

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-327-336
УДК 626.627.03.42.0193

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методика анализа и оценки риска аварий гидросооружений

Ю.П. Ляпичев

ОА «Институт Гидропроект», Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 2
Международная комиссия по большим плотинам (СИГБ), 61 Kleber Ave., Paris, 75016, French Republic
lyapichev@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 15 марта 2019 г.
Доработана: 11 июня 2019 г.
Принята к публикации: 15 июля 2019 г.

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена произошедшими за последние 10 лет тяжелыми авариями на крупных ГЭС и плотинах в РФ (Саяно-Шушенская ГЭС, 2009), США (плотина Оровилл, 2018), Бразилии (дамба Брумадиньо, 2019), Колумбии (ГЭС Итуанго, 2018) и других странах, в связи с чем возникла необходимость совершенствования программ обеспечения безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) и плотин. **Методы** этой важной работы заключаются в разработке современной методики анализа и оценки риска аварий ГТС и плотин. Внедрение этого метода в программы обеспечения безопасности ГТС (плотин) в передовых в строительстве ГТС странах (Китай, Бразилия, Канада, США, Россия, Колумбия, Норвегия, Испания и др.) показывает, что, несмотря на ряд трудностей в применении анализа оценок риска аварий ГТС, этот подход приносит большую пользу при контроле безопасности ГТС и плотин. **Цель** статьи – ознакомить специалистов и инженеров-гидротехников с современной методикой анализа и оценки риска аварий ГТС и плотин и практическим ее применением в РФ.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения; ГТС; безопасность гидротехнических сооружений и плотин; оценка риска аварий гидротехнических сооружений и плотин; вероятность отказа

Для цитирования

Ляпичев Ю.П. Методика анализа и оценки риска аварий гидросооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. №. 4. С. 327–336. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-327-336>

Введение

В 2008 г. в рамках национального проекта «Образование» в Российском университете дружбы народов (РУДН) на кафедре гидравлики и гидротехнических сооружений была создана научно-учебная лаборатория (НУЛ) «Гидрологическая и техническая безопасность ГТС», а также учебно-методический комплекс (УМК) с этим же названием (разработчик УМК и научный руководитель

НУЛ – автор настоящей статьи). На основе УМК впервые в РФ был разработан новый учебный курс и подготовлено учебное пособие «Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений» [1] для магистров, обучающихся по специализации «Гидротехническое строительство» в РУДН и других вузах РФ.

К преимуществам методологии анализа и оценки риска аварий гидротехнических сооружений (ГТС) относятся:

- комплексность методологии, так как анализируются все причины и сценарии отказов и учитываются последствия аварий по всем сценариям;
- возможность учета факторов, не поддающихся количественной оценке (суффозия грунтов, человеческий фактор и др.);

Ляпичев Юрий Петрович, доктор технических наук, профессор, эксперт по зарубежным проектам АО «Институт Гидропроект»; член Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ).

© Ляпичев Ю.П., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

– возможность ранжирования опасностей для конкретного ГТС и его группы по уровню риска для населения, экономики и окружающей среды;

– ясность процесса анализа риска, позволяющая улучшить понимание особенностей ГТС и уровня его безопасности и выявить эффективные пути предупреждения аварий, локализации и ликвидации их последствий.

В России и за рубежом практика применения анализа риска аварий ГТС пока ограничена из-за отсутствия единого подхода к решению таких задач. Определенные затруднения при оценке риска связаны с вопросом о критериях приемлемого риска аварий ГТС, особенно риска для жизни людей.

1. Методика анализа и оценки риска аварий гидросооружений

В 2003 г. Международная комиссия по большим плотинам (СИГБ) выпустила Бюллетень № 130 «Оценка риска при контроле безопасности плотин», в котором сделан обзор используемых в анализе риска ГТС методов, их достоинств и недостатков [2]. По мнению авторов Бюллетеня, «в будущем развитии вероятностной количественной оценки риска заключен потенциал значительного повышения безопасности плотин».

СИГБ рекомендует оценивать риск в виде математического ожидания последствий наступления опасного события (как произведение вероятности этого события на математическое ожидание величины его последствий) или в виде сценария вероятностей событий и их последствий. Таким образом, риск зависит от вероятности аварии плотины и ее последствий и представляет собой большую величину, даже если эта вероятность очень мала.

Численные расчеты очень важны при идентификации механизма аварии, их анализ и оценку вероятностей реакции системы «плотина – основание – водохранилище» связывают со стохастическим методом Монте-Карло. В пособии РУДН рекомендуется использовать программы расчетов, такие как CADAM [3] и FLAC [4], для моделирования типов аварий плотин, включающих все типы скольжения (тело плотины, основание, контакт «основание – плотина» и др.), пластическое течение грунтов и трещинообразование бетона.

В настоящее время отмечается три уровня применимости анализа и оценок приемлемости риска при контроле безопасности ГТС [2]:

– в первой группе стран анализ риска аварий ГТС рекомендован и широко используется (например, в Норвегии, Канаде, Нидерландах, где регламентирован анализ риска аварий и разработаны критерии этого анализа);

– во второй группе стран ведутся исследования по безопасности ГТС, но имеются трудности в их применении (например, в Швеции и Испании анализ риска рекомендован, но применяется пока только к критическим ситуациям);

– в третьей, самой большой, группе стран (РФ, Франция, США, Англии и др.) принята позиция выжидания, анализ риска используют в промышленности, но пока не применяют к ГТС, за отдельными исключениями.

