

УДК 311.2:314
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-6-66-83>

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2021

Безопасность и риск эксплуатируемых сооружений: методология оперативной оценки

Иващенко И.Н.*,

НИИ энергетических сооружений,
125362, Россия, г. Москва,
Строительный проезд, д. 7а

Гончаров М.А.,

НИУ «Высшая школа экономики»,
109028, Россия, г. Москва,
Покровский бульвар, д. 11

Аннотация

Представлены две методики оценки риска гидротехнических сооружений (плотин): детерминированная и вероятностная. Методика детерминированной оценки риска использует индексы риска (индекс состояния плотины I), а также методы нечеткой логики для объединения исходной количественной и качественной (экспертной) информации о состоянии эксплуатируемой плотины. Применяемый подход соответствует рекомендациям ИЕС 31010: 2019. «Управление рисками — Методы оценки рисков. NEQ». Детерминированные оценки состояния в форме индексов риска использованы также в качестве исходных данных при оценке вероятности аварии и разработке вероятностной методики оценки риска.

Модифицированные в процессе исследований исходная база данных, а также шкала оценки повреждений обобщают опыт обследований и экспертизы деклараций безопасности более 180 гидротехнических сооружений (ГТС) России. Дано описание методик начальной оценки и оцифровки (квантификации) индекса состояния I , а также объединения исходной количественной и качественной (экспертной) информации о различных повреждениях.

Показана практическая целесообразность и возможность категоризации (с нечеткими границами) состояний и уровней повреждений ГТС. Применительно к различным состояниям и уровням повреждений даны предложения по практическим действиям по обеспечению безопасности плотин в процессе мониторинга, обследования, разработки проекта реконструкции и его экспертизы.

В результате исследований установлена зависимость вероятности аварии $p_{failure}$ от среднего значения индекса I_{cp} и представлен график " $p_{failure} - I_{cp}$ ", который хорошо описывается экспонентой и удобен для практического применения. Значение I_{cp} определяется по данным визуального и инструментального контроля состояния плотины, а также по экспертным оценкам. Представлена методология построения указанного графика. Построение указанного графика стало возможным на основе: статистической обработки, доказательства нормальности распределения индексов I и оценки (по построенным для каждого уровня повреждений функциям распределения) вероятности аварии $p_{failure}$. График может быть применен для быстрой оценки вероятности аварии плотины по результатам мониторинга состояния, а также при обследовании и экспертизе проекта.

Сформулированы предложения по практическому применению предлагаемых методик оценки риска эксплуатируемых плотин, а также рассмотрена ближайшая перспектива исследований в сфере оценки риска и обеспечения безопасности плотин.

Ключевые слова: безопасность плотин, количественные и качественные оценки, индекс риска, вероятность аварии, допустимый риск, оперативная оценка, методология и методика, нормативное регулирование.

Благодарности: авторы выражают признательность Дмитрию Борисовичу Радкевичу, который предоставил исходные материалы для исследований, а также высказал рекомендации по совершенствованию нормативно-правового регулирования безопасности плотин.

Для цитирования: Иващенко И.Н., Гончаров М.А. Безопасность и риск эксплуатируемых сооружений: методология оперативной оценки // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 6. С. 66—83, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-6-66-83>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Safety and Risk of Operating Facilities: Rapid Assessment Methodology

Ilya N. Ivashchenko*,

Research Institute of Energy Structures,
Construction passage, h. 7a,
Moscow, 125362, Russia

Mikhail A. Goncharov,

Higher School of Economics —
National Research University,
Pokrovsky blvd, 11, Moscow,
109028, Russia

Abstract

Two methods for methodology uses “risk indices” (dam condition index I), as well as “fuzzy logic methods” to combine the original quantitative and qualitative (expert) information on the operated dam condition. The approach applied is in accordance with the recommendations of IEC 31010: 2019. Risk Management — Risk Assessment Techniques. Deterministic assessments of the condition in the form of “risk indices” were also used as input data in assessing the probability of the failure and in developing a probabilistic risk assessment methodology.

The original database, as well as the damage assessment scale, modified in the course of the research, summarize the experience of surveys and examination of safety declarations of more than 180 hydraulic works in Russia. A description is given of the methods of initial assessment and digitization (quantification) of the condition index I , as well as combining the initial quantitative and qualitative (expert) information about various damages.

The practical feasibility and the possibility of categorizing (with fuzzy boundaries) conditions and levels of damage to hydraulic structures are shown. With regard to various conditions and levels of damage, proposals are made for practical actions to ensure the safety of dams in the process of monitoring, inspection, development of a reconstruction project and its expertise.

As a result of the research, the dependence of the probability of the failure $p_{failure}$ on the average value of the I_{cp} index has been established and the graph “ $p_{failure} - I_{cp}$ ” is presented, which is well described by the exponential and is convenient for practical application. The value of I_{cp} is determined according to the data of visual and instrumental control of the dam condition of the as well as according to expert estimates. The methodology for creation the indicated graph is presented. The creation of this graph became possible on the basis of: statistical processing, proof of the “normality” of the distribution of the I indices and the estimation (according to the distribution functions constructed for each level of damage) the probability of the failure $p_{failure}$, as well as during the survey and examination of the dam project.

Proposals are formulated for the practical application of the proposed methods for assessing the risk of operating dams, and the near-term prospect of research in the field of risk assessment and ensuring dam safety is formulated.

Keywords: dam safety, quantitative and qualitative assessments, risk index, failure probability, permissible risk, rapid assessment, methodology and technique, regulation.

Acknowledgments: the authors express gratitude to Dmitry Borisovich Radkevich, who provided initial materials for research, and also made recommendations for improving the normative regulation of dam safety.

For citation: Ivashchenko I.N., Goncharov M.A. Safety and risk of operating facilities: rapid assesment methodology // Issues of Risk Analysis. 2021;18(6):66-83 (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-6-66-83>

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Методика оценки состояния и риска эксплуатируемых плотин в детерминированной постановке
2. Методика оценки состояния и риска эксплуатируемых плотин в вероятностной постановке
3. Критерии безопасности длительно эксплуатируемых плотин. Определение допустимого уровня риска
4. О перспективе дальнейших исследований
5. Применение результатов в практике оценки и обеспечения безопасности эксплуатируемых плотин

Заключение

Литература

Введение

Целью исследования является разработка методологии оценки риска аварии гидротехнических сооружений (ГТС) и создание на ее основе методик: а) оперативной оценки уровня риска (как в детерминированной, так и в вероятностной постановке); б) оценки допустимого риска.

