

УДК 311.2:314

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2017

Допустимый риск для эксплуатируемых сооружений: методология оценки

И. Н. Иващенко,
НИИ энергетических
сооружений, г. Москва

К. И. Иващенко,
НТЦ «Гидротехбезопасность»,
г. Москва

Е. А. Гончаров,
НИУ «Высшая школа
экономики», г. Москва

Л. В. Комельков,
НИИ энергетических
сооружений, г. Москва

Аннотация

Использованы результаты обследований более 180 плотин и предложены индексная и численная шкалы для оценки нарушений условий эксплуатации и повреждений сооружений. Оценены вероятность аварий p и возможный ущерб G для 14 плотин. На этой основе представлена иллюстрация методики построения диаграммы « $p - G$ » и определения зоны допустимого риска. Сформулированы предложения по применению представленных результатов в практике эксплуатации длительно эксплуатируемых («старых») сооружений.

Ключевые слова: безопасность сооружений, допустимый риск, диаграмма « $p - G$ », диаграмма « $F - N$ », обследование плотин, экспертные оценки, «потенциально опасное» и «предаварийное» состояние.

Содержание

Введение

1. Методика формализованной оценки состояния «старых» сооружений при комиссионных обследованиях
2. Уточнение методики оценки вероятности аварии «старых» сооружений
3. Оценка возможного материального ущерба от аварии сооружения
4. Уточнение методики оценки допустимого риска и построения диаграммы « $p - G$ »
5. Об использовании результатов работы в практике эксплуатации «старых» сооружений

Заключение

Литература

Приложение. Шкала оценки нарушений условий эксплуатации и повреждений сооружений

Введение

Основные положения теории риска в настоящее время активно применяются как в отечественных [1, 2], так и в зарубежных [3, 4] исследованиях. Риск R определяется как мера вероятности p и ущерба G от негативных последствий аварии и оценивается выражением: $R = p \cdot G$. Состояние сооружений в процессе длительной эксплуатации, как правило, ухудшается (этот процесс может быть условно определен как «старение») и отличается от требований норм и проекта. Вероятность (p) наступления предельного состояния [5]¹ сооружений в процессе эксплуатации возрастает. Часто увеличивается и масштаб возможного ущерба (G).

¹ Из Федерального закона № 384-ФЗ от 30.12.2009 [5] «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»: «За предельное состояние строительных конструкций и основания по прочности и устойчивости должно быть принято состояние, характеризующееся: ...нарушением эксплуатационной пригодности и иными явлениями, связанными с угрозой причинения вреда жизни и здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений».

Цель данной работы состоит в уточнении методики оценки «допустимого риска» [6] для эксплуатируемых сооружений. Для достижения указанной цели решались задачи уточнения оценок: а) нарушений условий эксплуатации и повреждений сооружений в ходе комиссионных обследований (раздел 1); б) вероятности аварии сооружений p на основе данных обследований (раздел 2); в) допустимого соотношения «вероятность аварии — возможный ущерб» и построения соответствующей диаграммы « p — G » (раздел 4), аналогичной известной диаграмме « F — N » [7, 8].

Многие отечественные гидротехнические сооружения эксплуатируются весьма длительное время (50 и более лет), а их возможные аварии могут иметь катастрофические последствия. Поэтому при решении указанных задач использованы результаты комиссионных обследований плотин. Подготовка и обработка исходных данных для построения диаграммы « p — G » выполнены по методикам, регламентированным нормативно-методическими документами [9—13]. На основе данных, полученных при обследовании более чем 180 плотин, предложена индексная шкала для оценки нарушений условий эксплуатации и повреждений сооружений. Выполнена квантификация (оцифровка) градаций шкалы и представлены их численные оценки. Оценены вероятность аварий p и возможный ущерб G для 14 плотин. Предложено уточнение методики построения диаграммы « p — G », которое иллюстрируется с использованием результатов обследований 14 плотин, выполненных в последнее время (период с 2009 по 2015 г.). Существенным обстоятельством, определившим ограниченный размер выборки, явилось обязательное наличие для всех объектов как подсчета возможных материальных потерь от аварии, так и оценок вероятности аварий.

1. Методика формализованной оценки состояния «старых» сооружений при комиссионных обследованиях

1.1. Формализованная оценка состояния эксплуатируемых сооружений необходима для последующей расчетной оценки вероятности аварии p , определения риска R и формирования диаграммы « p — G ». В рамках данного раздела решались зада-

чи: а) разработки описательной шкалы для экспертной оценки состояния сооружений; б) оцифровки (квантификации) качественных оценок и соответствующих количественных меток, представленных в описательной шкале.

1.2. Исходные оценки состояния сооружений выполняются в форме индекса состояния I [10, 14—17]. Индекс I характеризует отклонение состояния сооружения от требований норм и определяет степень приближения к предельному (аварийному) состоянию. Индекс I оценивается на основе количественного анализа данных инструментальных наблюдений, а также качественных признаков нарушений, визуальных и экспертных оценок состояния сооружения. Индекс I служит основой оценки вероятности аварии и риска.

1.3. Нормативно-методическими документами [10, 11] определены три основных состояния эксплуатируемых гидротехнических сооружений: «нормальное», «потенциально опасное» и «аварийное (предельное)». Допустимо назначение и других, как правило, более детальных градаций возможных состояний сооружений. В данной работе применена, в частности, также градация «предаварийное» состояние сооружений.

1.4. Граничные значения показателей состояния для выделенных диапазонов определяют переход сооружения из одного состояния в другое и контролируются инструментальными средствами и визуально. Граничные значения показателей состояния являются «критериями состояния» и определяются известными «статистическими» и «детерминистическими» методами [11]. Введенные в [11] и включенные в описательную шкалу критерии K_1 и K_2 определяют переход сооружения к «потенциально опасному» и «аварийному» состоянию соответственно.

1.5. Индекс I изменяется от 0 до 6 по мере приближения сооружения к предельному состоянию. Вся доступная информация как о состоянии сооружения в целом (индекс I), так и по отдельным показателям (индекс I_i) объединяется и приводится к единому масштабу по указанной непрерывной шкале. Объединение исходной информации осуществляется для показателей состояния, соответствующих наиболее опасному из введенных состояний сооружения. Указанным состояниям сооруже-

ния соответствуют диапазоны изменения индекса I от 0 до 3, от 3 до 4, от 4 до 5 и от 5 до 6. В пределах одного диапазона для вычисления индекса I используется формула (1), выведенная на основе применения некоторых положений теории нечетких множеств [18]:

$$I = (I_{\max} + q) - \prod_i^n [(I_{\max} + q) - I_i] / [(I_{\max} + q) - I_{\min}]^{n-1}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$, $I_{\max}$ и $I_{\min}$ — границы выделяемых диапазонов изменения I ; q — параметр.