Анализ и оценка риска аварий ГТС в России регламентированы требованиями Федерального закона «О безопасности ГТС» и распространяются на плотины, здания ГЭС, водосбросы и водоспуски, туннели, каналы, судоходные шлюзы, сооружения для защиты от разрушений берегов водохранилищ и русел рек, защитные дамбы жидких отходов предприятий (хвостохранилищ), аварии которых могут привести к критической ситуации.

В 2003 г. в СНиП 33-01-2003 [5] были включены допускаемые значения вероятностей возникновения аварий на ГТС I–III классов: для I класса – $5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, для II – $5 \cdot 10^{-4}$ 1/год, для III – $2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

В 2000 г. АО ВНИИГ разработал «Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС», устанавливающие методические принципы, термины и определения анализа риска, требования к оформлению результатов и методы анализа риска аварий ГТС разных типов и классов [6]. В 2003 г. АО НИИЭС разработал «Методику оценки уровня безопасности ГТС» [7], использованную в учебном пособии РУДН [1].

Главная проблема при оценке риска аварий плотин заключается в ее адекватности ситуации принятия решения. При оценке риска следует учитывать, что он носит условный характер и определяется объективными и субъективными факторами. Адекватность оценки риска аварии плотины зависит от квалификации эксперта и его умения работать с этими факторами.

При оценке техногенного риска решаются следующие задачи (рис. 1).

1. *Задачи анализа риска*, в основе которых лежит идентификация опасностей и факторов риска, сводящаяся к выявлению опасных неконтролируемых обстоятельств и испытывающих опасные воздействия объектов риска. В анализе риска устанавливают причинно-следственные отношения между опасностями и факторами риска, воздействиями на ГТС и его ответными реакциями, а также потенциальные ущербы, оценивают вероятности их возникновения для последующей оценки риска.

2. *Задачи оценки риска*, среди которых различают задачи оценки приемлемости риска, задачи расчета (оценки количественных значений риска)

и задачи оценивания риска (проверки значений риска на допустимость).

3. *Задачи управления риском.* Одной из сложных задач исследований риска аварий ГТС является оценка его приемлемости. Расчеты риска ведут по принципу «лучше переоценить риск, чем его недооценить». Оценку приемлемого риска устанавливают согласно правилу практически обоснованного минимального риска (as low as reasonably practicable risk principle, ALARP).

Оценку риска аварий плотин можно проводить с использованием разных методов, учитывая априорную и апостериорную информацию, статистические данные о вероятностях реакций ГТС на воздействия. Специалисты часто не имеют возможности непосредственно применить вероятностные модели, на которых могут базироваться рациональные выводы. Среди основных сложностей можно отметить невозможность четко моделировать ряд форм аварий ГТС.

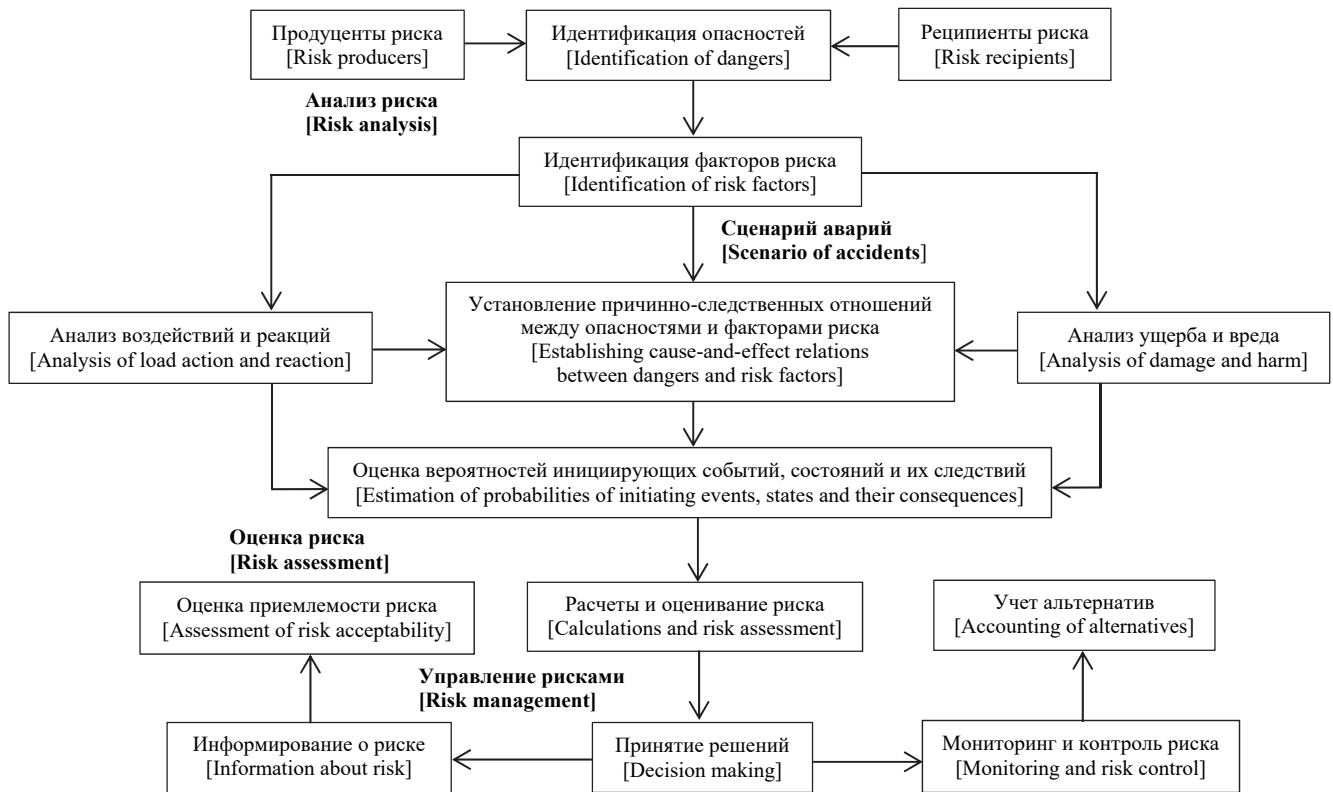


Рис. 1. Блок-схема основных задач исследований техногенного риска
[Figure 1. Flow chart of the principal tasks of technological risk studies]

Оценку риска аварий ГТС можно осуществлять как сопоставлением расчетных значений риска с допустимыми, так и выбором из возможных решений варианта, при котором риск минимизируется (согласно принципу ALARP).

