сложных систем, в частности, в учете человеческих и эксплуатационных аспектов при авариях. Определяя режимы отказов как линейную цепь событий, можно столкнуться с тенденцией чрезмерного упрощения сложных режимов отказов, включающих многочисленные взаимодействия компонентов системы. Руководителям, принимающим решение, необходимо знать весь спектр рисков для безопасности плотины, возникающих в результате всех эксплуатационных аспектов, чтобы принять решение о соответствующих действиях по управлению этими рисками.

Кроме того, текущий метод АПРО не учитывает непосредственно, как более широкие организационные факторы, такие как культура, полномочия и порядок принятия решений, могут способствовать возникновению отказов. В таких ситуациях может возникнуть необходимость дополнить традиционный метод АПРО другими подходами, используемыми в различных отраслях, и позволяющими лучше учитывать эти сложности и операционные аспекты.

Метод АПРО, описанный в данной Технической записке, основан на процессе, определенном FERC, но он также дополнен рекомендациями, предложенными независимой судебно-экспертной группой, которые направлены на устранение или уменьшение недостатков первоначального метода АПРО.

Стандартный анализ потенциальных режимов отказов

Объем работ

Целью проведения АПРО является выявление ПРО, относящихся к плотине (плотинам), водосбросу, основанию, устоям и т. д., и оценка режимов отказов, имеющих достаточную значимость, и требующих постоянного внимания, наблюдение, мониторинг и исправление положения в случае необходимости. Этот процесс позволит определить возможности для снижения риска, необходимость проведения исследований или анализов, необходимость в средствах мониторинга и обследования для предотвращения развития ПРО.

Конкретная цель данного метода заключается в следующем:

- Повышение эффективности инспекций безопасности плотины, путем сосредоточения внимания на наиболее важных и проблемных аспектах, характерных для рассматриваемой плотины
- Определение ПРО, связанных с эксплуатацией, таких как неисправность/нарушение в работе водосбросных сооружений
- Рассмотрение опасностей, которые могут косвенно повлиять на плотину, например оползни в водохранилище

- Определение ПРО, связанных со структурой целостностью (например, сосредоточенная фильтрация), которые не рассматриваются стандартными аналитическими методами (например, анализ устойчивости склонов или сейсмичности).
- Совершенствование и оптимизация программы визуального наблюдения и мониторинга с помощью КИП
- Выявление недостатков или недочетов в данных, представлении данных, или анализе, необходимых для оценки безопасности плотины и каждого ПРО
- Содействие в определении наиболее эффективных мер по снижению риска, включая готовность к чрезвычайным ситуациям

Требования к проведению АПРО, следующие:

Сбор информации и данных об исследованиях и изысканиях, проектировании, строительстве, предыдущих оценках и анализах безопасности плотины, эксплуатационных записей, истории проведения ремонтных работ и их результативности. Все отчеты исследований и изысканий, относящиеся к текущей безопасности плотины, должны быть рассмотрены и изучены. Следует составить перечень данных и информации, доступных для изучения и рассмотрения в рамках АПРО, и включить их в последующий отчет по АПРО. Все документы необходимо предоставить до начала семинара, а также предусмотреть достаточное время для ознакомления с документацией. Такой подход позволяет участникам запросить дополнительную информацию, если документация неполная, а также сокращает продолжительность семинара.

Привлечение технических экспертов для посещения объекта с целью выявления ПРО, осмотра структурного и геологического состояния, проверки приборов, анализа эксплуатации, обсуждение потенциальных ПРО с собственниками и операторами плотины.

Необходимо изучить всю базовую информацию о плотине с целью получения ответов на следующие вопросы:

- Как может произойти разрушение данной плотины? (учитываются геология, нагрузки, состояние сооружения, а также прошлые и предполагаемые работы на объекте)
- Что произойдет, если плотина разрушится. Каковы будут последствия разрушения, учитывая количество людей, подвергающихся риску, экологический ущерб и экономические последствия?
- Как может произойти незапланированный сброс большого количества воды, даже если плотина не разрушится (например, неконтролируемое открытие затвора или оползневые волны в водохранилище)?
- Имеются ли в бассейне реки выше по течению другие водохранилища, которые могут представлять опасность для данной плотины?
- Осуществляется ли контроль выявленных ПРО с помощью визуального наблюдения или мониторинга с использованием КИП?
- Какие действия (оперативные или долгосрочные) могут быть предприняты для снижения вероятности разрушения плотины или незапланированного сброса воды, а также для смягчения последствий разрушения? Эти действия могут включать сбор данных, анализ или изыскания, эксплуатационные изменения, совершенствование системы связи, усиление мониторинга или меры по восстановлению сооружений.

В случае плотины с высоким риском или опасностью/последствиями рекомендуется сформировать рабочую группу из четырех, пяти или более человек (таблица 1) для проведения АПРО.

Помимо технических экспертов, в семинаре по АПРО также должны участвовать:

- Члены эксплуатирующей организации (основные действующие лица)
- Члены эксплуатирующих организаций других плотин, которые могут повлиять на работу плотины, для которой проводится АПРО
- Представители заинтересованных организаций и местных жителей

Методология семинара по АПРО

Посещение объекта нацелено на обеспечение: (а) общего представления о плотине и связанных с ней сооружений, и (б) изучения состояния плотины. Во время посещения объекта рекомендуется сделать фотоснимки в цифровом формате для использования на семинаре.