Нормативно-правовой основой исследования является Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», принятый в 1997 г. Эффективность применения положений Закона подтверждена и при проектировании ответственных ГТС, и, особенно, в практике эксплуатации плотин.

Применяемые в работе положения теории риска и риск-менеджмента тесно связаны [1] и включают: контроль и оценку состояния эксплуатируемых плотин; анализ, оценку и регулирование риска. Основной задачей риск-менеджмента эксплуатируемых ГТС является предотвращение наиболее опасной аварии, сопровождаемой прорывом напорного фронта. Риск-менеджмент безопасности выполняется при мониторинге и обследовании плотин, декларировании безопасности, разработке проектов ремонта и реконструкции.

Целесообразно выделить две основных стадии управления рисками. Первая стадия выполняется во время обследования (планового или внеочередного, вызванного серьезными повреждениями) и завершается составлением акта, в котором формулируются и предварительные предложения по регулированию риска. Вторая стадия управления рисками ГТС осуществляется в процессе разработки и утверждения декларации безопасности, экспертизы декларации и критериев безопасности, а также выполнения технических и организационных рекомендаций по обеспечению безопасности эксплуатируемых плотин.

1. Методика оценки состояния и риска эксплуатируемых плотин в детерминированной постановке

1.1. Представленная в работе методология оценки риска ГТС использует индексы риска, а также методы нечеткой логики для объединения исходной количественной и качественной (экспертной) информации о состоянии эксплуатируемой плотины. Применяемый подход соответствует рекомендациям ГОСТ Р 58771-2019 [2].

1.2. База данных и безразмерная порядковая шкала повреждений разработаны [3, 4] и модифицированы в ходе данного исследования по результатам обследований более 180 ГТС (плотин и золошлакоотвалов, далее — плотин), в том числе 130 больших плотин (высотой $H \geq 10$ м). Основная часть плотин (75%) находится в эксплуатации более 50 лет. Поэтому в работе широко использована качественная (экспертная) информация о состоянии и повреждениях плотин, которая, как правило, преобладает в актах обследования и декларациях безопасности длительно эксплуатируемых плотин. Под повреждением понимается конструктивное или иное нарушение действующих норм, правил или (и) положений проекта, которое, не будучи устранено, может привести (в ближайшей перспективе или спустя некоторое время [5]) к возникновению чрезвычайной ситуации, в том числе формированию волны прорыва в нижнем бьефе. Отметим, что среди более 20 методик оценки риска, рекомендованных в [2], около половины методик являются качественными или широко используют качественную исходную информацию.

1.3. Три раздела базы данных соответствуют трем основным процессам (обобщенным сценариям), которые могут привести к аварии плотины: фильтрации (S); разрушению и (или) потере устойчивости (D); переливу через гребень и формированию волны прорыва (F). В составе каждого раздела базы данных выделены уровни повреждений, типы конструкций и соответствующие им перечни объектов. Отдельные таблицы базы данных представлены для описательной и соответствующей порядковой шкалы повреждений, а также для подробной характеристики каждого объекта.

1.4. Могут быть выделены три основных состояния эксплуатируемых гидротехнических сооружений: «нормальное», «потенциально опасное» и «предаварийное» (рис. 1).

Опыт работы с базой данных показывает, что при обследовании плотин можно достаточно четко выделить 9 уровней повреждений. Уровни повреждений от 2 до 5, соответствующие нормальному состоянию плотины, относятся в основном к нарушениям организационного характера и не требуют значительных материальных затрат. Уровни 7 и 8 представляют особый интерес, поскольку на этих уровнях все еще



Рис. 1. Иерархия возможных состояний и повреждений плотины

Figure 1. Hierarchy of possible dam conditions and damages

могут быть приняты меры по предотвращению аварии и исключению человеческих жертв.

1.5. Количественная и качественная оценка как исходной информации, так и уровня риска обследуемой конструкции в целом выполнена на основе применения специального показателя — индекса состояния I [3, 4]. Индекс состояния I соответствует определению индекса риска, данному в [2], и характеризует степень отклонения состояния эксплуатируемого сооружения (степень «старения» сооружения) от требований нормативных документов и требований проекта. Таким образом, оценивается степень приближения сооружения к аварийному состоянию и может быть получена детерминированная оценка риска аварии [2]. Для начальной оценки уровня безопасности эксплуати-

руемой плотины, выполняемой во время обследования, введена ординарная шкала от 0 до 6. Следует отметить широкое применение в мировой практике аналогичного индекса (index RI) для оценки состояния и риска различных объектов (в том числе плотин) [6].

1.6. Описательный раздел шкалы повреждений и соответствующий раздел ординарной шкалы (от 0 до 6) используются при экспертной оценке «индекса состояния» (I^e). Часть описательной шкалы (выдержка для восьмого уровня повреждений, соответствующего значению $I^e = 4$) представлена в табл. 1.

1.7. Обобщение опыта работы с базой данных и шкалой повреждений на основе применения индекса риска I показывает возможность выделения (категоризации) состояний и уровней повреждений ГТС.

Таблица 1. Описательная шкала для оценки состояния и уровней повреждений плотин (выдержка)

Table 1. Descriptive scale for assessing the condition and damage levels of dams (extract)

Достижение уровня $I \geq 4$ (критерий K2 — см. раздел 4) по одному или нескольким диагностическим показателям.

S. Отказ (или отсутствие) дренажной системы или ее элементов, неудачное (непроектное) расположение, засорение, кольматация дренажей. Превышение проектных (критериальных) значений пьезометрических уровней, градиентов напора, фильтрационных расходов. Концентрированный выход фильтрующей воды на локальные участки низового откоса или (и) бортовые примыкания плотин, начальные признаки суффозии. Повышенная фильтрация на контакте бетонных и грунтовых сооружений.

D. Наличие многочисленных повреждений, в том числе связанных с превышением поверочного расчетного расхода и пропуском нерасчетного паводка. Снижение устойчивости откосов, развитие процессов разрушения гребня и откосов земляных плотин с образованием многочисленных продольных и поперечных трещин, локальных провалов, обвалов и оползней, эрозия низовых откосов плотин. Волновая переработка верховых откосов плотин. Недостаточное (ниже расчетного проектного) превышение гребня плотины или его противофильтрационного элемента над нормальным подпорным уровнем. Разрушение поверхности бетона глубиной до 50—70 см с обнажением арматуры. Частичное разрушение, образование трещин, проломов понура и рисбермы плотины. Развитие процесса снижения эффективности цементной завесы в основании плотины.