Анализ и оценка риска связаны с анализом и оценкой техногенной безопасности. При этом риск выражают через вероятность аварии, которую рассматривают как количественный показатель безопасности, например, вероятность отказа – как показатель надежности.

Представление риска аварий в форме вероятности при оценке безопасности плотины оправдано. Для любого опасного воздействия (гидрологического, статического, сейсмического и т.п.), как правило, последствия аварии плотины могут силь-

но не отличаться. Нет больших отличий в том, из-за чего состоялся прорыв напорного фронта: из-за обрушения откоса плотины от землетрясения и разжижения грунтов, перелива воды из-за осадки гребня плотины, отказа водосбросов, заклинивания затворов, суффозии грунтов и др. Экологические и экономические последствия прорыва напорного фронта от этих причин могут быть близкими. Социальные последствия также могут быть близкими, особенно когда число жертв мало зависит от времени добегания волны прорыва. В этом случае оценка риска очень упрощается, так как можно не оценивать число потенциальных жертв, экономические и экологические потери. Это приемлемо и тогда, когда расхождение в вероятностях опасных событий отвечает расхождением соответ-

ствующих рисков и когда последствия аварии катастрофичны и их трудно оценить количественно.

Выбор метода анализа и оценки риска зависит от цели исследований риска. Объединение цели исследований риска с методом его анализа и оценки определяет перспективы оценки риска аварий плотин и использование результатов этих исследований на практике. Это могут быть задачи, связанные с раскрытием неопределенности, задачи оптимизации и выбора среди возможных решений вариантов с минимальным риском.

В вопросе раскрытия неопределенности оценка риска аварий плотин может проводиться для решения следующих задач:

- ранжирования опасностей и факторов риска с выявлением приоритетных. Риск тонко реагирует на изменчивость и неопределенность данных, широко изменяется, диагностируя проблемные факторы;

- исследования поведения ГТС с точки зрения изменчивости его реакций на случайные изменения внешних влияний и условий эксплуатации;

- обоснования потребности в дополнительной информации и исследованиях. Разные изменчивость и неопределенность факторов и параметров производят разные вклады этих факторов и параметров в общий риск аварий. Риск указывает на места, где неопределенность проявляется максимально;

- рассмотрения оценки риска аварий на плотинах как итерационного процесса, повторяющегося, когда поступает новая информация. Знание рисков помогает выявить альтернативы, снижающие идентифицированные риски с учетом ограниченности ресурсов для обеспечения безопасности. Выбор оптимального решения можно сделать с учетом приоритета рисков;

- модифицирования оценки риска согласно новым данным, установления новых определяющих факторов и параметров (рис. 2). Эффективность мероприятий, направленных на уменьшение риска, оценивается при сопоставлении рисков, прогнозируемых до и после внедрения соответствующих мероприятий. В таком виде оценка риска аварий плотин становится интегральной составляющей процесса обеспечения ее безопасности.

С учетом сложностей в анализе риска ГТС недостаток информации о ГТС заставляет специалистов использовать как количественные, так и качественные оценки уровня безопасности ГТС с применением экспертных суждений и статистических данных об авариях ГТС. Эти причины способствуют разнообразию приемов анализа и оценки риска аварий ГТС. Процедура анализа риска наиболее

эффективна, если ее осуществляет группа экспертов, представителей эксплуатирующего предприятия, проектировщиков ГТС, специалистов по гидрологии и устойчивости ГТС.

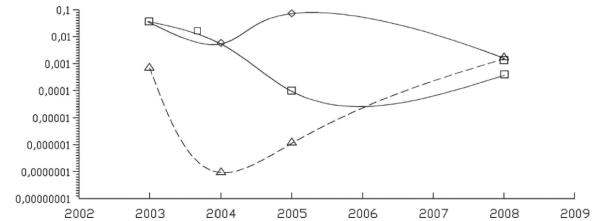


Рис. 2. Результаты расчетов вероятности аварии бетонной плотины Бурейской ГЭС при вводе ее в эксплуатацию в 2003–2008 гг.:
 ▲ – вероятность потери устойчивости плотины;
 ■ – вероятность перелива воды через плотину;
 ◆ – обобщенная вероятность аварии плотины

[Figure 2. Results of analyses of the probability of an accident of concrete dam of Bureya hydropower plant during its commissioning in 2003–2008
 ▲ – probability of stability loss of dam;
 ■ – probability of water overflow of dam;
 ◆ – generalized probability of dam accident]

Риск – динамическая характеристика опасности – сочетание частоты и последствий конкретного опасного события. Риск включает два элемента: ожидаемую частоту реализации опасного события и его последствия.

Анализ риска – процесс установления опасностей и оценки риска для отдельных лиц, имущества и окружающей природной среды, который заключается в использовании информации для установления опасностей и оценки риска, определенных по результатам идентификации аварий ГТС.

Идентификация опасности – процесс выявления существования опасности источника потенциального ущерба людям, имуществу и окружающей среде.