- Координатор должен определить основные необходимые данные для проведения сессии по анализу данных
- Рабочая группа АПРО должна быть разносторонней и в достаточной степени представлять все соответствующие технические дисциплины, задействованные в анализе, и обладать экспертными знаниями достаточного уровня.
- На семинарах по АПРО следует систематически определять ПРО для нормальных условий, и в условиях наводнений и землетрясений. Обычно участок (участки) плотины рассматривается как несколько дискретных компонентов и анализируется по одному. В случае сложных систем плотин рабочая группа по АПРО должна быть разделена на специализированные группы по различным компонентам системы, но должна быть установлена координация между группами для обеспечения адекватного изучения взаимодействия между компонентами.

ТАБЛИЦА 1. Состав рабочей группы для АПРО

Член рабочей группы АПРО	Основные задачи
Координатор - международный эксперт, знакомый с процессом АПРО	Обследование и осмотр объекта, направляет и помогает в проведении сессии АПРО
Независимый специалист по безопасности плотин - Международный эксперт по оценке безопасности плотин, знакомый с механизмами разрушения плотин	Обследование и осмотр объекта; предоставление экспертных рекомендаций для АПРО
Инженер-геолог/геотехнический инженер -национальный эксперт	Обследование и осмотр объекта, обеспечение конкретных сведений об объекте во время АПРО
Инженер-гидролог/гидротехник - национальный эксперт	Обследование и осмотр объекта, обеспечение конкретных сведений об объекте во время АПРО
Инженер-гидромеханик - национальный эксперт	Обследование и осмотр объекта, проведение испытаний и инспекций выпускных затворов и механизмов, систем управления и резервных систем

Источник: авторская таблица составленная для данной публикации

Примечание: АПРО = Анализ Потенциальных Режимов Отказов.

- ПРО и режим возникновения разрушений обсуждаются «мозговым штурмом» в команде специалистов, наиболее знакомых с проектированием, анализом, эксплуатацией и работой плотины. Отчеты должны включать выявленные ПРО, причины вероятного возникновения каждого ПРО и любые возможные действия, связанные с каждым режимом разрушения, способные помочь снизить риск (усиление мониторинга, расследование, анализ и устранение последствий).
- Если используется процесс голосования, следует включить квалификационные требования, необходимые для того, чтобы иметь возможность проголосовать за конкретные ПРО, и использовать тайное голосование, чтобы на участников не влияли голоса других. В качестве альтернативы, ПРО можно распределить по категориям на основе консенсуса, при этом, если не удастся достичь полного консенсуса, исключаящие мнения регистрируются соответствующим образом.
- Важно конкретно определить возможные внедрение или расширения мониторинга показателей для каждого ПРО и предоставить их на рассмотрение собственнику и инспекторам, проводящим периодические проверки.
- Описание ПРО должно быть легко интерпретируемым другими (например, «чрезмерное оседание, приводящее к поперечным трещинам по всей плотине и, при отсутствии соответствующих фильтров, к внутренней суффозии и разрушению из-за сосредоточенной фильтрации через ядро плотины»).
- Важно документировать анализ, записывая основные выводы и заключения, сделанные в ходе мозгового штурма. По итогам семинара составляется промежуточный отчет, содержащий результаты, полученные непосредственно в ходе семинара.

По ходу обсуждения рабочая группа готовит сводные таблицы. Эти таблицы включают ключевые параметры, относящиеся к следующим элементам:

- ПРО
- Сценарий развития/инициирующие события/последовательность/последствия
- Негативные факторы, повышающие вероятность ПФМ
- Позитивные факторы, снижающие вероятность возникновения ПРО
- Мониторинг/возможности снижения рисков/данные и анализ
- План действий в чрезвычайных ситуациях
- Вопросы, требующие принятия мер
- Определение категории ПРО

Категоризация ПРО осуществляется в соответствии с системой FERC (таблица 2).

Итоговые таблицы прилагаются в качестве приложений к отчету АПРО. По завершении работы над таблицами проводится круглый стол, в ходе которого все участники пересматривают основные выводы и заключения. Затем группа определяет приоритетность результатов.

ТАБЛИЦА 2. Категоризация потенциальных режимов отказов согласно Федеральной комиссии США по регулированию энергетики

Категория	Определение	Описание
I	Значимый ПРО	Возможность возникновения, величина последствий и вероятность неблагоприятных последствий значимое (ПРО физически возможен, выявлен существенный недостаток, условия обоснованы и заслуживают внимания).
II	Незначимый ПРО	Имеет меньшую значимость и вероятность, чем категория I
III	Некатегоризированный ПРО	Информации для принятия обоснованного решения недостаточно.
IV	Исключенный ПРО	Физической возможности возникновения не существует или вероятность настолько низкая, что не заслуживает внимания

Источник: FERC (2005)

Примечание: Во многих случаях решение принимает один человек, а может и два, но ответственность остается за рабочей группой АПРО. В таких случаях в отчете следует указать, кто именно и на каком основании исключил режим отказа. ПРО = Потенциальный Режим Отказа; АПРО = Анализ Потенциальных Режимов Отказа.

Итоговый отчет должен включать рекомендуемый план действий по выявленным корректирующим мерам, а также конкретные рекомендации по подготовке и совершенствованию планов обеспечения безопасности плотины, включая ПОКИА и ПАГ. Разработка или пересмотр матрицы уровней реагирования должна быть предусмотрена в совершенствовании ПАГ (см. типовой ПАГ в приложении 4 к РППП).