Применение в формуле (1) параметра q не является обязательным, но позволяет, в соответствии с идеологией теории нечетких множеств, получать оценки, отвечающие более опасному состоянию сооружения. Параметр q назначается, как правило, на экспертной основе в диапазоне от 0,1 до 0,15.

1.6. Формула (1) является основной при практическом применении рассматриваемой методики оценки состояния сооружений. Применение формулы (1) позволяет оценить влияние всех факторов, воздействующих на оценку состояния в пределах каждого диапазона. Может быть использована также любая доступная (количественная и качественная) дополнительная информация. Учет взаимовлияния факторов усиливает достоверность оценки факторов более высокого уровня иерархии и итоговую оценку уровня безопасности сооружения в целом. Отметим аналогию с известной из теории вероятностей формулой Байеса.

1.7. Формула (1), примененная нами для объединения в индексе I всех доступных как количественных, так и качественных данных о повреждениях обследованных сооружений, может быть несколько упрощена. Если какой-либо (в т. ч. произвольно назначенный) диапазон изменения оценок различных признаков повреждений равен единице (т. е. $I_{\max} - I_{\min} = 1$, $q = 0$), формула (1) принимает вид:

$$I = I_{\max} - \prod_i^n (I_{\max} - I_i). \quad (2)$$

1.8. Описательная шкала оценки уровней повреждений I , представленная в приложении, обобщает опыт обследований и экспертиз деклараций

безопасности более 180 гидротехнических объектов страны [15, 16]. Ранжированные по возрастанию уровня повреждений соответствующие численные оценки (метки) шкалы I^9 назначены на экспертной основе. Введенные в описательную часть шкалы обозначения S , D , F , O соответствуют преобладающим причинам повреждений и разрушений в теле и основании сооружений, которые зафиксированы в практике наблюдений и обследований [17]: процессам фильтрации (S), нарушения прочности и устойчивости (D), размыва водным потоком (F), человеческому фактору или другим причинам (O).

1.9. Отметим примененный в данном исследовании прием исходного экспертного оценивания «потенциально опасного» и «предаварийного» состояний сооружений. Оценки индекса I^9 для большинства сооружений (10 из 14) оказались близки (по 5 оценок внутри диапазонов от 3 до 3,4 и от 3,5 до 4). Поэтому для этой выборки экспертами выполнено сопоставление признаков повреждений отдельных сооружений на основе матрицы парных сравнений. Далее определены приоритеты состояния сооружений по степени их повреждения. Для оценки внутри указанных диапазонов применена линейная интерполяция.

1.10. Дальнейшая статистическая обработка указанных оценок для вычисления вероятности аварии и последующего количественного определения риска требует, как известно, оцифровки исходных экспертных оценок. В настоящее время опубликовано значительное число работ, посвященных методам оцифровки качественных признаков. Некоторые важные результаты представлены в капитальном справочном издании [19]. В данной работе для этой цели использована методика, разработанная И. Ф. Шахновым [20] и основанная на применении локальных тернарных порядковых и количественных шкал.

1.11. Процедура уточнения (оцифровки, квантификации) предложенной шкалы оценок состояния сооружений сводится к следующему:

- исходная качественная шкала разбивается на тройки (отсюда — термин «тернарная») A_{p-1} , A_p и A_{p+1} ;
- для каждой тройки эксперт по шкале от 0 до 1 оценивает параметр r_k , который «можно интерпре-

тировать как относительное расстояние» или удаленность A_p от A_{p-1} ;

- по формуле (3), вывод которой представлен И.Ф. Шахновым в работах [21, 22], определяются (по относительной шкале от 0 до 1) количественные оценки уровней повреждений:

$$V_p = \left[1 + \sum_{i=p}^{m-2} \prod_{k=i+1}^{m-1} \frac{1-r_k}{r_k} \right] \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^{m-2} \prod_{k=i+1}^{m-1} \frac{1-r_k}{r_k} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\sum_a^b = 0, a > b, p = 1, \dots, m-1, V_1 = 1, V_m = 0.$$

Если, по мнению эксперта, необходимо уточнение оценок, процедура повторяется с уточненными параметрами r_k .

1.12. В итоге применения описанной процедуры и масштабирования относительных оценок получены скорректированные количественные оценки индекса $I^k = a \cdot V_p$ (a — масштабирующий коэффициент, в нашем случае равный 6 в соответствии с принятым диапазоном изменения индекса I). Скорректированные в результате двух итераций оценки индекса I^k представлены в приложении и на графике (рис. 1).

1.13. Полученная в результате оцифровки зависимость имеет две точки перегиба, между которыми происходит резкий (почти линейный) рост индекса I^k . Такой характер имеют также хорошо апробированные психофизические зависимости (например, известная функция желательности Харрингтона), широко применяемые для формализации субъективных экспертных оценок в психологии, медицине, социологии и др. Отмеченное обстоятельство подтверждает целесообразность примененного метода оцифровки и позволяет считать достоверными полученные численные оценки I^k .

1.14. Уточненная шкала количественных оценок индекса I^k , представленная в приложении, а также построенный на ее основе график (рис. 1) являются универсальными и могут быть применены в практике обследования плотин и при математической обработке полученных оценок состояния сооружений.

1.15. Большая часть использованных в данном исследовании исходных экспертных оценок индекса I^p выполнена по описываемой методике,

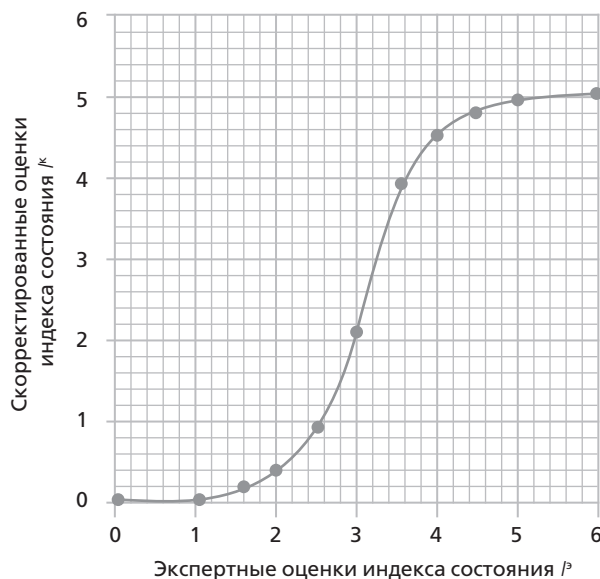


Рис. 1. График корректировки (оцифровки) экспертных оценок состояния сооружения

т.е. на основе непосредственного определения в ходе обследования. Для уточнения полученных результатов были привлечены также результаты экспертиз деклараций безопасности и критериев безопасности сооружений комиссиями квалифицированных экспертов. На основе полученных и скорректированных оценок строилась функция распределения индекса I^k и по ней оценивалась вероятность аварии (см. раздел 2).