Вычисление риска – определение уровня риска анализируемой опасности для здоровья человека, имущества и окружающей среды. Вычисление риска включает анализ и количественную оценку частоты реализации опасного события, анализ и оценку последствий опасного события и их сочетание.

Оценка риска – процесс выработки решения, являются ли вычисленные риски приемлемыми, меры контроля за ГТС адекватными и, если это не так, какие дополнительные меры контроля требуются.

Допустимый риск – риск, уровень которого допустим, обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

2. Основные вопросы, на которые анализ риска должен давать ответы

Что плохого может произойти? – *Идентификация опасностей.*

Как часто это может случаться? – *Анализ частоты.*

Какие будут последствия? – *Анализ последствий.*

Приведены характеристики следующих методов анализа риска: 1) «Что будет, если?» (What if?); 2) проверочный лист (Check list); 3) анализ опасности и работоспособности ГТС (Hazard and operability study – HAZOP); 4) аварии ГТС и их последствия (Failure mode and effects – FMEA); 5) анализ аварий, их последствий и критических состояний ГТС (Failure mode, effects and critical analysis – FMESA); 6) анализ дерева отказов (Fault tree analysis – FTA); 7) анализ дерева событий (Event tree analysis – ETA).

Основные положения анализа и оценки риска распространяются на ГТС всех типов и классов. В пособии [1] представлены фрагменты реализации основных положений, ориентированных в первую очередь на грунтовые и водосбросные сооружения (Приложения 2, 5). Анализ риска бетонных плотин и накопителей промтоволнов, сооружений для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ можно выполнять согласно указаниям Приложений 1, 3, 6, которые могут быть дополнены настоящей методикой анализа количественной оценки риска аварий ГТС разных типов и классов.

Разнообразие методик показывает динамичность современного состояния проблемы анализа и оценки риска аварий ГТС в России и за рубежом. Сейчас, как отмечено в Бюллетене № 130 СИГБ [2], пока маловероятна единая методика анализа риска аварий ГТС. Более продуктивной является формулировка общих положений методики анализа и оценки риска аварии ГТС.

3. Области применения анализа риска аварий ГТС

На этапе размещения и проектирования ГТС:

– идентификация опасностей и сравнительная оценка риска аварий ГТС для различных проектных решений при обосновании оптимального варианта;

– обоснование приемлемости риска аварий проектируемого ГТС для персонала, населения, имущества и природной среды территории;

– подготовка информации для разработки инструкций по безопасности ГТС, планов ликвидации аварии и действий в чрезвычайных ситуациях;

– обоснование страховых тарифов и ставок для заключения договора страхования гражданской ответственности объекта – владельца ГТС.

На этапе эксплуатации и реконструкции ГТС:

– уточнение информации об основных опасностях (например, при изменении социально-экономической инфраструктуры в нижнем бьефе гидроузла);

– оценка соответствия состояния ГТС и условий его эксплуатации нормам;

– определение приоритетных мер по ремонту и реконструкции ГТС, обоснование эффективности затрат на ремонт и реконструкцию;

– уточнение страховых тарифов и ставок;

– тщательное расследование причин аварий и неполадок ГТС;

– разработка рекомендаций по организации безопасной эксплуатации ГТС, взаимодействию с органами надзора, лицензированию и т.д.;

– совершенствование планов локализации аварийных ситуаций и действий.

4. Методы анализа рисков

Эти методы еще не доступны для полностью количественного и тщательного анализа рисков для плотин. Сейчас структура анализа рисков может быть использована для обеспечения характеристики индекса рисков, являющихся частично научными и частично субъективными, с целью его применения при управлении безопасностью.

Имеется обширная литература по общим принципам анализа рисков, в частности, по анализу режимов разрушений (FMEA и FMESA), анализу дерева отказов и методам надежности. С другой стороны, недостаточно литературы по анализу дерева событий и другим аналитическим методам, таким как анализ последствий разрушения плотины, необходимый для анализа рисков. В настоящее время проводятся исследования, направленные на развитие необходимых знаний и содействие развитию анализа рисков.

Хотя существует много способов, с помощью которых базовая методика может быть применена к инженерным системам, а также способ, в котором выходные данные включены в более широкие исследования риска и надежности, используются две определенные методики: FMEA и FMESA (режим разрушения, последствия и анализ критичности). Большое различие между этими двумя приложениями в том, что первое касается только понимания диапазона и влияния режимов разрушения системы, а второе перечисляет сведения о вероятности возникновения и последствия для каждого режима разрушения. Это позволяет ранжировать различные события в порядке присвоен-

ного рейтинга риска. Главные принципы FMEA и FMESA являются общими для международных стандартов и будут понятны и приемлемы для широкого круга международных экспертов риска.

Анализ дерева событий (ETA) – это методика, качественная или количественная, которая используется для определения возможных результатов и,

если требуется, их вероятностей, учитывая возникновение исходного события. ETA – это индуктивный режим анализа, отвечающий на вопрос «Что произойдет, если...?». Например, «Что произойдет, если будет высокий приток в водохранилище (ВБ)?» Пример дерева событий для одного режима разрушения плотины от паводка представлен на рис. 3.