Последующие действия после АПРО

Рекомендации АПРО являются основой для изменений существующих и составления новых Планов Эксплуатации и Технического Обслуживания (ПЭиТО), в особенности рекомендации затрагивают планы наблюдений и мониторинга плотины. Также рекомендации АПРО способствуют собственнику и оператору в принятии обоснованных решений о необходимых мерах по устранению недостатков в конструкционных и неконструкционных элементах. Ниже приведены некоторые общие рекомендации по необходимым последующим действиям.

Дополнительное изучение и усиленный мониторинг

ПРО категории III может потребовать больше информации на основе дополнительного наблюдения, изысканий и анализа для оценки потенциальных рисков и потенциальных мер. Собственнику также может потребоваться усилить регулярный мониторинг и ввести ряд дополнительных КИП мониторинга для конкретных зон, в которых были выявлены потенциальные проблемы безопасности.

Приоритеты в обслуживании и ремонте

В случае ПРО категории II собственнику может быть рекомендовано рассмотреть вопрос о проведении приоритетных работ по техническому обслуживанию и ремонту, а также усилению контроля и мониторинга плотины. Это требование может также повлечь за собой изменения в ПЭиТО плотины, включая возможное снижение МПУ водохранилища.

Рекомендации по принятию решений о ремонтно-восстановительных работах

Для ПРО категории I собственнику может потребоваться оценить срочность и приоритетность ремонтно-восстановительных для использования ограниченных средств на наиболее важные

ремонтно-восстановительные работы. Также будет необходимость в обновлении ПАГ, в частности, матрицы уровней реагирования (см. Приложении 4 к РППП), и в организации взаимодействия с управлением по чрезвычайным ситуациям и другими заинтересованными сторонами, включая работы по обучению, оповещению и так далее. Кроме того, может потребоваться более детальная оценка рисков, позволяющая лицам, принимающим решения, принять обоснованное решение.

В таблице 3 также представлена общая матрица категорий рисков и потенциально необходимых действий. Хотя четыре категории срочности действий не соответствуют напрямую категориям с I по IV, таблица дает общее представление о необходимых действиях для устранения выявленных рисков в соответствии с их срочностью.

Длительность и ожидаемые результаты

Далее приведены ориентировочные сроки, необходимые для каждого этапа работ, однако следует учитывать сроки зависят от условий конкретного проекта:

- Сбор и изучение данных: одна неделя
- Посещение объекта: один день
- Семинар по АПРО: два дня (для сложных объектов может потребоваться больше времени)
- Подведение итогов семинара: один день
- Предварительный отчет: от трех дней до одной недели (или дольше в зависимости от объема информации)
- Заключительный доклад: два дня

ТАБЛИЦА 3. Категории риска и потенциально необходимые действия

Срочность действий	Определение	Потенциально необходимые действия
Очень высокая	Плотина критически близка к разрушению при нормальных условиях эксплуатации в течение нескольких лет или при наводнениях с периодом повторяемости менее 10 лет	Принятие срочных мер по снижению риска во избежание разрушения, оповещение населения о наличии риска, усиление мониторинга, обеспечение соблюдения ПАГ и т. д.
Высокая	Высокий риск (отказ может произойти при нормальной эксплуатации или инициирован чрезвычайным событием (например, землетрясением или наводнением) меньше расчетной величины)	Принятие временных мер по снижению риска, проведение ускоренных расследований и изучений, усиление мониторинга, обеспечение соблюдения ПАГ и т. д.
Приоритетная	Умеренный риск (значительные и неприемлемые проблемы безопасности плотины)	Определение приоритетов детального расследования, оценки риска, предлагаемых поэтапных мер по восстановлению и т. д.
Обычная	Существенных проблем с безопасностью плотины не выявлено	Обеспечение регулярного наблюдения, мониторинга и программы периодической оценки безопасности и т. д.

Источник: авторская таблица составленная для данной публикации

Примечание: ПАГ = План Аварийной Готовности.

Ожидаемые результаты включают:

- Архив технических данных, предварительная версия с указанием содержания и выявленных недостатков
- Предварительный отчет по итогам семинара АПРО, содержащий анализ и основные выводы и заключения, сделанные в ходе мозгового штурма
- Итоговый отчет, включающий план действий, рекомендации по составлению или дополнению планов обеспечения безопасности плотин (в частности, матрицы уровней реагирования в ПАГ), а также рекомендации по обучению операторов плотин и других заинтересованных сторон.

Приложение В содержит пример АПРО для отдельной плотины, включая перечень выявленных ПРО и ПРО категории I, требующих более детального анализа, расследования и ремонтно-восстановительных работ.

Упрощенный АПРО

В ряде случаев необходимо или целесообразно провести быструю оценку ПРО в соответствии с общими принципами FERC, но с оптимизацией времени и ресурсов. Такая оценка приводит к упрощению процессов, легитимность которых может зависеть от количества и качества доступной информации. Упрощенный АПРО может быть использован в сочетании с системой индексов риска для оценки риска и определения приоритетности действий для портфеля плотин.