2. Уточнение методики оценки вероятности аварии «старых» сооружений

2.1. Разработанная в данном исследовании методика определения вероятности наступления предельного состояния эксплуатируемого сооружения имеет следующие особенности:

2.1.1. Оценка вероятности аварии обследуемых сооружений осуществляется по функции распределения ранее введенной [10, 14—17] интегральной характеристики состояния сооружения — индекса I^k . Функция распределения индекса I^k позволяет оценить изменение вероятности аварии, произошедшее в процессе эксплуатации и связанное с ухудшением состояния плотины («старени-

ем» сооружения) либо с изменением состояния в результате ремонта или реконструкции. Кроме того, оценке подлежат неизбежные несовпадения природных условий створа, условий строительства и эксплуатации с предположениями, заложенными в проект, а также с требованиями норм и правил.

2.1.2. Индекс I оценивает степень отклонения состояния сооружения от требований норм и проекта («старение» сооружения) и учитывает при этом как количественные, так и качественные (определяемые визуально или на экспертной основе) признаки повреждений. Вероятность аварии принимается равной вероятности превышения индексом состояния уровня $I^0 = 5$, т.е. границы между «предаварийным» и «аварийным» состояниями. Отметим в связи с этим, что недавняя авария на плотине Оровилл [23] четко демонстрирует процесс перехода сооружения из «предаварийного» в «аварийное» состояние и достижения индексом состояния уровня $I^0 = 5^2$.

2.1.3. В отличие от других известных методик [24—26], функция распределения строится по данным, полученным на одном и том же сооружении. Таким образом: а) учитываются уникальные, как правило, природно-технические условия строительства и эксплуатации конкретного объекта; б) оцениваются признаки и степень повреждений, могущие привести к аварии и характерные именно для данного объекта, а не других сооружений, как это принято, например, в известной методике,

предложенной R. Fell³ [26] и активно применяемой как в зарубежных, так и в отечественных исследованиях [24—26]. Отметим, что и для указанных методик, и для рассматриваемой в данной работе методики характерно широкое применение экспертных оценок состояния сооружения при определении вероятности аварии.

2.1.4. Оценивается вероятность аварии, наступившей именно на стадии длительной эксплуатации сооружения, т.е. практически в условиях статике. Поэтому, в отличие от других методик [24—26], при построении диаграммы « p — G » применяется не годовая вероятность аварии $p_{\text{год}}$, а итоговая вероятность аварии обследуемого «старого» сооружения p , что вполне естественно для условий статике. В то же время в указанных методиках [24—26] годовая вероятность аварии $p_{\text{год}}$ определяется путем деления итоговой вероятности p на срок эксплуатации сооружения t . Одна из причин этого — необходимость учета вероятности аварии от внешних воздействий, в основном сейсмических и гидродинамических, которые в силу кратковременности и малой повторяемости обычно характеризуются в терминах годовой вероятности. Однако так не следует поступать с вероятностью аварии, возможной вследствие длительного накопления повреждений в процессе статического, по существу, процесса «старения» сооружения. Ведь у построенного недавно и у «старого» сооружения (находящегося, например, «в потенциально опасном» состоянии) могут оказаться практически одинаковые годовые вероятности. При этом может быть сделан неверный вывод и о практически одинаковом благополучном состоянии обоих сооружений.

2.1.5. Возможные повреждения сооружения от указанных сейсмических и гидродинамических воздействий также учитываются в предлагаемой

² Авария на 235-метровой плотине Оровилл (США, Калифорния) развивалась с 7 по 14 февраля 2017 г. [23]. Пропуск очередного дождевого паводка вызвал эрозию основного бетонного водосброса и размыв его основания. При экстренном включении аварийного бетонного водосброса начался подмыв его основания, создалась реальная угроза обрушения водосброса и прорыва напорного фронта гидроузла. 12—13 февраля местные власти организовали срочную эвакуацию почти 190 тысяч жителей близлежащих городков (по-видимому, именно этот момент соответствует по времени достижению индексом состояния уровня $I^0 = 5$). Постепенное уменьшение расходов паводка, а также принятые срочные противоаварийные меры — включение в работу всех отверстий основного водосброса (несмотря на продолжающийся процесс его разрушения), сбрасывание с вертолетов крупногабаритных скальных глыб в глубокую 14-метровую промоину на водосбросе и в его основании — привели к стабилизации ситуации.

³ В основу методики, разработанной R. Fell, положен выбор коэффициентов, влияющих на вероятность отказов сооружений по «внутренним» причинам с последующим вычислением «коэффициентов риска», характеризующих фильтрационную (суффозионную) прочность грунта тела и основания плотины, а также устойчивость откосов грунтовых плотин. Выбор коэффициентов, определяющих итоговые значения вероятности аварии по внутренним причинам, осуществляется на основе экспертных оценок. По вычисленным «коэффициентам риска», с использованием графиков связи, разработанных R. Fell, определяются вероятности аварий p за весь период эксплуатации.

методике на основе оценок индекса I^p . Учет осуществляется по результатам обследования антисейсмических и водопропускных сооружений и фиксации возможных отклонений их состояния, а также условий эксплуатации, от требований норм и проекта.

2.1.6. Применение предлагаемой методики позволяет при оценке вероятности аварии конкретного сооружения отказаться от использования статистики повреждений и аварий других сооружений. Указанная статистика приводится в публикациях Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD), полученных от национальных комитетов по большим плотинам разных стран. Приводимая ICOLD статистика относится к различным по конструкции и условиям эксплуатации сооружениям, весьма разнородна по примененным методам сбора и в особенности по методикам обработки и анализа исходной информации. Отметим, что один из авторов статьи знаком с упомянутыми материалами ICOLD и ранее использовал их [17], но только для грубых оценок средней по миру вероятности аварий различных типов плотин.

2.2. Оценка индекса I выполнена по методике, которая представлена в разделе 1 и использует уточненную описательную шкалу повреждений (приложение) и скорректированные количественные оценки индекса I^k (см. рис. 1).

2.3. Полученные по представленной методике оценки вероятности аварии сооружений применены далее при построении диаграммы « p — G » (раздел 4).

3. Оценка возможного материального ущерба от аварии сооружения⁴

3.1. Методика оценки детально рассмотрена в работах [27, 28]. Методика в своей принципиальной основе соответствует как нормативным документам 2003 и 2007 годов выпуска [9, 12], так и современному нормативному документу [13].

3.2. Рассматриваемый ущерб от разрушения плотин связан, главным образом, с воздействием волны прорыва. Параметры волны прорыва рас-

считаны по методике, основные положения которой представлены в [29].