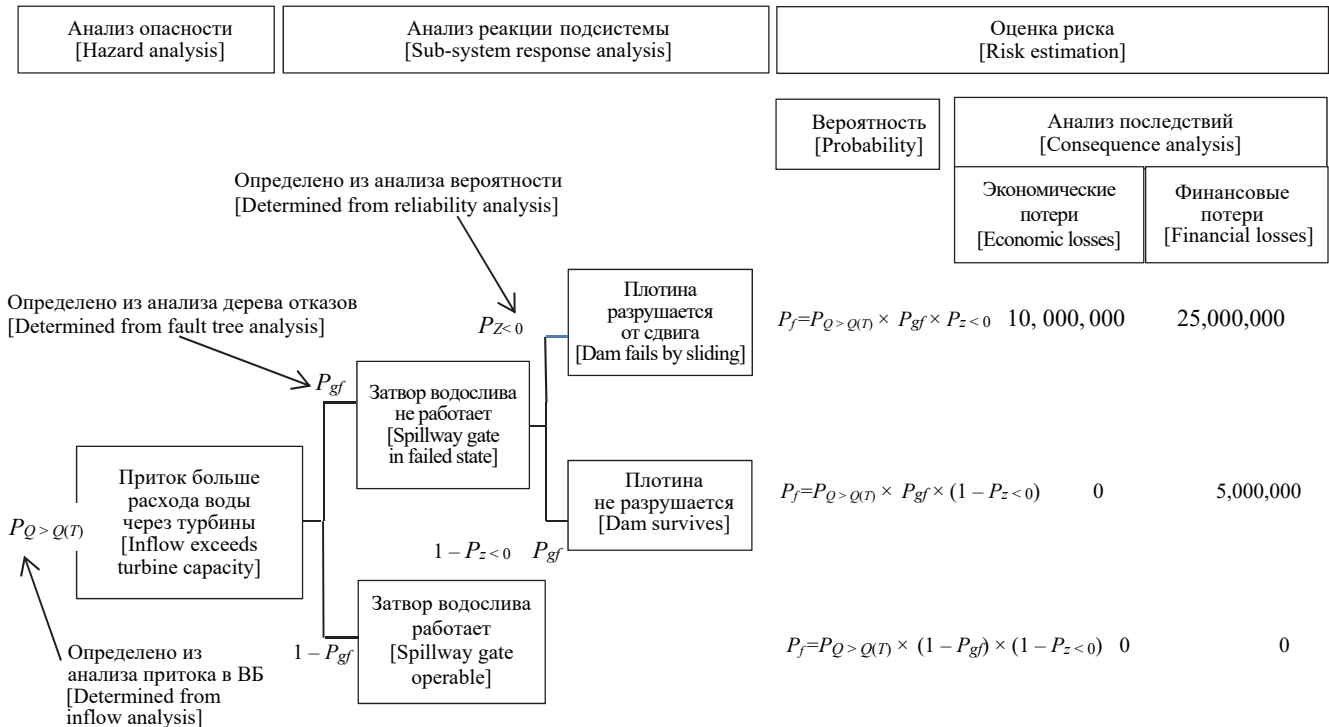


Рис. 3. Пример гипотетического анализа дерева событий (ETA);
[Figure 3. Example of hypothetical analysis of the event tree (ETA)]

В методике ETA по безопасности плотин выявляется взаимосвязь между функционированием или отказом разных облегчающих систем, что полезно для определения событий, которые требуют дальнейшего анализа методом дерева отказов (то есть отдельные ветви дерева событий становятся главными событиями).

Анализ дерева отказов (FTA) – это методика, качественная или количественная, с помощью которой условия и факторы, способствующие определённому нежелательному событию (названному топ-событием), дедуктивно определены, логически организованы и представлены графически. Отказы, определенные в дереве, могут быть связаны со сбоями аппаратных компонентов, человеческой ошибкой или любым другим событием, которое приводит к нежелательному результату (например, переливу дамбы). Начиная с топ-события, определяются возможные причины (режимы) отказа на следующем, более низком, уровне функциональной системы. После пошагового опреде-

ления нежелательной работы системы последовательно нижние уровни системы приведут к желаемому уровню системы, который обычно является режимом отказа компонента системы.

На рис. 4 показана модель разрушения при сдвиге бетонной плотины в анализе надежности. Вероятности рассчитываются с использованием методов теории надежности, таких как метод Монте-Карло (уровень III).

Возможность исправления неспособности человека закрыть, например, водовод в сочетании с разрушением конструкции рассматривается как значительное преимущество вероятностного подхода, который обычно используется в анализе рисков. За последние 20 лет появилось множество литературы по методам теории надежности, включая анализ надежности человека [8; 9]. Человеческий фактор и анализ надежности человека являются критически важным элементом и для анализа надежности ГТС.

Риск определяется количественно, связывая каждое значение вероятности для каждой ветви в

дереве событий или каждой точки данных в дереве отказов. Индивидуальные вероятности обычно задаются, используя статистические оценки, инженерные модели и экспертные мнения взаимодополняющим образом. В последние 10 лет появились общие принципы количественного анализа рисков, которые обеспечивают полезное руководство при применении анализа рисков для оценки безопасности плотин [10].

$$Z_{\text{sliding}} < 0 \text{ (i.e. } F - P < 0\text{);}$$

$$P = 0,5\rho_w(h_w)^2;$$

$$F = (G - U)\text{tg}\varphi;$$

$$G = \rho_c[(bH + 0,5(B - b)h_s]h_w;$$

$$U = 0,5\rho_w h_w B.$$

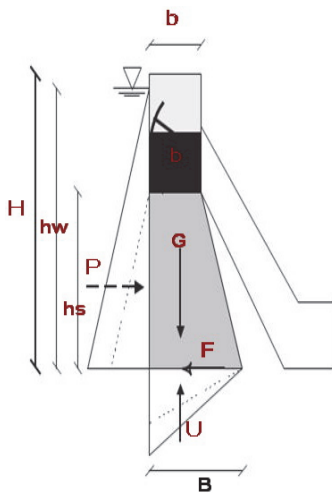


Рис. 4. Модель разрушения при сдвиге бетонной плотины в анализе надежности
[Figure 4. Model of sliding failure of concrete dam in the reliability analysis]

Основные принципы количественной оценки дерева событий заключаются в том, что процесс этой оценки должен основываться на воспроизводимости, исправлении неопределенности, проверке достоверности.