Далее описываются две упрощенные процедуры⁵ АПРО для применения к:

- Отдельной плотине
- Портфелю плотин

Отдельная плотина

Упрощенное применение АПРО включает в себя три основных этапа:

- Посещение объекта и предварительное совещание с операторами и проектировщиками плотины для определения ПРО и проверки соответствующего ПРО состояния плотины
- Рассмотрение наиболее вероятных режимов отказа для данного типа плотины и присвоение баллов для каждого ПРО. Эти результаты могут быть использованы как составная часть системы индекса риска.
- Представление предположений и результатов оператору или проектировщику плотины для критического анализа и пересмотра результатов при необходимости

Для плотины из грунтовых материалов, глиняного ядра или плотины с каменной наброской верхового откоса, распространенными режимами разрушения (на основе исторических случаев разрушения плотин) являются:

⁵ Описанная методология основана на 2-м выпуске руководства пользователя Инструмента быстрой оценки плотин и определения приоритетов (DRAPT), подготовленной Damwatch Engineering Ltd (2018).

- Перелив через гребень плотины, размывающий откос плотины (в результате недостаточной пропускной способности водосброса)
- Суффозия или сосредоточенная фильтрация через основание
- Неустойчивость или образования трещин на откосах плотины
- Эксплуатационные проблемы, которые могут привести к разрушению (например, недостаточное техническое обслуживание или низкая квалификация операторов плотины)
- Геологические опасности (землетрясения и оползневая неустойчивость)

Эта информация в целом соответствует результатам анализа 232 случаев разрушения грунтовых плотин (рис. 3).

Для бетонной плотины распространенными режимами разрушения являются:

- Перелив через гребень плотины в результате наводнения, вызывающий эрозию низового зуба плотины
- Сдвиг в основании или подошве плотины по плоскости ослабления
- Конструктивное разрушение тела плотины
- Структурные разрушения тела плотины
- Эксплуатационные проблемы, которые могут привести к разрушению (например, недостаточное техническое обслуживание или низкая квалификация операторов плотины)
- Геологические опасности (землетрясения, оползневая неустойчивость, неустойчивость устоев)

РИСУНОК 3. Причины разрушения грунтовых плотин



Источник: МКБП (2019).

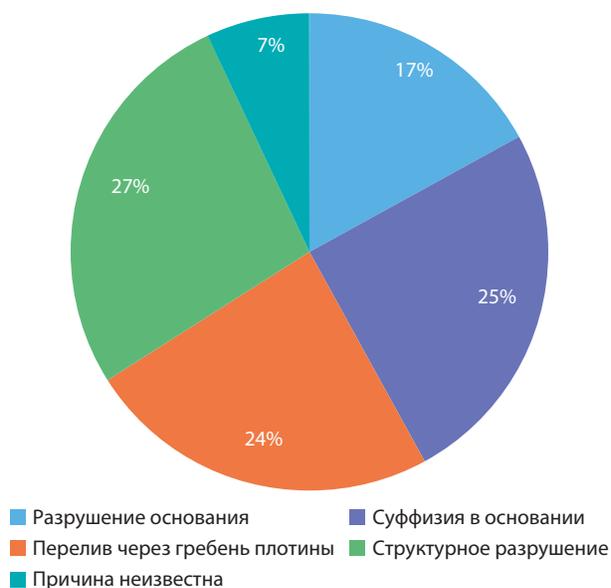
Эта информация также в полной мере соответствует результатам статистического анализа 59 случаев разрушения бетонных и каменных плотин (рис. 4).

Кроме того, члены группы оценки должны понимать, что отдельная плотина может иметь важный, но нетипичный режим разрушения, и процедура должна быть способна учитывать такую вариативность. Следует отметить, что перелив через гребень плотины в результате наводнения, требует определенного понимания характеристик водораздела и размеров водосброса плотины, необходимых для направления паводка через водохранилище.

Также важно выявить и оценить «скрытые» режимы разрушения, выходящие за рамки экстремального паводка. Например, отказ электромеханической системы, заклинивание затвора и т. д. при паводковом стоке, значительно меньшем расчетного, может повлечь гораздо больший риск, чем при паводковом стоке, превышающий расчетный.

Есть пример компании BC Hydro, которая провела оценку⁶ своих водосбросных сооружений (МКБП, 2015) и выявила ряд недостатков, способных вызвать отказ системы вследствие отказа одного элемента. Эти недостатки были связаны с: i) устареванием оборудования и увеличением риска отказа, ii) отсутствием постоянного технического обслуживания на протяжении длительного времени, iii) отсутствием достаточного объема и периодичности испытаний и несоответствующими процедурами испытаний, iv) ограниченным опытом эксплуатации и знаний резервных механизмов. В отчете также поднималась проблема безопасности, связанная с заклиниванием затворов, и был представлен анализ первопричин отказов затворов (см. Таблицу 4). Если бы эти эксплуатационные отказы имели место во время умеренного паводка, то риск перелива через гребень был бы высокий. Тем не менее, многие из этих эксплуатационных неполадок и причин отказов затворов трудно выявить с

РИСУНОК 4. Причины разрушения бетонных/каменных плотин



Источник: МКБП (2019).

⁶ Вопрос 97 - водосброс, 25-й конгресс МКБП в Ставангере, Норвегия, 2015 г.