3.3. Расчетами определены следующие составляющие материального ущерба: основным и оборотным производственным фондам, а также готовой продукции предприятий; сельскому хозяйству; транспорту и связи; жилому фонду и личной собственности; экологический ущерб. Исходные стоимостные оценки ущерба приведены к уровню 2015 г. с учетом инфляции [30].

3.4. Необходимо отметить, что выполненными расчетами ущерба от аварии не учитывались: косвенный ущерб, неполученная выгода, реальный денежный эквивалент «стоимости жизни» [31, 32], а также в полном объеме дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварии. Это обстоятельство является недостатком как нормативных документов 2003 и 2007 годов выпуска [9, 12], так и современного нормативного документа [13].

3.5. Объем использованной выборки ограничен 14 плотинами, так как оценка ущерба для остальных сооружений из исходной выборки (более 180 сооружений) выполнялась по иным методикам.

4. Уточнение методики оценки допустимого риска и построения диаграммы « p — G »

4.1. Оценке допустимого риска посвящен ряд работ отечественных [7, 33] и зарубежных исследователей [34, 35]. В данной статье применено определение, рекомендованное в работе [6]: «Допустимый риск — риск, который считается допустимым при существующих общественных ценностях». При определении критериев допустимости уровня риска в зарубежной и отечественной практике используются как диаграммы « F — N » [7, 33—35], так и матрицы риска [8, 16, 20, 36—38]. В работах [37, 38] в зависимости от тяжести возможных последствий аварии в матрице риска конкретизированы количественные оценки в соотношении « p — G ».

4.2. Построение и уточнение диаграммы « p — G » (рис. 2) выполнено именно для эксплуатируемых сооружений. Наибольший интерес представляют «потенциально опасное» и «предаварийное» состояния. Именно эти состояния характеризуются значительным отклонением от требований норм и проекта. Анализ соотношения «вероятность

⁴ Оценка возможного материального ущерба G выполнена в основном С.Я. Школьниковым.

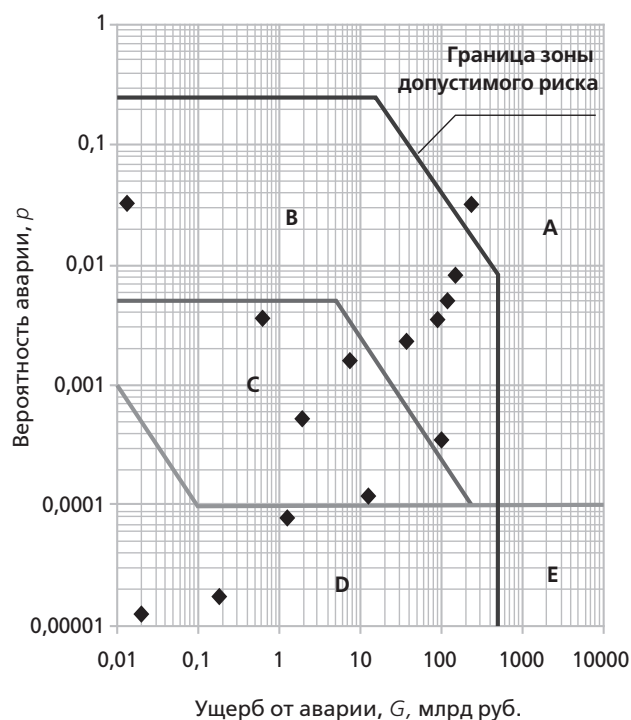


Рис. 2. Диаграмма связи компонентов риска «вероятность аварии p — ущерб от аварии G » (диаграмма « $p — G$ »)

Примечания: p — вероятность аварии обследуемого сооружения; G — стоимостная оценка (в ценах 2015 г.) возможного ущерба от аварии; А — зона неприемлемого риска; В — зона повышенного риска; С — зона условно приемлемого риска; D — зона приемлемого риска; Е — зона приемлемого риска для уникальных сооружений; квадратные точки нанесены по результатам анализа результатов обследований

аварии — ущерб» для эксплуатируемого сооружения в сопоставлении с диаграммой « $p — G$ » помогает оценить необходимость и целесообразность ремонта или реконструкции.

4.3. Предлагаемое уточнение методики анализа указанного соотношения « $p — G$ » и построения соответствующей диаграммы « $p — G$ » иллюстрируется с использованием результатов обследований 14 плотин, выполненных в последнее время (период с 2009 по 2015 г.).

4.4. Граница зоны «допустимого риска» (см. рис. 2) проведена через «опасную» зону, в которой представлены данные по p и G для наиболее поврежденных сооружений. Указанные сооружения нахо-

дятся в «потенциально опасном» или «предаварийном» состоянии, но их эксплуатация продолжается. Отнесение сооружений к «опасной» зоне и фиксация положения ее границы выполнены на экспертной основе с учетом определения «допустимого риска», данного в работе [6]. Таким образом, при конкретизации положения границы зоны «допустимого риска» принята предпосылка: «серьезные повреждения и опасное состояние сооружения уже достигнуты, но разрушения не произошло — поэтому продолжение эксплуатации возможно при условии неотложного выполнения ремонтных работ». После экспертной фиксации в указанной зоне одной точки наклон граничной линии был определен исходя из условия $R = p \cdot G = \text{const}$.

4.5. Положение зон «повышенного», «условно приемлемого», «приемлемого» риска на диаграмме « $p — G$ » определено также экспертно. Вертикальная граница зоны «допустимого риска», совпадающая в данном случае с границей зоны «приемлемого риска для уникальных сооружений», принята с позиции здравого смысла — таким образом, ограничен разумными пределами материальный ущерб от возможной аварии. По указанным причинам, а также в связи с ограниченным объемом исходной выборки положение указанных зон является условным. Поэтому конкретизация указанных зон, как и границы зоны «допустимого риска» (см. рис. 2), носит оценочный характер, но применима для иллюстрации предлагаемой методики уточнения диаграммы « $p — G$ ».

4.6. Верхняя горизонтальная линия, ограничивающая зону «допустимого риска» (см. рис. 2), соответствует вероятности наступления предельного состояния для сооружений IV класса применительно к 50-летнему нормативному сроку их службы [39]⁵. Практическое применение предлагаемой диаграммы « $p — G$ » после ее обсуждения, соответствующей корректировки и включения в нормы

⁵ Отметим, что если аналогичным образом на диаграмме « $p — G$ » провести горизонтальные линии для сооружений I, II, III классов, то получим зоны «допустимого риска» для указанных классов, формально определяемые указаниями норм [39]. Очевидно при этом, что регламентация «допустимого» риска, как, впрочем, и критериев безопасности «старых» сооружений, исходя только из вероятности аварии, совершенно недостаточна. Необходим также явный учет ущерба, связанного с указанной вероятностью аварии.