Воспроизводимость – у специалистов есть возможность просматривать и при необходимости воспроизводить расчеты. Следовательно, расчетные модели полностью определены и данные доступны.

Неопределенность – оценки риска сопровождаются анализом неопределенности в каждой оценке. В анализе четко указаны источники, природа и масштабы неопределенностей.

Проверка достоверности. Анализ поддается эмпирическому контролю, хотя на практике это может быть сложно и нецелесообразно.

Вероятностные задания основаны на данных и феноменологических моделях. С обширными данными и элементарным теоретическим пониманием явлений статистический прогноз является наилучшим подходом к вероятностному заданию. Напротив, при хорошем теоретическом понимании и репрезентативной модели явлений, но при недостатке данных, чисто теоретический прогноз является общим подходом.

Все эти соображения указывают на необходимость использования:

- полной базы данных о причинах разрушения плотин и инцидентов;
- надежных феноменологических моделей опасностей, инициирующих режимы отказов;
- моделей разрушения и механизмов прорыва плотины.

Во всех случаях ключевой целью является полная спецификация неопределенности в синтетических, измеренных или экспертных параметрах.

Применение этих идей с учетом безопасности плотины показано на рис. 4. Данный пример упрощает физику устойчивости бетонных плотин на сдвиг, в частности, предположение о противодействии, которое представлено треугольником, что маловероятно. Цель примера – представить основные понятия, с которыми имеет дело расчетчик.

Сдвиг плотины произойдет, когда высокие притоки в ВБ и отказ затвора совпадут, что приведет к подъему уровня ВБ, вследствие чего сдвигающая сила гидростатического давления ВБ превысит сопротивление трения плотины на сдвиг. Функция сдвига Z содержит два неопределенных параметра – F (сопротивление сдвигу) и P (давление ВБ), представленные функциями плотности вероятности. Плотина начнет скользить, когда сдвигающая нагрузка на нее (P) превысит сопротивление сил трения по основанию (F), что случится, когда функция сдвига ($Z = F - P$) < 0 . Эти распределения вероятностей состоят из более фундаментальных параметров пиков притока в ВБ (рис. 5, а) и надежности затвора водослива (рис. 5, в), которые определяются пиками отметки ВБ, h_w (рис. 5, б).

Другие параметры модели (угол трения φ и плотность бетона ρ_c) определяются путем измерений или из прошлых опытов (рис. 5, г).

Предполагается, что неопределенности в B , b , g и ρ_w ничтожно малы. Отношение между P и F определяется посредством интеграции этих распределений, определенных констант и определяющих зависимостей (рис. 5, д) с совокупным распределением функции сдвига Z , как показано на рис. 5, е. Результат, полученный на рис. 5, е, будет таким же, как на рис. 3.

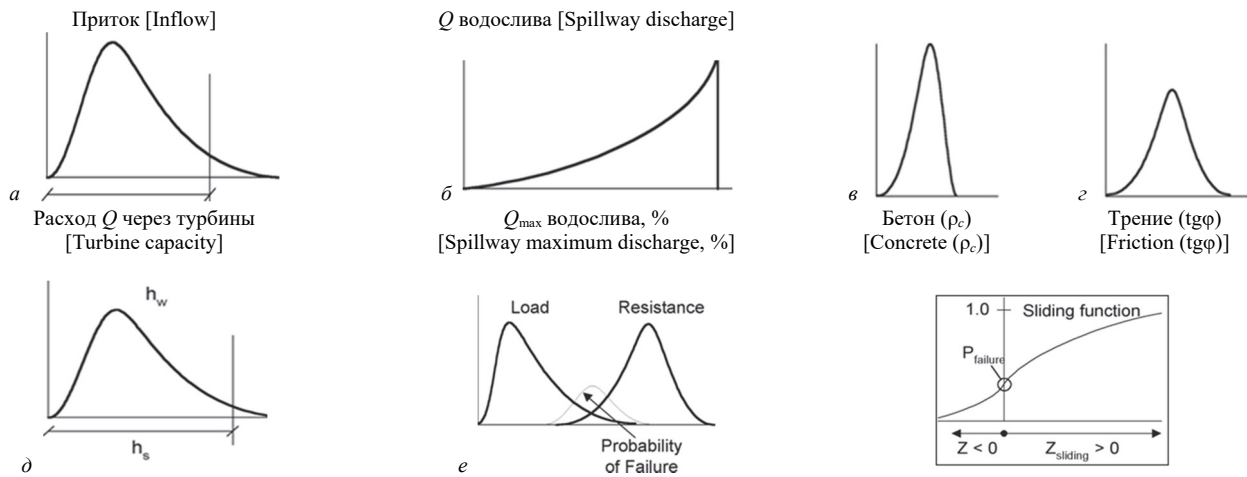


Рис. 5. Влияние вероятностей изменения основных параметров плотины на вероятность ее разрушения:

a – изменение пиков притоков; *б* – изменение пика уровней ВБ; *в* – надежность затвора; *г* – свойства материалов; *д* – нагрузка – сопротивление; *е* – распределение функции сдвига Z ; \uparrow – вероятность разрушения; P_{failure} – точка разрушения 0
[Figure 5. Influence of probability of change of principal parameters of dam on probability of its failure:
a – distribution of inflow peaks; *б* – distribution of reservoir level peaks; *в* – gate reliability; *г* – material properties; *д* – load – resistance; *е* – distribution of sliding function Z ; \uparrow – probability of failure; P_{failure} – point of failure 0]

Термины приемлемый и допустимый риск следует тщательно различать.