ТАБЛИЦА 4. Коренные причины отказов затворов

Коренные причины отказов затворов	Количество рассмотренных случаев отказа	Доля (в процентах) причины отказа
Засор	10	27
Неисправность подъемного механизма	10	27
Сбой в работе (как правило, из-за перебоев в подаче электроэнергии)	9	24
Структурное разрушение	5	14
Заклинивание затвора	3	8
Итого:	37	100

Источник: Льюин и др. 2003

ТАБЛИЦА 5. Оценка способствующих факторов

Балл способствующих факторов	Количество рассмотренных случаев отказа
10	Способствующий фактор указывает, что потенциальный режим отказа начался, продолжается или, как предполагается, будет развиваться при нормальных условиях эксплуатации или расчетной нагрузки.
9	
8	
7	Способствующий фактор указывает на высокую вероятность развития или прогрессирования потенциального режима отказа при нормальных условиях эксплуатации или расчетной нагрузки.
6	
5	
4	Способствующий фактор указывает на то, что потенциальный режим отказа вряд ли будет развиваться или прогрессировать при нормальных условиях эксплуатации или расчетной нагрузки.
3	
2	
1	Способствующий фактор указывает на то, что вероятность развития или прогрессирования потенциального отказа при нормальных условиях эксплуатации или расчетной нагрузки очень мала .
0	Способствующий фактор не имеет отношения к развитию потенциального режима отказа

Источник: Damwatch Engineering Ltd. (2018)

помощью традиционного стандартного подхода, а вероятность их возникновения может быть более высокой в странах-заемщиках проектов, финансируемых Всемирным банком.

ПРО может оцениваться с помощью балльной системы, подобной той, что представлена в таблице 5. Более высокие баллы указывают на приоритетные меры, которые следует принять для улучшения ситуации. Более подробная информация о ПРО и факторах, способствующих их развитию, приведена в Приложении А: Факторы, способствующие развитию ПРО на основе наиболее распространенных пяти режимов разрушения грунтовых плотин.

Поскольку для проведения этих анализов необходимо инженерная оценка, для процесса потребуется высококвалифицированный эксперт по плотинам, который должен быть поддержан одним или несколькими экспертами в необходимых дисциплинах (проектирование, гидрология, геотехника и электромеханика инженерия). В таких условиях, анализ можно завершить за два-три дня.

Использование методов дерева событий или дерева неисправностей для оценки вероятности отказа

Как уже упоминалось, целями проведения АПРО являются: (а) выявление достоверных ПРО для конкретного объекта и (б) составление полного описания ПРО и последовательности стадий, ведущих к неконтролируемому выбросу воды из водохранилища. Оценка риска достигает последней цели, используя анализ дерева событий для определения вероятности отказа. При проведении данного анализа принципиальное значение имеет мнение эксплуатационного персонала, включая операторов и инспекторов плотины.

Приложение С содержит пример упрощенного АПРО для отдельной плотины, в котором для оценки вероятности отказа используется метод дерева событий (неисправностей).

Портфель плотин

ПРО для портфеля плотин также можно оценить с помощью ускоренного метода, описанного ранее для отдельных плотин. Такая оценка дает возможность выявить общие проблемы для всего портфеля и, следовательно, определить приоритетность наиболее срочных мер по восстановлению и избежать лишних вмешательств. Эффективность затрат на восстановление плотин может быть более высокой. Для достижения последовательности и снижения вероятности необъективности при выполнении оценки портфеля, по возможности, рекомендуется привлекать одну и ту же группу экспертов. Кроме того, при использовании экспертов в качестве наставников и инструкторов на нескольких плотинах создаст возможность наращивания потенциала местных специалистов.

Как уже упоминалось, этот портфельный подход (в рамках упрощенного АПРО) фокусируется на наиболее распространенных режимах отказов.

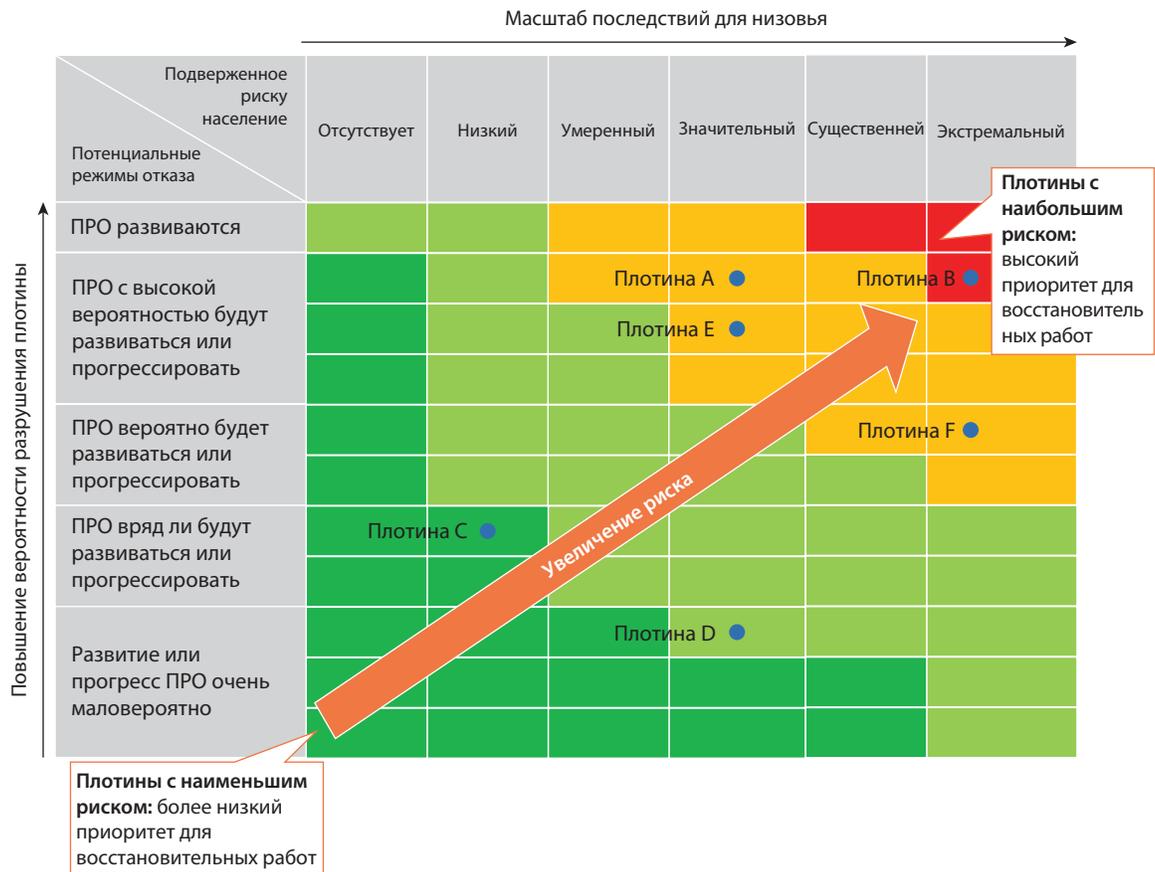
Оценка проводится группой экспертов в консультации с операторами и проектировщиками плотин. Процесс включает в себя присвоение баллов по шкале от 1 до 10 каждому фактору, способствующему возникновению ПРО. Баллы для каждого способствующего фактора присуждаются на основе инспектирования плотины, а также опыта и суждений эксперта. Эта система наиболее полезна в качестве дополнения к методу определения приоритетов по индексу риска, в рамках которого можно показать результаты по портфелю плотин (таблица 6). Таблица может также использоваться для представления каждой плотины более чем одной точкой, соответствующей различным режимам отказа. Величина последствий для низовья должна быть скорректирована в соответствии с местными условиями с использованием численности населения, подвергающегося риску, или возможных случаев со смертельным исходом и, возможно, с учетом других экономических, экологических и социальных факторов. В качестве примера, конечные результаты можно разделить на четыре группы от красной (наивысший риск) до зеленой (наименьший риск).