позволит отказаться от жесткой нормативной привязки инженерных решений к допустимой вероятности аварии. Поиски оптимального инженерного решения по ремонту и реконструкции «старых» сооружений при этом базируются на более гибком варьировании сочетаний вероятности аварий p и вызываемого аварией ущерба G . Следовательно, существенно расширяются возможности оптимизации принимаемых инженерных решений. В то же время, исходя из принятого определения зоны «допустимого риска» [6], целесообразно, по-видимому, ограничить допустимую вероятность аварии для сооружений IV класса, а также для сооружений, попадающих в зону E (см. рис. 2).

4.7. Нельзя не отметить, что недостаток исходных данных снижает точность представленной диаграммы « $p — G$ ». Очевидна необходимость дальнейшего уточнения представленной диаграммы « $p — G$ » на основе расширения базы данных обследованных объектов. Важный вопрос, возникающий при разработке диаграммы « $p — G$ », — это привлечение результатов других исследователей данной темы [37]. К сожалению, в данной работе его не удалось решить. В то же время при диагностике состояния сооружений крайне важно привлечь весь объем доступной информации. Для «старых» сооружений часто отсутствуют или крайне ограничены количественные оценки их состояния и неизбежно применение преимущественно качественных описательных характеристик. При этом необходимо применение одинаковых методик обработки и анализа исходной информации. Лучшим решением этой актуальной проблемы является разработка и утверждение нормативно-методического документа, регламентирующего применение диаграммы « $p — G$ » в процедурах контроля, оценки и регулирования уровня безопасности эксплуатируемых сооружений.

4.8. Необходимо включение в состав указанного нормативного документа также методики учета в составе G стоимостной оценки собственного и стороннего ущерба [40]. Указанная стоимостная оценка должна включать косвенный ущерб, который понесут объекты, не попавшие в зону действия аварии, неполученную выгоду, социальный ущерб в форме денежных оценок «стоимости жизни» [31, 32], а также дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварии.

5. Об использовании результатов работы в практике эксплуатации «старых» сооружений

Разработанная методика может быть применена в ходе выполнения следующих видов работ:

5.1. Комиссионное обследование состояния эксплуатируемых сооружений. Необходимым условием является включение в комиссию по обследованию сооружения экспертов, длительное время участвовавших в эксплуатации данного сооружения и имеющих навык применения предлагаемой методики. Наряду с этим в состав комиссии следует включить хотя бы одного эксперта, имеющего большой опыт в оценке риска сооружений. В случае обследования сооружений 1-го и 2-го классов заключительные оценки как индекса состояния сооружения, так и риска возможной аварии должны выполняться с привлечением оценок, ранее выполненных в ходе разработки экспертизы деклараций безопасности и критериев безопасности сооружения комиссиями квалифицированных экспертов. Возможно также и дистанционное привлечение экспертов, в том числе в форме видеоконференции.

5.2. Разработка экономического обоснования эффективности ремонта или реконструкции эксплуатируемого «старого» сооружения в составе проекта, выполняемая в соответствии с постановлением Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 [41]. Диаграмма « $p — G$ » при этом используется при обосновании и выборе оптимального варианта конструкции на основе варьирования сочетаний вероятности возможной аварии и связанного с ней ущерба.

5.3. Разработка декларации безопасности как составной части проекта строительства или реконструкции сооружения с приложением: а) результатов комиссионного обследования и оценки состояния сооружения; б) оценки вероятности аварии, а также оценки собственного и стороннего ущерба [25, 40]; в) оценок «риска аварии» и обоснования того, что указанные оценки не выходят за границу «зоны допустимого риска» (рис. 2).

Заключение

1. Согласно п. 8.22 действующего нормативного документа [14] допускается применение вероятностного анализа для обоснования принимаемых технических решений системы «сооружение — основание». Оценка допустимости риска аварий

сооружений является необходимым элементом внедрения вероятностных методов и положений теории риска в современную практику проектирования и эксплуатации ответственных сооружений.

Применительно к указанной проблематике рассмотрены возможности уточнения трех взаимосвязанных методик: а) формализованной оценки состояния «старых», т.е. эксплуатируемых длительное время сооружений; б) оценки вероятности аварии «старых» сооружений; в) построения диаграммы связи компонентов риска «вероятность аварии p — ущерб G » (диаграммы « $p — G$ »), аналогичной известной диаграмме « $F — N$ ».

2. Предложена уточненная описательная шкала экспертной оценки уровней повреждений сооружений I , которая обобщает опыт обследований и экспертиз деклараций безопасности более 180 гидротехнических объектов страны [15, 16]. На экспертной основе предложены соответствующие численные оценки (метки) шкалы, ранжированные по возрастанию уровня повреждений. Для уточнения указанных численных оценок применена методика тернарных сравнений, предложенная И.Ф. Шахновым [20—22]. Уточненная численная шкала и построенный на ее основе график (см. рис. 1) универсальны и рекомендуются для практического применения при обследовании состояния «старых» сооружений.

3. Предложена методика оценки вероятности аварии «старых» сооружений, исходными данными для которой являются оценки состояния сооружений по указанной универсальной численной шкале. Оценены вероятность аварий p и возможный ущерб G для 14 плотин. Эти данные применены при иллюстрации предложенной методики построения диаграммы « $p — G$ ».

4. На данной стадии работы следует учитывать оценочный иллюстративный характер представленной диаграммы « $p — G$ » (см. рис. 2). Оценочный характер диаграммы связан с недостаточным объемом исходных экспертных оценок состояния конкретных сооружений, необходимых для оценки вероятности аварии. Недостаточно оказалось и оценок ущерба от возможной аварии. Практическое применение диаграммы « $p — G$ » (см. рис. 2) возможно на предварительных стадиях оценки безопасности длительно эксплуатируемых сооружений. Очевидна необходимость дальнейшего уточнения

представленной диаграммы « $p — G$ » на основе расширения базы данных обследованных объектов. Важный вопрос, возникающий при разработке диаграммы « $p — G$ », — это привлечение результатов других исследователей данной темы [37].

5. Основная трудность в практическом применении излагаемой методики состоит в получении достаточного количества исходных экспертных оценок состояния обследуемого сооружения. Перспективным для оценки состояния сооружений и расширения состава («размножения») исходной выборки представляется применение методов «искусственного интеллекта», в т.ч. нейронной сети. Необходимый для обучения нейронной сети исходный массив будет формироваться по имеющимся результатам обследований более 180 плотин.

6. Применение диаграмм « $p — G$ » является элементом вероятностного анализа и процедуры оценки риска. Диаграммы « $p — G$ » аналогичны известным диаграммам « $F — N$ ». Совместное применение указанных диаграмм определяет критерии безопасности сооружений — оценки риска не должны выходить за границы зоны «допустимого риска» сооружений в соответствии с определением, данным в [6]. Следует отметить также возможность создания единой диаграммы « $p — G$ » путем включения в состав ущерба G оценок «стоимости жизни», в том числе предложенных в работах [31, 32].