Приемлемый риск определяется как «риск для целей жизни или работы каждого, кто может быть им затронут и готов согласиться с принятием механизмов контроля риска» [11].

Допустимый риск – это «риск в пределах его диапазона, с которым в обществе можно жить, обеспечивая определенные выгоды. Это диапазон риска, который не считается незначительным и который возможно уменьшить» [11].

5. Категории рисков

В настоящее время в наиболее многостороннем подходе к оценке риска [10] рассматриваются следующие категории рисков (рис. 6).

Широко приемлемый риск – ежегодный риск несчастных случаев, значительно ниже 10^{-6} , возникающий из любого конкретного источника, принимаемый за незначительный риск.

Недопустимый риск – ежегодный риск несчастных случаев, превышающий 10^{-4} , считается недопустимым при нормальных обстоятельствах. Это не исключает возможности добровольного участия людей в рекреационных мероприятиях, связанных с более высоким уровнем риска, часто в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} летальных исходов в год.

Допустимый риск – годовой риск несчастных случаев между 10^{-6} и 10^{-4} .

Что касается *индивидуального риска*, то прирост риска, налагаемого на человека плотиной, не должен превышать малую долю фонового риска, с которым люди живут ежедневно.

Социальный риск – вероятность события, которое может привести к многочисленным жертвам, не должна превышать значение, являющееся функцией числа возможных жертв и уменьшающееся по мере роста числа жертв.

Треугольник на рис. 6 показывает движения риска от основания до верха.

Ширина перевернутого треугольника на рис. 6 представляет растущий уровень риска для конкретной опасности, измеряемый индивидуальным риском и социальными проблемами.

Представлены три области риска.

Недопустимые риски у вершины треугольника – в этой области риски будут рассматриваться как неприемлемые независимо от выгод, если только эти риски не могут быть резко снижены в более низком регионе.

Широко приемлемые риски в нижней части треугольника – риски, попадающие в этот регион, обычно рассматриваются как незначительные и контролируемые и не требуют дополнительных действий для их снижения, если не доступны разумно осуществимые меры (принцип ALARP).

Допустимые риски между двумя другими регионами – риски в этом регионе типичны для рисков, связанных с деятельностью, которую люди готовы терпеть с целью получения выгоды, ожидая, что:

- характер и уровень рисков правильно оценены, а результаты использованы должным образом для определения мер контроля;
- остаточные риски не являются чрезмерно высокими и поддерживаются на минимально возможном уровне (принцип ALARP);
- риски периодически пересматриваются для подтверждения соответствия критериям ALARP.

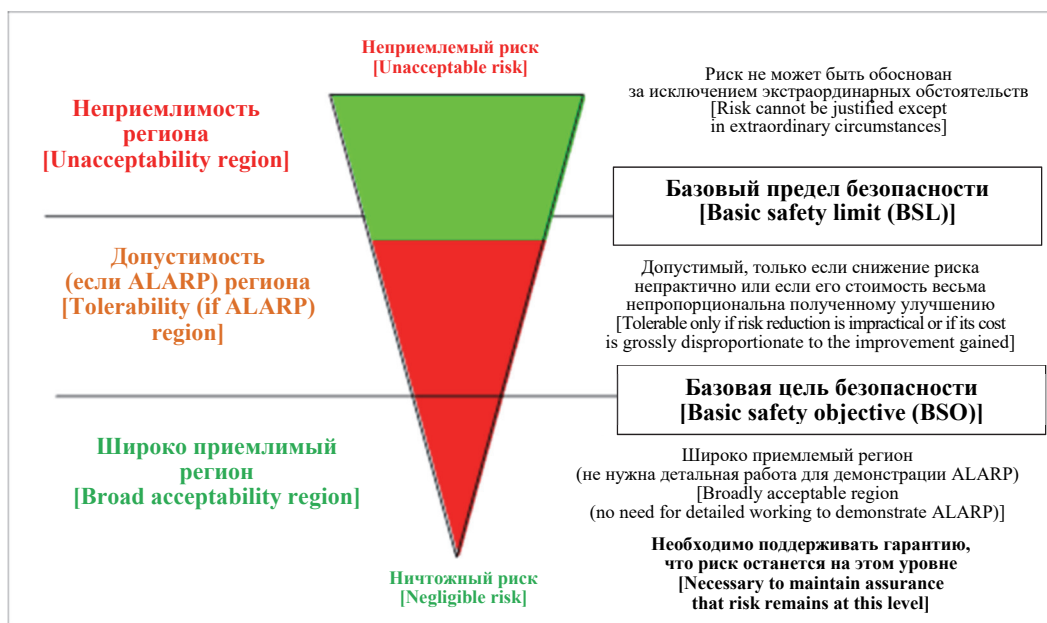


Рис. 6. Допустимые и недопустимые риски в разных обстоятельствах:
[Figure 6. Tolerable and unacceptable risks in various circumstances]

Выводы и рекомендации по оценке рисков аварий ГТС в РФ

Методы анализа и оценки риска продолжают развиваться и совершенствоваться в направлении учета основных факторов при проектировании, строительстве и эксплуатации ГТС (плотин).

Наиболее эффективным подходом является сочетание экспертных, графоаналитических и статистических методов для анализа и оценки рисков аварий ГТС (плотин). Необходимо адаптировать методы качественной и количественной оценки рисков в других отраслях (прежде всего, в атомной энергетике) к строительству плотин. Следует учитывать особенности проектирования, строительства, эксплуатации плотин и уникальность каждой плотины, а также анализировать и систематизировать информацию о сбоях на плотинах различных типов и назначений.