F. Ограничение максимального расчетного расхода из-за частичного выхода из строя элементов водосбросов и водосливов. Необходимость пропуска поверочного расхода при уровне водохранилища, превышающем отметку форсированного подпорного уровня. Окончание гарантийного срока службы, пониженная надежность и необходимость замены подъемных механизмов затворов.

Примечание. При экспертном оценивании индекса I необходимо учитывать повреждения, хотя и не совпадающие с формулировками шкалы, но адекватные по степени опасности, а также менее серьезные нарушения.

В то же время неизбежны нечеткие оценки для пограничных состояний и уровней повреждения плотин. Последнее обстоятельство является следствием широкого применения в данной методике не только инструментальных, но также экспертных оценок состояния ГТС.

1.8. Табл. 2 и 3 иллюстрируют структуру и пример детальной оценки и классификации состояний и повреждений плотин в соответствующих разделах базы данных. В базе данных представлены подробные описания повреждений каждой плотины и их индивидуальные показатели состояния (индексы риска I^p). Исходные значения показателей состояния, присвоенные экспертами по результатам обследования плотин, уточнены методом парных сравнений. Подробная классификация указанных 9 уровней повреждения представлена в отдельном разделе базы данных. В этом же разделе приводится (столбец 5 табл. 3) перечень кодов повреждений и ключевых слов, используемых для определения плотин-аналогов исследуемой плотины.

1.9. Первоначальная оценка возможности аварии плотины осуществляется на основе сопоставления результатов обследования (или мониторинга) со шкалой (см. п. 2.13). Если индекс I оказывается меньше или равен 3, то состояние плотины оценивается как нормальное. Никаких серьезных ремонтов не требуется. Соответствующие мероприятия выполняются в рамках организационно-технического обслуживания плотины.

Если индекс I больше 3, но меньше или равен 4 (диагностируется потенциально опасное состояние, т. е. заметное или среднее повреждение), то выполняется анализ на основе таблицы базы данных, аналогичной табл. 3, и уточняется оценка состояния. Эта оценка должна быть применена при разработке мер по плановому ремонту. Если индекс I больше 4 и очевидно (как визуально, так и по показателям КИА) предаварийное состояние плотины (т. е. опасные или очень опасные повреждения или разрушения элементов конструкций), то необходимы оперативные противоаварийные меры. Уточнение оценок состояния плотины может быть выполнено позже при рассмотрении, экспертизе и сопоставлении различных вариантов мероприятий в составе проекта капитального ремонта или реконструкции плотины.

Таким образом, значения индекса риска I , равные 3 и 4, являются критериями безопасности и определяют переход сооружения в потенциально опасное и предаварийное состояние соответственно [7]. Достижение уровня $I = 5$ соответствует аварийному состоянию¹.

1.10. Анализ практики обследования более 180 плотин позволил рекомендовать оптимальные диапазоны исходных экспертных оценок индекса I^p (табл. 4). Границы оценок, соответствующие как «смежным» состояниям плотины, так и уровням повреждений, пересекаются, т. е. не являются четкими. Это обстоятельство характерно для оценок, выполняемых разными членами комиссии в ходе обследования.

1.11. Количественная оценка (оцифровка) исходных порядковых оценок индекса I необходима, как известно, для выполнения математических операций. В данной работе использована методика оцифровки И.Ф. Шахнова², имеющая строгое математическое обоснование [8, 9], и предложенная им формула:

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

Результаты расчета по формуле (1) представлены графиком $I^q = f(I^p)$ в публикации [4]. График имеет две точки перегиба с резким увеличением индекса I^q между ними. Подобные зависимости широко

¹ Процесс перехода ГТС из предаварийного в аварийное состояние наглядно продемонстрировала, например, хорошо известная авария на водосбросе 235-метровой плотины Оровилл в США (7–14 февраля 2017 г.). Важно отметить, что **предпринятые срочные действия** (попеременное подключение основного и аварийного водосбросов, сбрасывание скальных массивов в разрушающуюся зону) **позволили сначала замедлить, а затем предотвратить катастрофическое развитие событий и образование волны прорыва.**

² Методика И.Ф. Шахнова основана на применении троичных порядковых и количественных шкал следующим образом: «1) исходная качественная порядковая шкала ($I = 1, 2, \dots, 6$) делится на тройки (отсюда и термин «троичные») I_{p-1}, I_p и I_{p+1} ; 2) для каждой тройки эксперт оценивает по шкале от 0 до 1 параметр r_k , который может интерпретироваться как «относительное расстояние» или удаленность I_p от I_{p-1} ; 3) по формуле (1) оцениваются (по относительной шкале от 0 до 1) количественные оценки уровней повреждений I^q , которые затем масштабируются в соответствии с выбранной шкалой; 4) если эксперт считает, что оценки нуждаются в уточнении, процедура повторяется с уточненными параметрами r_k ».

Таблица 2. Структура шкалы для предварительной оценки состояния и уровня повреждения плотины при мониторинге и обследовании

Table 2. Scale structure for preliminary assessment of the condition and level of dam damage during monitoring and survey

Возможные состояния плотины	Описательная характеристика повреждений	Сценарий возможной аварии	Уровни повреждения	Детальная классификация ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$)*
1	2	3	4	5
Нормальное	Незначительное	Фильтрация (индекс S); Деструкция (D); Перелив воды через гребень (F)	От 2 до 5	
Потенциально опасное	Заметное		6	6_{ij}
	Среднее		7	7_{ij}
Предаварийное	Опасное		8	8_{ij}
	Очень опасное		9	9_{ij}
	Аварийное		10	

* Примечание. i — тип конструкции; j — детализация повреждения (см. пример в примечании к табл. 3).