По сравнению с отдельной плотинной точностью оценки вероятности для портфеля плотин менее критична, поскольку относительных значений вероятности достаточно для оценки и управления портфельными рисками.

Ключевыми составляющими объема работ по АПРО являются:

- Организация «базы данных плотины», содержащей проектную документацию, протоколы испытаний и контролю качества в ходе строительства, записи контрольно-измерительных приборов и мониторинга, отчеты независимой оценки безопасности и т. д.

ТАБЛИЦА 6. Матрица классификации рисков



Источник: Damwatch Engineering Ltd. (2018)

Примечание: ПРО = Потенциальный Режим Отказа.

- Определение ПРО и выполнение необходимых последующих действий (см. предыдущий раздел «Последующие действия после АПРО»), включая пересмотр и обновление матрицы уровней реагирования (см. Приложении 4 к РППП).
- Предоставление рекомендаций по обновлению планов обеспечения безопасности плотины, в том числе для ПОКИА, ПЭИТО и ПАГ.
- Определение даты проведения следующего семинара по АПРО, которая определяется в зависимости от важности проекта и связанного с ним уровня опасности. Интервал может составлять до пяти лет, но иногда и до 10 лет.

Приложение А: Факторы, способствующие развитию ПРО

ТАБЛИЦА А.1. Примерный список факторов, способствующих развитию потенциальных режимов отказов

ПРО	Фактор, способствующий развитию ПРО в грунтовых плотинах	Максимальный балл способствующего фактора
Перелив воды через гребень плотины при наводнении	Недостаточная пропускная способность водосброса	10
	Уменьшение высоты превышения гребня плотины над уровнем воды по причине оседания или других изменений плотины	10
	Засорение водосброса	8
	Состояние водосбросных сооружений	8
Суффозия	Надежность затворов водосброса (если применимо)	8
	Суффозионный вынос грунта	10
	Неконтролируемая фильтрация	10
	Карстовые воронки и впадины	10
	Поверхностные трещины на гребне или в верховом откосе	10
	Суффозия песчаного грунта в русле нижнего бьефа	5
	Звериные норы	5
Устойчивость откосов	Разлагающиеся корни деревьев	5
	Вертикальное смещение (оседание), приводящее к нулевой высоте превышения гребня плотины над уровнем воды	10
	Горизонтальное смещение (боковая деформация)	5
	Разрушение верховых откосов (оползание и образование трещин)	8
	Разрушение низовых откосов (оползание и образование трещин)	8
Эксплуатация	Разрушение крепления откосов	6
	Ненадлежащее или недостаточное инспектирование плотины	6
	Ограниченный доступ к плотине для техники	6
	Физические изменения плотины, способные снизить безопасность или устойчивость плотины	8
	Частота визуальных осмотров плотины	4
Геология	Системы эксплуатации и технического обслуживания (включая план аварийной готовности)	4
	Сильные сейсмические колебания грунта приводят к неустойчивости плотины	5
	Сбросовый разрыв через плотину	4
	Сбросовый разрыв через водохранилище	3
	Оползни, попадающие в водохранилище, за которыми следует стоячие волны и перелив воды через гребень плотины	8
	Оползни и разрушения склонов и берегов в районе плотины или водосброса, способные нарушить конструкцию или привести к ее разрушению	6
	Геологические особенности основания плотины, воздействие которых может привести к разрушению плотины	6
Оползни или разрушения склонов, способные помешать доступу к плотине	4	

Источник: Damwatch Engineering Ltd. (2018)

Примечание: ПРО = Потенциальный Режим Отказа.