7. Диаграммы « $p — G$ » могут быть применены для контроля, оценки и регулирования уровня безопасности «старых» сооружений при обследовании, декларировании безопасности и разработке проекта работ по реконструкции и ремонту сооружений. Поиски оптимального инженерного решения по ремонту и реконструкции «старых» сооружений при этом базируются на более гибком варьировании сочетаний вероятности аварий p и вызываемого аварией ущерба G .

8. Методика, примененная для оценки состояния «старых» гидротехнических сооружений (в том числе на основе применения формулы (3)) и для уточнения диаграммы « $p — G$ », позволяет оперативно проводить оценку риска в процессе эксплуатации. Методика может быть применена в ходе комиссионного обследования состояния сооружений. Необходимым условием при этом является включение в комиссию экспертов, имеющих навык применения данной методики.

9. Комиссионное обследование сооружений проводится в два этапа. На первом этапе оценивается состояние сооружения на основе применения предложенного индекса состояния I^p .

10. Для сооружений, находящихся в «потенциально опасном» и «предаварийном» состоянии, на втором этапе работы комиссии и с участием привлеченных экспертов должна быть выполнена оценка риска. В соответствии с диаграммой « p — G » должна быть определена область, в которую попадает обследуемое сооружение: «повышенного риска» или «условно приемлемого риска». Попадание сочетания « p — G » в зону «повышенного риска», в отличие от зоны «условно приемлемого риска», требует более сжатых сроков проведения ремонта с целью перевода сооружения в зоны «условно приемлемого» и «приемлемого» риска [37]. Необходим также детальный контроль состояния сооружения, в том числе более частые комиссионные обследования. На втором этапе работы комиссии должны быть предложены предварительные варианты ремонтно-восстановительных работ или работ по реконструкции с последующим определением оптимального инженерного решения на стадии проекта.

Литература

1. Быков А.А., Порфирьев Б.Н. Об анализе риска, концепциях и классификации рисков // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 3. № 4. С. 319—337.
2. Быков А.А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 3. С. 4—7.
3. John M. Cyganiewicz, John D. Smart. U.S. Bureau of Reclamation's Use of Risk Analysis and Risk Assessment in Dam Safety Decision Making. ICOLD (2000) — Trans. of 20-th Congress, Q. 76 «The Use of Risk Analysis to Support Dam Safety Decisions and Management», Beijing, China.
4. Elya B. Joffe. Risk Acceptability (Tolerability) in System Safety: Concepts and Methodology. IEEE Product Safety Engineering Society. 10th Annual Symposium on Product Compliance, 2013, Austin, USA.
5. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
6. Быков А.А., Порфирьев Б.Н. О взаимосвязи риска с родственными понятиями и терминологии риск-менеджмента // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. С. 4—10.
7. Декларация Российского научного общества анализа риска «О предельно допустимых уровнях риска» // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 3. № 2. С. 162.
8. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. FEMAP-1025, January 2015.
9. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса (утверждена приказом МЧС РФ и Минэнерго РФ от 29.12.2003 № 776/508).
10. Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений. ОАО «НИИЭС». 2004.
11. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, РД 153-34.2-21.342-00. РАО «ЕЭС России». 2001.
12. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений. Утверждена приказом МЧС России и Минтранса России от 02.10.2007 № 528/43.
13. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений). Утверждена приказом Ростехнадзора от 29 марта 2016 г. № 120 (введена в действие с февраля 2017 г.)
14. Золотов Л.А., Иващенко И.Н., Радкевич Д.Б. Оперативная количественная оценка уровня безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1997. № 2. С. 13—19.
15. Иващенко И.Н., Радкевич Д.Б., Иващенко К.И. Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований // Гидротехническое строительство. 2012. № 7. С. 22—28.
16. Ivashchenko I.N., Radkevich D.B. Financial support of civil responsibility for dams. ICOLD (2012) — Trans. of 24-th Congress, Q. 93 «Safety of Dams», Kyoto, Japan.
17. Иващенко И.Н. Инженерная оценка надежности грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат. 1993. 141 с.
18. Ivashchenko K.I., Lavrov D.B., Chernilov A.G., Ivashchenko I.N. Expert system: the management of dam safety in operation. Proceed. Int. Conf. & Exhib. Ljubljana, 2008.
19. Айвазян С.А. и др. Прикладная статистика. Т. 1 (1983 г.). Т. 2 (1985 г.). Т. 3 (1989 г.). М.: Финансы и статистика.

20. Шахнов И.Ф. Квантификация предпочтений, выраженных в вербальной форме // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 1. С. 77—79.
21. Шахнов И.Ф. Установление количественных значений показателя степени предпочтительности альтернатив на основе качественной информации о предпочтениях пользователя. Всероссийская конференция «Знания — Онтологии — Теории» (ЗОНТ-09).
22. Шахнов И.Ф. Применение метода тернарных сравнений в задачах квантификации. Автомат. и телемех. 2005. 7. С. 154—163; Autom. Remote Control, 66:7 (2005). С. 1162—1170.
23. В окрестностях самой высокой дамбы в США объявили эвакуацию. Русская служба BBC, 13 февраля 2017 г. <http://www.bbc.com/russian/news-38953434>
24. USBR et al. A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment dams by Internal Erosion and Piping, Guidance and Supporting Documents, USBR, USACE, UNSW, URS, August 2008.
25. СТО 70238424.27.140.026-2009. Гидроэлектростанции. Оценка и прогнозирование рисков возникновения аварий гидротехнических сооружений. Нормы и требования. М. 2009.
26. Fell R., Wan C.F. Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping in the foundations and from embankment to foundation. UNICIV Report No. R-436, Sydney, Australia, 2005, University of New South Wales, 178 p.
27. Троицкий А.В., Школьников С.Я. Опыт применения методики укрупненной оценки ущерба при гидродинамической аварии гидротехнических сооружений. Безопасность энергетических сооружений (БЭС). Вып. 15. М.: НИИЭС. 2005. С. 283—295.
28. Радкевич Д.Б., Чернилова Е.А., Школьников С.Я. Расчет размера вреда при авариях плотин водохранилищ. Безопасность энергетических сооружений (БЭС). Вып. 17. М.: НИИЭС. 2010. С. 36—50.
29. Школьников С.Я. К вопросу о конструировании консервативных конечно-разностных схем для дифференциальных уравнений неустановившегося течения в непризматическом русле // Гидротехническое строительство. 1998. № 5. С. 12—18.
30. Уровень инфляции в России. <http://xn----ctbjnaatncev9av3a8f8b.xn--p1ai/>
31. Быков А.А. Цена риска как экономический регулятор уровня безопасности: актуарные модели оценки стоимости статистической жизни / Под ред. члена-корреспондента РАН Б.Н. Порфирьева. М.: Анкил. 2014. 280 с.
32. Иващенко И.Н., Иващенко К.И. Стоимостная оценка социального ущерба, вызванного аварией, и безопасность сооружений // Проблемы анализа риска. 2016. Т. 13. № 1. С. 66—76.
33. Быков А.А. Предельно допустимые уровни риска (пояснительная записка) // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 3. № 2. С. 163—168.
34. Bowles D.S. Tolerable Risk for Dams: How Safe Is Safe Enough? US Society on Dams Annual Conference, March 2007, Philadelphia, Pennsylvania. 24 p.
35. Bell R., Glade T. & Danscheid M. Challenges in defining acceptable risk levels. Department of Geography, University of Bonn, Germany. 2006. 10 p.
36. Dam Safety Public Protection Guidelines. A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office Denver, Colorado August 2011.
37. Акимов В.А., Быков А.А., Востоков В.Ю., Долгин Н.Н., Кондратьев-Фирсов В.М., Макиев Ю.Д., Малышев В.П. Методики оценки рисков чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций (Руководство по оценке рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в том числе при эксплуатации критически важных объектов Российской Федерации) // Проблемы анализа риска. Т. 4. 2007. С. 369—404.
38. СП 11-113-2002. Порядок учета инженерно-технических мероприятий гражданской обороны и мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций при составлении ходатайства о намерениях инвестирования в строительство и обоснований инвестиций в строительство предприятий, зданий и сооружений. МЧС, М., 2003.
39. СП 58.133330.2012. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. М., 2012.
40. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Оценка ущерба. Термины и определения. ГОСТ Р 22.10.01-2001 (утв. постановлением Госстандарта РФ от 21.08.2001 № 340-ст).
41. Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изменениями на 28 июля 2015 г.).
42. Правила определения величины финансового обеспечения гражданской ответственности за вред, причиненный в результате аварии гидротехнического сооружения. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 18 декабря 2001 г. № 876.