Таблица 3. Примеры детальной оценки и классификации состояний и повреждений плотин в шкале и в базе данных (выдержка)

Table 3. Examples of detailed assessment and classification of dam conditions and damages in the scale and in the database (extract)

Повреждение плотины	Возможное состояние плотины	Уровень повреждения	Оценка индекса I^e *	Код повреждения; описание в базе данных повреждения (разрушения) или нарушения требований норм и проекта	Индекс I^e
1	2	3	4	5	6
Незначительное	Нормальное	2—5	1,22	3. Установленная система КИА недостаточна 4. Необходимо разработать (уточнить) и утвердить критерии безопасности	2—2,8 2—2,5
Среднее	Потенциально опасное	7	3,35	D.7.2.1*. Повреждение водосброса: трещины, сколы, раковины (каверны), обнажение арматуры на забральных балках, водосливной грани, бычках и водобое	3,5—4
				F.7.3. Повреждение (низкая надежность) затворов и механического оборудования водосброса	3,8—4,2
Очень опасное	Предаварийное	9	4,43	S.9.1. Выходы воды на низовой откос, иногда с выносом песка	4—5
				D.9.1. Высокий уровень и (или) увеличение интенсивности осадок основания и (или) гребня плотины	3,8—4,8
				D.9.3. Разрушения участков понура и (или) рисбермы, образование проломов	4—4,6

* Примечания. 1. В столбце 4 приведена ориентировочная оценка индекса I^e , полученная осреднением оценок для соответствующего состояния плотины. 2. Пример расшифровки кода повреждения D.7.2.1: D — сценарий нарушения прочности и (или) устойчивости; 7 — уровень повреждения; 2 (i — тип конструкции) — водосброс; 1 (j — детализация повреждения) — трещины, сколы, обнажения арматуры. 3. Значения индекса I^e (столбец 6) являются ориентировочными и взяты из разделов базы данных, относящихся к указанным уровням повреждения (столбец 3).

Таблица 4. Рекомендуемые диапазоны экспертных оценок индекса I^e , назначаемых при обследовании и мониторингеTable 4. Recommended ranges of expert estimates of the I^e index assigned during survey and monitoring

Состояние плотин	Потенциально опасное		Предаварийное	
Уровни повреждения	6	7	8	9
Диапазоны оценок индекса I^e	2,5—3,5	3—4	3,5—4,5	4,5—5

используются для формализации экспертных оценок в психологии, медицине, социологии и др.

1.12. Исходная инструментальная и экспертная информация о состоянии ГТС объединяется для индексов I , соответствующих наиболее опасному из возможных состояний плотины (рис. 1). Для расчета объединенного индекса I применяется формула (2), вывод которой сделан на основании применения некоторых положений теории нечетких множеств и приведен в публикации [10]:

$$I = (I_{\max} + q) - \Pi [(I_{\max} + q) - I_i] / [(I_{\max} + q) - I_{\min}]^{n-1}, \quad (2)$$

(I_{\max} , I_{\min} соответствуют границам анализируемого диапазона значений I ; рекомендуемое значение $q \approx 0,1$).

Формула (2) позволяет оценить влияние всех факторов, влияющих на оценку состояния плотины. Также может быть использована любая доступная (количественная и качественная) дополнительная информация. Учет взаимного влияния факторов повышает достоверность итоговой оценки состояния плотины.

1.13. Возможны два варианта получения исходной оценки состояния эксплуатируемой плотины и риска:

Вариант А: 1) члены комиссии на основе обычной экспертной процедуры определяют сценарий возможной аварии, состояние плотины, а также уровень повреждения и на основе согласования мнений дают предварительную среднюю оценку индекса I^e (столбцы 1—4 табл. 3); 2) группа плотин из базы данных идентифицируется по типу конструкции и особенностям повреждений (столбец 5 табл. 3); 3) повреждения исследуемой плотины сравниваются с описаниями повреждений ГТС в базе данных, и из идентифицированной группы плотин выбирается аналогичная, т. е. сходная по существенным признакам плотина; 4) исследуемой плотине присваивается индекс I^e плотины-аналога, а в случае нескольких аналогов применяется метод попарного сравнения. Если комиссии не удастся выбрать подходящий аналог, то применяется вариант Б: 1) каждый член комиссии сравнивает состояние плотины со шкалой повреждений и оценивает индекс риска I^e ; 2) на основе согласования мнений членов комиссии производится осреднение индивидуальных экспертных оценок.

Основные выводы по разделу 1

1.14. Представленные в разделе 1 методология и методика предназначены для детерминированной оценки состояния плотины на основе индекса риска I . Использована и модифицирована разработанная ранее база данных обследований более 180 гидротехнических сооружений (плотин). Применены описательная и порядковая (балльная) шкалы повреждений, разработанные также на основе индекса риска I .

1.15. Переход конструкции в потенциально опасное состояние (индекс риска $I > 3$) требует, как правило, плановых ремонтных работ. Переход в предаварийное состояние (индекс риска $I > 4$) влечет за собой реализацию плана действий в чрезвычайных ситуациях. В частности, накладываются ограничения на режим работы гидротехнического сооружения, вплоть до снижения существующих нагрузок и эвакуации населения из зоны возможного затопления.

1.16. В настоящее время разработан ряд методов оценки риска на основе применения индексов риска [11], в том числе применительно к эксплуатируемым плотинам [12—16]. Одной из задач дальнейших исследований является сопоставление эффективности и сфер применения различных методов на тестовых примерах.

1.17. Дальнейший более детальный анализ, оценка состояния и риска выполняются, если среднее значение индекса риска I превышает уровень $I_{\text{ср}} > 3$, что означает нарушение нормального состояния ГТС. Превышение уровня $I_{\text{ср}} > 3$ делает целесообразным (а в ряде случаев и необходимым) применение вероятностного подхода к оценке рисков, рассмотренного в разделе 3.

2. Методика оценки состояния и риска эксплуатируемых плотин в вероятностной постановке

В настоящее время методы вероятностной оценки риска плотин разработаны и применяются как в отечественной [3, 17—21], так и в зарубежной практике [22—27]. Нормы [2] предлагают широкий спектр качественных, количественных и смешанных методов оценки вероятности аварий и риска: байесовский анализ, анализ дерева событий ЕТА, анализ дерева ошибок FTA, моделирование методом Монте-Карло

и др. В российском нормативном документе [19] основное внимание уделяется использованию двух хорошо известных методов: ЕТА и ФТА. Начальные вероятности, необходимые для расчетов указанными методами, назначают на основе литературных данных; данных проекта, а также экспертных оценок, формализованных в той или иной степени. При этом часто не проводится различие между подходами, применяемыми на этапе проектирования или эксплуатации. Однако при оценке риска необходим учет практически неизбежных отклонений состояния эксплуатируемых конструкций от требований норм и проекта. В предложенной методологии вероятность отказа оценивается в зависимости от индекса состояния I , который определяется именно для обследуемых плотин.