Приложение В: Пример АПРО (качественный анализ) для отдельной плотины

В данном примере группа экспертов, профессиональный координатор, собственник и оператор плотины и т. д. приняли участие в совместном посещении объекта и семинаре по АПРО. Сначала группа определила и классифицировала ПРО, составив расширенный список, представленный в таблице В.1, а затем сокращенный список, представленный в таблице В.2, учитывая следующее:

Определение и классификация ПРО:

- Нормальные условия и эксплуатационные события (нормальный уровень воды, структурная неустойчивость и т. д.)
- Развитие или ухудшение начавшихся событий (химическое воздействие щелочей на заполнитель бетона, коррозия, суффозия и так далее)
- События, связанные с паводковыми условиями (повышение уровня воды, пропускная способность водосброса, перелив воды через гребень плотины и так далее)
- События, инициированные землетрясением (во время и после землетрясения)
- Другие существенные условия (например, скопление мусора, заиливание, человеческий фактор и так далее)

Категории выявленных ПРО:

- Категория I - выделены как наиболее значимые и являющиеся обоснованными и достоверными
- Категория II - классифицируются как обоснованные ПРО, но имеют меньшую значимость и вероятность
- Категория III - Для классификации этих ПРО требуется больше информации и анализа
- Категория IV - исключенные ПРО. Являться физически невозможно или возможность настолько мала, что не может считаться достоверной

ТАБЛИЦА В.1. Расширенный список ПРО, составленный на основе мозгового штурма

События/категории	I	II	III	IV	Итого
При нормальных условиях	1	1	6	1	9
Связанные со старением		1	7		8
При наводнении	3		2		5
При землетрясении	2	1	4		7
Прочие условия			2		2
Итого	6	3	21	1	31

Примечание: - = отсутствует.

ТАБЛИЦА В.2. Сокращенный список идентифицированных категорий ПРО

События	Элемент	Потенциальный Режим Отказа	Потенциальные последствия
При нормальных условиях	Донные водовыпуски	Оползень в зонах примыкания, приводящий к разрушению туннеля донного водовыпуска и блокированию отводного канала в нижнем бьефе при нормальных условиях	Повышение уровня отводной воды, затопление машинного зала и прекращение выработки гидроэлектроэнергии Значительное снижение пропускной способности водосброса Перелив воды через гребень плотины при нормальном уровне притока
При наводнении	Поверхностный водосброс	Невозможность открыть один или несколько затворов водосброса в условиях, не превышающего расчетный приток, в результате электрической или механической неисправности	Перелив воды через гребень плотины при нормальном уровне притока
При наводнении	Поверхностный водосброс	Перелив через гребень плотины при превышении расчетного паводка даже когда доступны и работают все затворы	Водосбросные сооружения не рассчитаны на случай максимально возможного наводнения
При землетрясении	Отводной канал в нижнем бьефе	Блокирование отводного канала в результате оползня, вызванного землетрясением	Повышение уровня отводной воды, затопление машинного зала и прекращение выработки гидроэлектроэнергии Невозможность сброса воды из-за полной потери пропускной способности водосброса и переполнения плотины
При землетрясении	Донные водовыпуски и Поверхностный водосброс	Нарушение работы затворов водосброса из-за потери гидроэнергии или повреждения оборудования затворов	Перелив воды через гребень плотины при нормальном уровне притока из-за недоступности водосброса в течение длительного времени

Приложение С: Пример АПРО (полуколичественного анализа) для отдельной плотины

В данном примере группа экспертов, профессиональный координатор, собственник и оператор плотины и т. д. совместно провели посещение объекта и семинар по АПРО. Каждый ПРО был подвергнут анализу дерева событий для оценки относительных вероятностей и, исходя из этой оценки, определялись приоритеты и меры. Для привязки описательных категорий риска к значениям вероятности использовались условные обозначения, приведенные в таблице С.1.

Нижеприведенное дерево событий анализирует режим отказа с наибольшей вероятностью (рисунок С.1).

Результаты для других режимов отказа обобщены в таблице С.2.

Сравнение режимов разрушения отчетливо показывает, что ПРО1 (сосредоточенная фильтрация в зоне примыкания водосброса с ядром) влечет за собой самый высокий уровень риска. За ПРО1 следуют ПРО3, ПРО4 и, в меньшей степени, ПРО2. ПРО5 и ПРО6 представляют незначительный уровень риска по сравнению с остальными. С точки зрения безопасности плотины выводы, приведенные в таблице С.2, имеют следующие выводы:

- Незамедлительные действия должны быть направлены на снижение риска, связанного с ПРО1
- Необходимо срочно принять меры по снижению рисков, связанных с ПРО3 и ПРО4.
- Необходимы дальнейшие исследования для определения профилактических и восстановительных действий, применительно к ПРО2, 5 и 6.