Приложение

Шкала оценки нарушений условий эксплуатации и повреждений сооружений

Со- стоя- ние	Оценка индекса <i>I</i>		Качественные признаки нарушений состояния и правил эксплуатации, обнаруженные при обследованиях
	<i>p</i>	<i>jk</i>	
A ₁	0	0	Каких-либо нарушений и повреждений сооружения, отклонения от требований проекта, норм и правил в ходе обследования не обнаружено
A ₂	1	0,05	S, D, F: Отмечаются небольшие нарушения и повреждения сооружений на отдельных участках. O. Незначительные отклонения от требований проекта, норм и правил технической эксплуатации, а также объектовых инструкций. Неполная комплектация, а также недостаточный образовательный уровень эксплуатационного персонала. Неполная комплектация технической документации
A ₃	1,5	0,15	S, D, F. Мелкие отдельные повреждения сооружений. O. Отдельные нарушения требований норм и правил, а также объектовых инструкций. Отсутствие (или незаконченное оформление) утвержденных в установленном порядке деклараций и критериев безопасности, а также расчетов возможного ущерба от аварии. Небольшие нарушения сроков выполнения предписаний комиссий
A ₄	2	0,37	S, D, F. Незначительные локальные повреждения сооружений, не создающие непосредственной угрозы аварии и не влекущие за собой ограничений условий эксплуатации. Выход из строя части КИА. На некоторых участках напорного фронта фиксируется постепенное повышение и приближение к критериальным значениям отдельных показателей состояния сооружений, контролируемых инструментальными средствами и визуально. O. Частичное невыполнение предписаний комиссий
A ₅	2,5	0,9	S. На отдельных участках затруднен отвод воды из дренажной канавы из-за сильного захламления, а также роста кустарника и отдельных небольших деревьев. D. Локальные деформации гребня и откосов грунтовых плотин, связанные в основном с инфильтрацией и уплотнением грунта. Местные повреждения, в т. ч. отдельные неглубокие раковины поверхностей водосбросов, креплений отводящего канала и стенок водосбросов. F. Незначительное ограничение пропускной способности водосбросов из-за препятствий в нижнем или верхнем бьефе, фильтрационные протечки в обход закладных частей затворов. Коррозионные повреждения элементов механического оборудования и затворов на небольшой площади. O. Существенное нарушение предписаний комиссий, в т. ч. в части уточнения внешних воздействий (в т. ч. параметров паводков, сейсмических воздействий и др.). Нарушение планов ремонтов. Человеческий фактор
A ₆	3,0	2,12	Достижение одним или несколькими диагностическими показателями критерия безопасности К1. S. Снижение работоспособности дренажной системы (повышение градиентов напора, повышение или скачкообразное понижение фильтрационных расходов на локальных участках). D. Неравномерная осадка и пониженные отметки гребня грунтовых плотин и дамб, повреждения и частичные разрушения крепления откосов. Локальные разрушения бетона водосливных граней, трещины, сколы, разрушение поверхностного слоя бетона с частичным обнажением арматуры в зоне переменного уровня воды. F. Пониженная надежность механического и электрического оборудования, отсутствие или неработоспособность резервных источников питания подъемных устройств затворов. Практически полное отсутствие окраски, коррозия металлоконструкций затворов. O. Снижение прочности и надежности элементов гидроэнергетического оборудования (в т. ч. недопустимая вибрация технологических люков и крышек турбин в напорных водоводах гидроэлектростанций и др.)
A ₇	3,5	3,95	Достижение оценок одного или нескольких диагностических показателей индекса <i>I</i> = 3,5. S. Частичный отказ дренажной системы, локальные выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и ограждающих дамб ЗШО, сопровождаемые неорганизованным отводом фильтрующей воды. D. Нарушение проектного заложения откосов грунтовой плотины. Недостаточная устойчивость грунтовой пригрузки и тела экрана плотины. Осадки и недостаточное превышение гребня грунтовой плотины или ее противофильтрационного элемента над уровнем воды при форсированном подпорном уровне. Образование продольных и поперечных трещин (небольшого раскрытия) на локальных участках грунтовых плотин. Образование трещин, сколов, глубоких раковин, разрушение бетона, обнажение арматуры бычков и водобоев водопропускных сооружений. Выходы воды по вертикальным трещинам, строительным и температурным швам на низовой грани бетонных плотин. Низкая эффективность цементационной завесы в основании плотины. F. Ограничение максимального расхода водосливной плотины из-за повреждения водосливных поверхностей, бычков, устоев и других конструкций водосбросов и их оснований; образования воронок размыва в нижнем бьефе; ненадежная работа боновых заграждений, а также захламления в нижнем бьефе. Необходимость замены электрооборудования подъемных механизмов затворов, замены или реконструкции механического оборудования водосбросов, ремонта затворов, подкрановых и подъездных путей