2.1. Разработанная и реализованная в данном исследовании методология ставит своей целью создание инженерной методики оперативной оценки риска аварии (в форме вероятности аварии $p_{failure}$) эксплуатируемых плотин. Применяются как количественные, так и качественные исходные оценки состояния плотин. Используются база данных, а также полученные детерминированные оценки индекса риска I^q обследованных сооружений, представленные в разделе 2.

2.2. Методология включает следующие элементы: статистический анализ исходной количественной и качественной информации, представленной в виде индекса I^q и объединенной в выборки для каждого из введенных ранее возможных уровней

повреждения (рис. 1); анализ функций распределения вероятностей индекса I^q и определение вероятностей достижения аварийного состояния ($p_{failure} = p(I = 5)$) по каждой из указанных выборок; построение графика $p_{failure} = p(I_{cp})$, где I_{cp} — среднее значение по выборке данных для каждого уровня повреждения.

2.3. Статистический анализ исходной информации включал этапы: формирование выборки исходных оценок индекса I^q для уровней повреждения 6, 7, 8 и 9; квантификацию оценок индекса I^q ; расчет выборочных характеристик распределения индекса I^q для указанных уровней повреждения (табл. 5).

2.4. Анализ функций распределения индекса I^q для уровней повреждения 6, 7, 8 и 9 включал: определение ординат эмпирической (частотной) функции распределения $f(I^q)$; вычисление ординат функции распределения вероятностей $P(I^q)$ с использованием выборочных оценок среднего и стандартного отклонения для индекса I^q (столбцы 5 и 6 табл. 5); проверку нормальности функции распределения частот I^q (табл. 6); определение вероятности наступления предельного состояния плотины $p_{failure}(I^q \geq 5)$ для каждого уровня повреждения (столбец 7 табл. 5); графическое представление и сопоставление эмпирических (f) и расчетных (p) функций распределения I^q (рис. 2). Ступенчатый (пошаговый) характер графиков эмпирических функций распределения (см. рис. 2) связан с тем, что некоторые исходные экспертные (балльные) оценки степени повреждения, выполненные

Таблица 5. Выборочные характеристики распределений

Table 5. Sample characteristics of distributions

Уровни повреждения	Размер выборки	Диапазон значений индекса I		Среднее значение индекса I_{cp}	Стандартное отклонение	Вероятность аварии* $p_{failure}$
		I_{min}	I_{max}			
1	2	3	4	5	6	7
6	52	2,04	3,93	2,98	0,465	6,98E-06
7	137	2,62	4,39	3,515	0,433	0,000305
8	37	3,39	4,88	4,308	0,369	0,030486
9	15	3,6	5	4,523	0,376	0,101138

* Примечание. В столбце 7 представлены рассчитанные (в предположении о нормальности функции распределения) вероятности того, что индекс I^q превысит 5 (то есть границу между предаварийным и аварийным уровнями безопасности плотин).

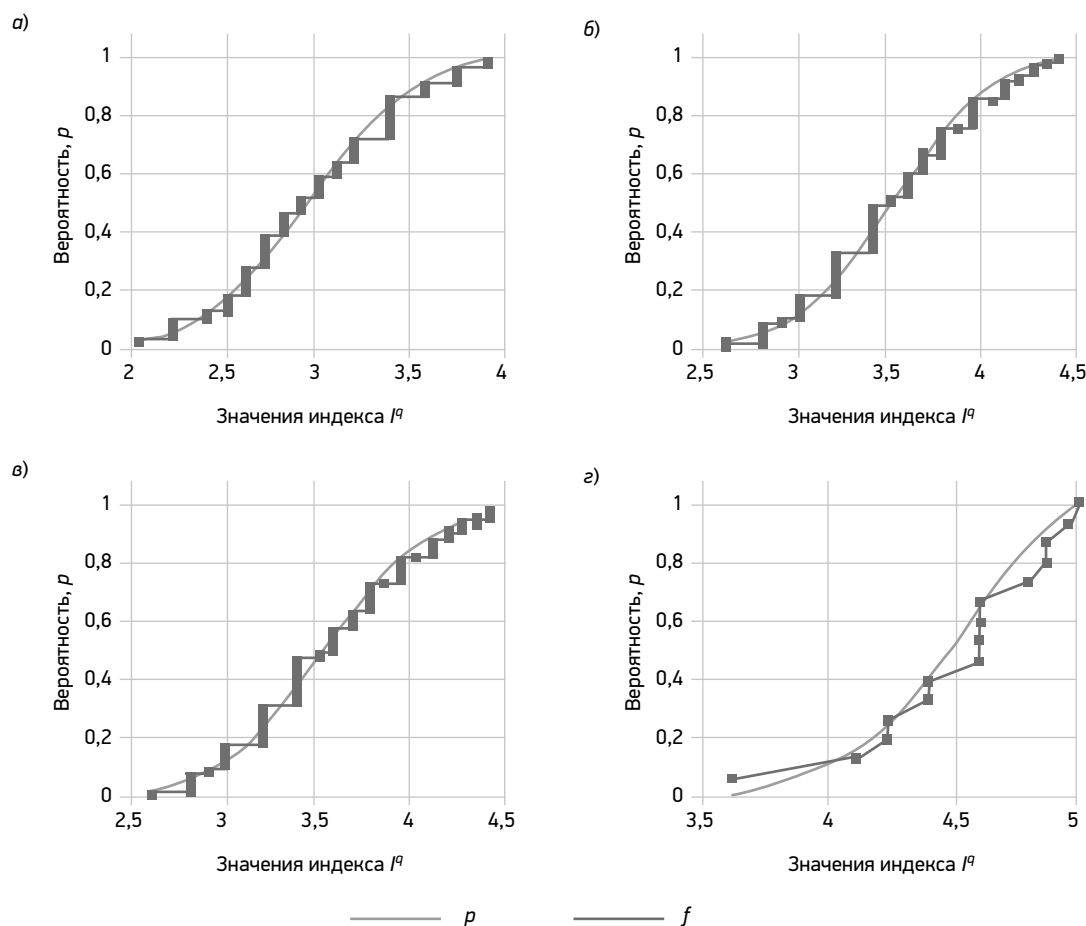


Рис. 2. Эмпирические (f) и расчетные (p) функции распределения I^q для уровней повреждения 6 (а), 7 (б), 8 (в) и 9 (г)

Figure 2. Empirical (f) and calculated (p) distribution functions I^q for damage levels 6 (a), 7 (b), 8 (c) and 9 (d)

для различных сооружений и сценариев возможной аварии (но для одинаковых уровней повреждения), оказывались близкими или совпадающими.