ТАБЛИЦА С.1. Категории риска и значения вероятности

Категория	Диапазон вероятности (за год)
Незначительный	Почти 0
Очень низкий	$<10^{-4}$, за исключением 0
Низкий	10^{-3} до 10^{-4}
Средний	10^{-2} до 10^{-3}
Высокий	10^{-1} до 10^{-2}
Очень высокий	$> 10^{-1}$, но не 1
Неизбежный	1

РИСУНОК С.1 Анализ дерева событий для сосредоточенной фильтрации в зоне примыкания водосброса с ядром

Дескриптор	Сопутствующая вероятность
Практически неизбежный	0.999
Очень вероятный	0.99
Вероятный	0.9
Нейтральный	0.5
Маловероятный	0.1
Очень маловероятный	0.01
Практически невозможный	0.001

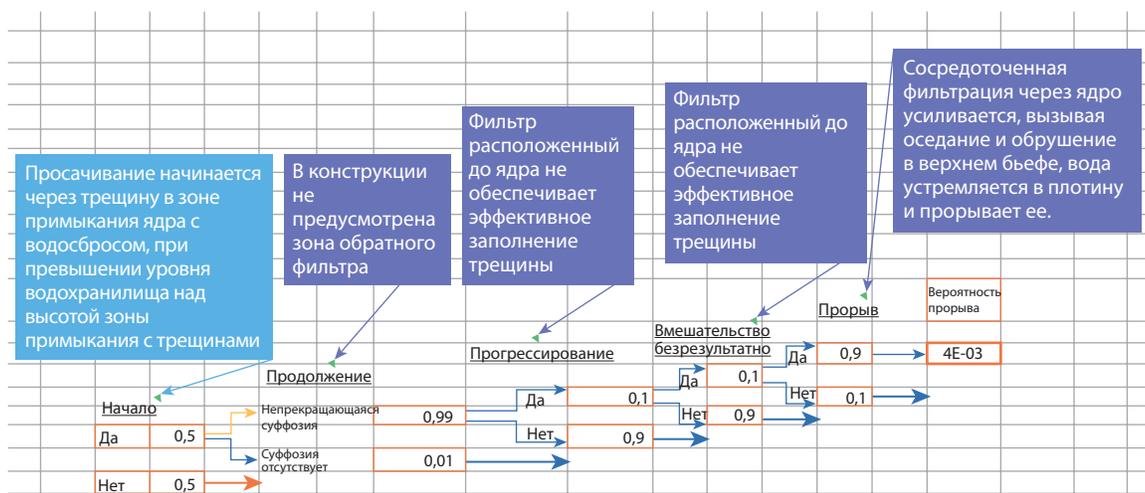


ТАБЛИЦА С.2. Дерево событий для наивысшего ПРО

	Потенциальные режимы отказа	Вероятность отказа	Уровень риска
ПРО1	Сосредоточенной фильтрации в зоне примыкания водосброса с ядром	4E-03	Средневысокий
ПРО2	Прогрессирующая суффозия ядра или основания	9E-06	Очень низкий
ПРО3	Обвальная волна, вызванная оползнем правого берега	2E-04	Низкий
ПРО4	Суффозия основания по причине разлома в зоне цементационной завесы	1E-04	Низкий
ПРО5	Блокирование водопропускных сооружений, вызванное оползнем правого берега	5E-07	Незначительный
ПРО6	Блокирование канала быстротока по причине камнепада	5E-07	Незначительный

Примечание: в некоторых случаях, когда в упражнении не участвуют эксперты, использование обратной вероятности отказа может быть более целесообразным.

Справочная литература

Central Water Commission (CWC), Ministry of Water Resources, Government of India. 2019. Guidelines for Assessing and Managing Risks Associated with Dams. GOI Central Water Commission (February).

Damwatch Engineering Ltd. 2018. Dam Rapid Assessment and Prioritisation Tool (draft) User Guide—Issue 2. Wellington: Damwatch Engineering Ltd.

FERC (U.S. Federal Energy Regulatory Commission). 2005. “Chapter 14: Dam Safety Performance Monitoring Program,” Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Washington, DC: FERC.

ICOLD (International Commission on Large Dams). 2019. Bulletin 188 (Preprint). Incident Database—Bulletin 99 Update: Statistical Analysis of Dam Failures (Final Draft, December). Paris: ICOLD.

ICOLD 25th Congress Proceeding. Stavanger. 2015. Question 97 – Spillways. Donnelly, R., General Reporter. Paris: ICOLD.

Lewin, J., G. Ballard, D. Bowles. Spillway Gate Reliability in the Context of Overall Dam Failure Risk, USSD Annual Guest Lecture, Charleston, South Carolina, 2003.

USBR-USACE (U.S. Bureau of Reclamation; U.S. Army Corps of Engineers). 2018. 2018 Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis. Washington, DC: USBR-USACE.

Witke, W., Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model. Berlin: Ernst & Sohn; 2014.

Дополнительная справочная литература

ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams). 2003. Guidelines on Risk Assessment 2003. Hobart, Australia: ANCOLD.

FEMA (U.S. Federal Emergency Management Agency). 2015. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. Washington, DC: FEMA.

ICOLD (International Commission on Large Dams). 2015. Bulletin 130: Risk Assessment in Dam Safety Management. Paris: ICOLD.

Montana Department of Natural Resources and Conservation. 2011. Dam Safety Program Technical Note 7: Guidelines for Conducting a Simplified Failure Mode Analysis for Montana Dams. Prepared by Hydrometrics, Inc. for Montana Department of Natural Resources and Conservation

SPANCOLD (Spanish National Committee on Large Dams). 2012. Risk Analysis as Applied to Management of Dam Safety. Technical Guide on Operation of Dams and Reservoirs. Vol. 1. Madrid: Professional Association of Civil Engineers. SPANCOLD.