Окончание приложения

Со- стоя- ние	Оценка индекса I		Качественные признаки нарушений состояния и правил эксплуатации, обнаруженные при обследованиях
	I ^в	I ^к	
A ₈	4	4,56	Достижение оценками одного или нескольких диагностических показателей индекса $I = 4$. С. Выход из строя (или отсутствие) дренажной системы, сосредоточенный выход фильтрационных вод на низовой откос или (и) бортовые примыкания плотин, появление признаков суффозии на локальных участках. Д. Недостаточная устойчивость откосов, развитие процессов разрушения гребня и откосов грунтовых плотин и ЗШО с образованием многочисленных продольных и поперечных трещин, локальных обрушений и оползней. Волновая переработка верхового откоса плотин. Недостаточное (ниже проектного) превышение гребня плотины или ее противофильтрационного элемента над НПУ. Наличие многочисленных повреждений, в т. ч. связанных с пропуском нерасчетного паводка и превышением поверочного расчетного расхода. Локальные оползания, размывы низовых откосов грунтовых плотин, образование трещин, проломов понура и рисбермы плотины. Развитие процесса снижения эффективности цементационной завесы в основании плотины. Е. Необходимость пропуска поверочного расхода при форсировке уровня водохранилища до отметок, превышающих отметку ФПУ. Выработка ресурса и необходимость замены подъемных механизмов затворов. Ограничение максимального расхода водосливной плотины в связи с частичным выходом из строя конструктивных элементов водосливов и водовыпусков
A ₉	4,5	4,83	Достижение оценками одного или нескольких диагностических показателей индекса $I = 4,5$. С. Выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и ограждающих дамб ЗШО, сопровождаемые суффозией, локальные протечки воды в бортовых примыканиях плотин. Д. Разрушение поверхности водослива (в т. ч. сопровождаемое повреждением основания) с обнажением рабочей арматуры. Интенсивные осадки основания и гребня грунтовых и бетонных плотин. Оседание земной поверхности, в том числе из-за наличия горных выработок, весьма значительная осадка гребня земляной плотины. Нарушение проектного заложения, оползание откосов грунтовых плотин и дамб на участках протяженностью до нескольких десятков метров, в т. ч. с частичным захватом гребня. Выход из строя цементационной завесы в основании плотины. Е. Пониженная работоспособность и ограничение максимального расхода водосливной плотины из-за разрушений поверхности водосброса и его основания; засорения входа или (и) выхода водосбросного тракта топляками и обломками бетона; частичного выхода из строя и необходимости замены основных и аварийно-ремонтных затворов и их механического и электрического оборудования. Несоответствие пропускной способности водопропускных сооружений требованиям современных нормативных документов
A ₁₀	5	5	Достижение одним или несколькими диагностическими показателями критерия безопасности K2. С. Резкий рост фильтрационных расходов через тело и основание плотин с тенденцией к дальнейшему росту, резкое повышение поверхности депрессии выше проектного положения, рост градиентов фильтрационного давления на входе в дренаж. Выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и дамб при отсутствии или неэффективной работе дренажных устройств, резкое увеличение интенсивности суффозионных процессов. Многочисленные протечки воды в бортовых примыканиях плотин. Д. Отсутствие стабилизации или увеличение интенсивности осадки основания и гребня грунтовых и бетонных плотин. Недопустимое понижение отметок гребня плотины или верха противофильтрационного элемента (превышение над уровнем верхнего бьефа существенно ниже проектного значения). Увеличенная по сравнению с проектом крутизна откосов дамб, прогрессирующее развитие продольных и поперечных трещин на гребне и откосах дамб, оползание откосов грунтовых плотин и дамб, частичный размыв гребня и откосов на одном или нескольких участках. Переувлажнение и промерзание низового откоса, образование наледей в местах выходов фильтрационных вод, появление опасности обрушения масс промороженного грунта с угрозой потери устойчивости низового откоса. Е. Выход из строя конструкций водосбросных и водопропускных сооружений или (и) их оснований; затворов и их механического и электрического оборудования. Резкое ограничение пропускной способности сооружений по условиям состояния берегов и креплений русла в нижнем бьефе, недопустимых размывов дна вблизи сооружений. О. Угроза прорыва напорного фронта, очевидная необходимость принятия срочных мер по предотвращению необратимого процесса разрушения сооружения и катастрофических разрушений в нижнем бьефе. Реализация Плана действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций (в том числе эвакуация населения и понижение уровня верхнего бьефа)
A ₁₁	6	5,1	О. Прогрессирующий процесс разрушения сооружения, образование прорана в теле плотины, формирование и распространение волны прорыва в нижнем бьефе

Примечание: а) при определении текущего индекса I необходимо оценивать и учитывать и менее серьезные нарушения; б) приведены средние значения индекса I — неизбежный разброс экспертных оценок учитывается при определении параметров распределения индекса I и оценке вероятности аварии; в) характеристика критериев K1 и K2 дана в п. 1.4.

Сведения об авторах

Иващенко Илья Николаевич: доктор технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института энергетических сооружений (АО «НИИЭС»)

Количество публикаций: более 70, 3 монографии

Область научных интересов: безопасность сооружений, оценка и регулирование риска

Контактная информация:

Адрес: 115407, г. Москва, Кленовый бульвар, 15-1-116

Тел.: +7 (499) 615-50-02

E-mail: i-n-i@list.ru

Иващенко Константин Ильич: кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-технического центра «Гидротехбезопасность»

Количество публикаций: более 40

Область научных интересов: оценка и регулирование риска, искусственный интеллект

Контактная информация:

Адрес: 115407, г. Москва, Кленовый бульвар, 15-1-116

Тел.: +7 (495) 943-04-86

E-mail: ki@iwaschenko.ru

Гончаров Евгений Алексеевич: учебный ассистент Научно-исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ «Высшая школа экономики»), факультет математики

Количество публикаций: 2 (подготовлены к печати)

Область научных интересов: голоморфная динамика, топология, математическая статистика, динамические системы, оценка рисков

Контактная информация:

Адрес: 117218, г. Москва, ул. Волгоградский просп, 128-5-59

Тел.: +7 (919) 771-06-31

E-mail: eagoncharov@edu.hse.ru

Комельков Леонид Владимирович: ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института энергетических сооружений (АО «НИИЭС»)

Количество публикаций: более 20

Область научных интересов: безопасность гидротехнических сооружений, гидродинамические нагрузки и реакция сооружений

Контактная информация:

Адрес: 125481, г. Москва, ул. Свободы, д. 71, к. 1, кв. 384

Тел.: +7 (499) 492-74-12

E-mail: komelkovlv@niies.ru