Проверка нормальности распределения произведена на основе сравнения эмпирических и рассчитанных функций распределения вероятностей $P(I^q)$ и $f(I^q)$ для уровней повреждения 6, 7, 8 и 9. Как известно, нормальность — естественное свойство вероятностных распределений экспертных оценок. Визуальная оценка графиков (рис. 2) не противоречит этому утверждению. Для уровней повреждения 6 (рис. 2 а), 7 (рис. 2 б), 8 (рис. 2 в) и 9 (рис. 2 г) пошаговые графики эмпирической функции повторяют характерный вид рассчитанной функции. Ординаты функций также близки.

Стандартные проверки нормальности выборочных распределений выполнены на основе применения критерия согласия Пирсона (см. табл. 6). Проверка нормальности распределения для малой выборки (см. табл. 6, девятый уровень повреждения, $n = 15$) выполнена по критерию Шапиро — Уилка [28, 29].

2.5. Создание диаграммы “ $p_{failure} - I_{cp}$ ” на основе результатов обследования ГТС. Рассмотренные процедуры: статистической обработки, доказательства нормальности распределения индексов I и оценки (по построенным для каждого уровня повреждения функциям распределения) вероятности аварии $p_{failure}$ позволили определить зависимость вероятности аварии от среднего (для каждого уровня повреждения) значения индекса I_{cp} . Итоговый график “ $p_{failure} - I_{cp}$ ”

Таблица 6. Результаты проверки нормальности выборочных распределений

Table 6. Results of testing the normality of sample distributions

Уровень повреждения	Размер выборки, n	χ -квадрат Пирсона тест		Шапиро — Уилка тест	
		χ^2	χ^2_{crit}	W	W_{crit}
1	2	3	4	5	6
6	52	3,94	11,07		
7	137	12,45	15,51		
8	37	3,11	11,07		
9	15			0,89	0,829
Критерии согласия		$\chi^2 < \chi^2_{crit}$		$W > W_{crit}$	

Примечания. 1. Критерий согласия Шапиро — Уилка применим при $8 \leq n \leq 50$. 2. В отличие от критерия согласия Пирсона (столбцы 3 и 4), критерий Шапиро — Уилка (столбцы 5 и 6) считается выполненным, когда критическое значение критерия W_{crit} превышено.

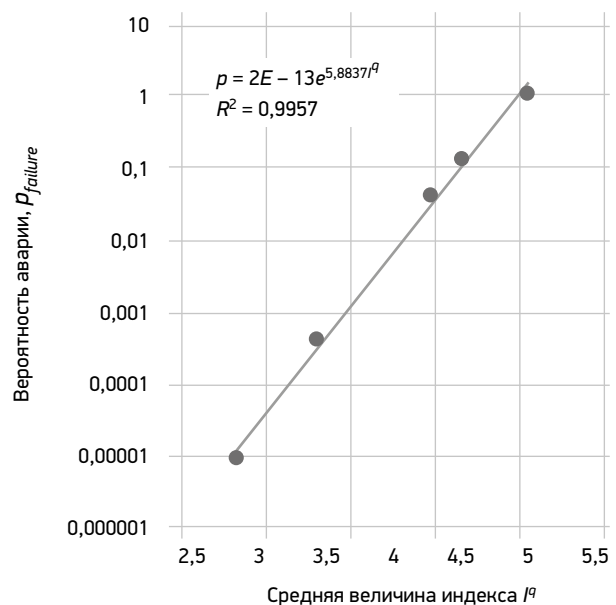
представлен на рис. 3. Координаты точек на графике соответствуют колонкам 5 (I_{cp}) и 7 (p) табл. 5.

2.6. Диаграмма “ $p_{failure} = p(I_{cp})$ ” позволяет оперативно оценить вероятность аварии конкретного ГТС, основываясь на средней величине индекса состояния I_{cp} , полученной в процессе обследования или мониторинга. График хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией. Известно, что эта функция часто используется для анализа вероятностей редких событий, в том числе различных отказов и аварий. Диаграмма “ $p_{failure} = p(I_{cp})$ ” может быть применена для быстрой оценки вероятности аварии ГТС по результатам обследования и служит основой предлагаемой инженерной методики оценки риска на основе вероятностного подхода.

2.7. Представленная в пп. 3.2—3.6 методология позволила предложить следующую методику оперативной оценки вероятности аварии ГТС.

2.7.1. Исходными данными служат количественные и качественные оценки состояния ГТС, полученные в ходе мониторинга и обследования. При подготовке исходных данных могут быть привлечены и другие источники: декларации безопасности и результаты их экспертизы, научно-технические отчеты и публикации, заключения экспертов и т. д.

2.7.2. Исходные данные сопоставляются со шкалой и представляются в виде индекса I^e применительно к процессам (сценариям) S , D и F . Рекомендуемые диапазоны исходных оценок для индекса I^e представлены в табл. 4.

Рис 3. Диаграмма “ $p_{failure} = p(I_{cp})$ ”Figure 3. “ $p_{failure} = p(I_{cp})$ ” diagram

2.7.3. Выполняется (по согласованию с экспертами — членами комиссии) оценка состояния ГТС и соответствующее предварительное значение I^e . Если $I^e > 3$, процедура оценки вероятности аварии $p_{failure}$ для установленного уровня повреждения продолжается. Выполняется квантификация (оцифровка) исходных балльных оценок I^e . Полученные цифровые оценки I^q для процессов S , D и F

(как количественные инструментальные, так и качественные экспертные) объединяются в единую выборку, и определяется среднее значение индекса $I_{\text{ср}}$.

2.7.4. По графику " $p_{\text{failure}} = p(I_{\text{ср}})$ " или по формуле, приведенной на графике (см. рис. 3), выполняется оценка вероятности аварии эксплуатируемой плотины.