Надлежит расширить применение количественной оценки рисков, наряду с преобладающей качественной оценкой, для подготовки лицензий плотин по безопасности. В настоящее время подготовлены лицензии по безопасности 64 крупных плотин, которые находятся под надзором Госэнергонадзора РФ.

Список литературы

1. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: учебное пособие для магистров и аспирантов. М.: Изд-во РУДН, 2008. 222 с.

2. ICOLD Bulletin 130. Risk analysis for dam safety. Paris: ICOLD Publ., 2003. 162 p.

3. CADAM – version 1.4.3 (April 2001) / Polytechnic School of Montreal, Department of Civil and Geological Engineering (Canada). URL: <http://www.struc.polymtl.ca/cadam/>

4. FLAC – version 8.0 (2018). Explicit continuum modelling of non-linear material behavior in 2D / ITASCA (USA). URL: <http://www.itascascg.com/>

5. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. М.: Госстрой РФ, 2003.

6. Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС. СПб.: АО «ВНИИГ имени Веденева», 2000.

7. Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений. М.: АО «НИИЭС», 2003. 85 с.

8. ICOLD Bulletin 154. Appendix B-2. Safety Decision Making – Explicit Consideration of Risk. Paris: ICOLD Publ., 2007. 162 p.

9. Reducing Risks, Protecting People / HSE (Health and Safety Executive). London: Her Majesty's Stationary Office, 2001.

10. Hartford D., Beacher G. Risk and uncertainty in dam safety (CEA technologies dam safety group). London: Thomas Telford Ltd., 2007. 391 p.

11. ICOLD Bulletin 170. Flood Evaluation and Dam Safety – Risk-Based Analysis. Paris: ICOLD Publ., 2016. 153 p.

Methods of analysis and risk assessment of accidents of hydraulic structures

Yury P. Lyapichev

Hydroproject Institute (Joint Stock Company), 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation
International Commission on Large Dams (ICOLD), 61 Kleber Ave., Paris, 75016, French Republic
lyapichev@mail.ru

Article history:

Received: March 15, 2019

Revised: June 11, 2019

Accepted: July 15, 2019

For citation

Lyapichev Yu.P. (2019). Methods of analysis and risk assessment of accidents of hydraulic structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(4), 327–336. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-327-336>

Abstract

Relevance of the research is due to the fact that over the past 10 years severe accidents at large hydropower plants and dams occurred in Russia (Sayano-Shushenskaya HPP, 2009), USA (Oroville dam, 2018), Brazil (Brumadinho dike, 2019), Colombia (HPP Ituango, 2018) and other countries, the need has arisen to improve the safety programs of the HS and dams. The main method of this important work is to use methods of analysis and assessment of risk accidents of HS and dams. **Methods** of this important work are to develop modern methodology for analyzing and assessing the risk of accidents of HS and dams. The introduction of the method of analysis and risk assessment in the safety programs of hydraulic structures (dams) in countries that are advanced in the construction of HS (China, Brazil, Canada, USA, Russia, Colombia, Norway, Spain, etc.) shows that in applying risk assessment analysis accidents of HS and dams still a number of difficulties, but this approach is of great benefit in monitoring the safety of HS and dams. **The aim of this article** is to familiarize and train specialists and hydraulic engineers with modern methods for assessing the safety of HS and dams.

Keywords: hydraulic structures; HS; safety of HS and dams; accident risk assessment; probability of failure

References

1. Lyapichev Yu.P. (2008). *Gidrologicheskaya i tekhnicheskaya bezopasnost' gidrosooruzhenij: uchebnoe posobie dlya magistrrov i aspirantov [Hydrological and technical safety of hydraulic structures: manual]*. Moscow, RUDN Publ., 222. (In Russ.)
2. ICOLD Bulletin 130. (2003). *Risk analysis for dam safety. Guidelines and management*. Paris, ICOLD Publ., 162.
3. Polytechnic School of Montreal, Department of Civil and Geological Engineering (Canada). (April 2001). *CADAM – version 1.4.3*. <http://www.struc.polymtl.ca/cadam/>
4. ITASCA (USA). (2018). *FLAC – version 8.0. Explicit continuum modelling of non-linear material behavior in 2D*. <http://www.itascaeg.com/>
5. SNiP 33-01-2003. (2003). *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya proektirovaniya [Hydraulic structures. Main design regulations]*. Moscow, Gosstroj RF Publ. (In Russ.)
6. JSC “VNIIG named after Vedenev”. (2000). *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska avarij GTS [Guidelines for conducting an accident risk analysis of hydraulic structures]*. Saint Peterburg. (In Russ.)
7. JSC “NIIES”. (2003). *Metodika ocenki urovnya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Methods of assessment of level of safety of hydraulic structures]*. Moscow, 85. (In Russ.)
8. ICOLD Bulletin 154. (2007). *Appendix B-2. Safety Decision Making – Explicit Consideration of Risk*. Paris, ICOLD Publ., 162.
9. HSE (Health and Safety Executive). (2001). *Reducing Risks, Protecting People*. London, Her Majesty's Stationary Office.
10. Hartford D., Beacher G. (2007). *Risk and uncertainty in dam safety (CEA technologies dam safety group)*. London, Thomas Telford Ltd., 391.
11. ICOLD Bulletin 170. (2016). *Flood Evaluation and Dam Safety – Risk-Based Analysis*. Paris, ICOLD Publ., 153.

Yury P. Lyapichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, expert for Foreign Projects of JSC “Hydroproject Institute”; member of the International Commission on Large Dams (ICOLD).