3. Критерии безопасности длительно эксплуатируемых плотин. Определение допустимого уровня риска

3.1. Представленные в разделах 1 и 2 результаты позволяют сформулировать критерии безопасности в двух вариантах: детерминированном и вероятностном (табл. 7). Используются два уровня критериев безопасности ($K1$ и $K2$), которые соответствуют достижению потенциально опасного и предаварийного состояния плотины [7]. Значения $K1$ и $K2$ на стадии разработки проекта определяются расчетом при нормальной и особой комбинациях нагрузок. Оценка $K1$ и $K2$, на стадии эксплуатации плотин основывается на инструментальных и визуальных наблюдениях. Значения $K1$ и $K2$, определены для индекса состояния I и включены в описательную шкалу базы данных.

Таблица 7. Критериальные оценки состояния эксплуатируемых плотин

Table 7. Criteria assessments of the condition for operated dams

Состояние эксплуатируемых сооружений	Детерминированные критерии (индекс риска I)	Вероятностные критерии (вероятность аварии p_{failure})
1	2	3
Нормальное	$I \leq 3$ ($K1$)	$p_{\text{failure}} \leq 0,00001$
Потенциально опасное	$3 < I \leq 4$ ($K2$)	$0,00001 < p_{\text{failure}} \leq 0,03$
Предаварийное	$I > 4$	$p_{\text{failure}} > 0,03$

Примечания. 1) I — объединенная инструментальная и (или) средняя экспертная (для стадии обследования) оценка состояния эксплуатируемого сооружения; 2) оценки вероятности аварии, приведенные в колонке 3, выполнены в соответствии с $p_{\text{failure}}(I_{\text{ср}})$ графиком (см. рис. 3).

3.2. Представленные в табл. 7 критерии безопасности (как детерминированные, так и вероятностные) не учитывают последствия возможной аварии (т. е. ответственность конструкции). Однако учет последствий (G) необходим, в особенности на заключительном этапе исследования, при формулировании выводов и разработке предложений по управлению рисками [30].

3.3. Если индекс $I^e > 3$, необходимо анализировать не только состояние плотины, но и последствия возможной аварии (G), т. е. выполнить анализ приемлемости риска [4, 31]. В соответствии с работой [1] приемлемый уровень риска определен как «...риск, который считается допустимым при существующих общественных ценностях».

3.4. В рамках детерминированного подхода, рассмотренного в разделе 1, оценки приемлемого уровня риска проводятся на основе диаграммы " $I-G$ " (рис. 4). При создании диаграммы были использованы результаты обследования 14 плотин. (Оценки ущерба от возможного гидродинамического разрушения плотин в основном были выполнены С.Я. Школьниковым.)

3.5. Применительно к вероятностному подходу приемлемый риск оценивается на основе зависимости «вероятность аварии p_{failure} — последствия аварии G ». Диаграмма " $p-G$ " аналогична по смыслу

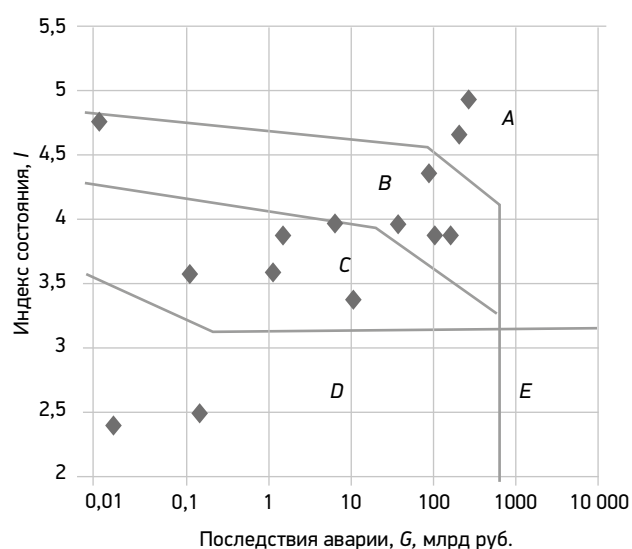


Рис. 4. Приемлемый риск. Диаграмма " $I-G$ "

Figure 4. Acceptable risk. " $I-G$ " diagram

диаграмме “ $I-G$ ” и разработана ранее [4, рис. 2] с использованием таких же исходных оценок последствий аварии G для 14 плотин. Высокие оценки уровня повреждений ($I \geq 4$) получены не только по результатам последнего обследования и мониторинга состояния ГТС, а с учетом ранее выявленных и устраненных в процессе эксплуатации повреждений. Оценка экономических последствий аварий представлена в ценах 2015 г.

3.6. На диаграмме “ $I-G$ ”, как и на указанной диаграмме “ $p-G$ ”, экспертным путем выделены зоны риска: неприемлемого (A), повышенного (B), условно приемлемого (C), приемлемого (D), приемлемого для уникальных сооружений (E). Границы зоны неприемлемого риска были проведены через опасную зону, в которой представлены данные по I и G для наиболее поврежденных конструкций.

3.7. Критерии уровней повреждения K_1 и K_2 , примененные при детерминированной оценке риска (см. табл. 7), определяют границы нормальных и предаварийных состояний ГТС. При этом критерии K_1 и K_2 можно отнести к внешним границам зон допустимого риска и условно допустимого риска на диаграмме “ $p-G$ ”. Это обстоятельство подчеркивает взаимосвязь детерминированного и вероятностного подходов к оценке допустимого риска, которые рассмотрены в данном разделе.

3.8. Для оценки приемлемости риска плотин в зарубежной практике [24–27] широко применяются матрицы рисков и диаграммы “ $F-N$ ”. Указанные методы по своим исходным положениям наиболее близки к предлагаемому комплексному критерию безопасности в форме диаграммы “ $p-G$ ”. Матрица рисков обычно используется для качественной оценки. В отечественных публикациях в матрице риска конкретизированы количественные оценки в соотношении “ $p-G$ ” [31]. На диаграмме “ $F-N$ ” при оценке последствий аварий рассматривается только количество возможных жертв аварии, что ограничивает сферу ее применения. Диаграммы “ $I-G$ ” и “ $p-G$ ” 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 [1].

4. О перспективе дальнейших исследований

4.1. Для длительно эксплуатируемых отечественных плотин весьма актуальна прогнозная оценка срока их эксплуатации. Наличие целого ряда методов диагностики плотин [15–27, 35–37] создает реальную основу для решения данной задачи. Традиционно и в зарубежной, и в отечественной практике [30, 31] для целей прогноза используются статистические методы обработки данных наблюдений за диагностическими показателями состояния плотин. Прогнозная оценка срока безопасной эксплуатации сооружений устанавливается на основе сопоставления данных наблюдений с критериями безопасности K_1 и K_2 [7]. Наряду со статистическими методами в работах [35–37] представлена методика и выполнены детальные расчеты напряженно-деформированного состояния, в которых, с целью идентификации расчетных параметров, использованы результаты натурных наблюдений. В указанных работах также даны прогнозные оценки реакции сооружений на ранее не испытанные экстремальные нагрузки.

В ходе дальнейших исследований, базирующихся на подходах и результатах, представленных в данной работе, нами предполагается конкретизация (уточнение) вида и параметров зависимости индекса риска I от срока эксплуатации. Указанная оценка должна быть выполнена применительно к рассмотренным возможным состояниям ГТС (см. рис. 1) и включать оценку прогнозного срока наступления потенциально опасного состояния $t_{по}(I=3)$, а также срока наступления предаварийного состояния $t_{па}(I=4)$.

В работах [34, 35], применительно к водопроводящим сооружениям оросительных систем, разработана методика их диагностики, а также комплексной оценки остаточного ресурса. Выполнены обширные натурные обследования повреждений, а также расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций, разработаны и применены оригинальные технические комплексы. Представлены эмпирические зависимости срока эксплуатации от степени повреждения, послужившие основой предложенной методики мониторинга. Для прогноза срока эксплуатации низконапорных плотин в работах [36, 37] применены цепи Маркова. Как в работах [36, 37], так и в [34, 35] в процессе обследования

сооружений широко используются визуальные оценки и оперативные неразрушающие методики фиксации повреждений. Указанный подход вполне обоснован применительно к нескольким тысячам обследованных (порой весьма старых и сильно поврежденных) сооружений.

4.2. Страхование гражданской ответственности владельца ГТС (т.е. передача страховой компании ответственности за риск) является, как известно, одной из эффективных мер по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС. Представленная в данной статье методика позволяет оценить уровень повреждения конкретной обследуемой плотины в форме индекса риска I . Может быть предложено некоторое уточнение формулы для назначения базовой ставки страховых тарифов гражданской ответственности в виде:

$$T(t) = p(t) * [c_1(t) + c_2(t)] + L, \quad (3)$$

где $T(t)$ — страховой тариф, меняющийся во времени t по мере старения (накопления повреждений) сооружения; $p(t)$ — вероятность гидродинамической аварии, зависящая от уровня безопасности плотины I (см. рис. 3) и возрастающая во времени t ; $c_1(t)$ — ущерб третьим лицам; $c_2(t)$ — затраты на превентивные мероприятия, необходимые для обеспечения безопасности ГТС и снижения $p(t)$ до допустимого уровня; L — эксплуатационные затраты страховщика.

Важность осуществления превентивных мероприятий совершенно очевидна, особенно для старых плотин, преобладающих как у нас в стране, так и во всем мире. По-видимому, возможны различные организационные схемы финансирования превентивных мероприятий. В частности, возможен вариант накопления необходимых финансовых средств при обязательном страховании гражданской ответственности (затраты $c_2(t)$ в формуле 3). Этот вариант финансирования может быть реализован так же, как это сделано в случае обязательного медицинского страхования [42]. Кроме того, возможна схема, представленная в директиве 2004/35/СЕ «Об экологической ответственности в отношении предотвращения и устранения экологического ущерба» [43]. Директива возлагает ответственность за охрану окружающей среды на компетентные органы государств — членов ЕС. Если компетентный орган осуществляет на опасном объекте превентивные и вос-

становительные меры, он возмещает свои расходы с оператора объекта. Практическая реализация Директивы с 2004 г. показала, что страхование оказалось самым популярным инструментом покрытия экологической ответственности [43].

Перспективен, по-видимому, и более радикальный вариант, подобный федеральной программе страхования NFIP [6], действующей в США с 1968 г. [44]. Программа NFIP обеспечивает возмещение убытков от повреждений имущества, вызванных наводнениями любого типа, в том числе и от волны прорыва при авариях на гидротехнических сооружениях. Соглашение между локальными поселениями (общинами) и правительством США предусматривает, что если собственник выполнит меры, направленные на уменьшение будущих потерь от наводнения, то правительство США сделает страхование от наводнения более доступным. Таким образом, в рамках обязательного (или добровольно-принудительного) страхования не только обеспечивается возмещение ущерба от возможной аварии плотины, но и стимулируется финансирование превентивных мер. В случае применения процедуры определения тарифа согласно формуле (3) такое стимулирование обеспечивается автоматически, т.к. превентивные мероприятия снижают вероятность аварии.

Осуществление сформулированных предложений по организации превентивных мер на эксплуатируемых ГТС потребует некоторой корректировки действующих нормативно-правовых документов [45—47].

5. Применение результатов в практике оценки и обеспечения безопасности эксплуатируемых плотин

Представленные методики детерминированной и вероятностной оценки риска эксплуатируемых ГТС могут быть применены в ходе следующих видов работ: 1. Комиссионное обследование и мониторинг состояния эксплуатируемых плотин. 2. Экспертиза вариантов проекта и экономическое обоснование эффективности капитального ремонта или реконструкции старого сооружения. Для конструкций в потенциально опасном и предаварийном состояниях (то есть при $I^e > 3$) оценка риска выполняется на основе диаграмм “ $I-G$ ” и “ $p-G$ ”. Должны быть рассмотрены предварительные варианты реконструкции или ремонта. Диаграммы “ $I-G$ ” и “ $p-G$ ”

используются для обоснования наилучшего варианта на основе различных комбинаций индекса I (или вероятности аварии $P_{failure}$) и ущерба G , связанного с возможной аварией.

Заключение

1. Представлен анализ и обобщение опыта обследований и оценки уровня безопасности (в форме индекс риска I) 180 гидротехнических сооружений (ГТС) России. Модифицирована база данных, а также описательная и порядковая шкала повреждений. Показана практическая целесообразность и возможность категоризации (с нечеткими границами) состояний и уровней повреждения ГТС.

2. Разработана методика детерминированной оценки состояния и риска эксплуатируемых гидротехнических сооружений. Методика использует индексы риска (индекс состояния плотины I), а также методы нечеткой логики для объединения исходной количественной и качественной информации о состоянии эксплуатируемой плотины. Применяемый подход соответствует рекомендациям «ИЕС 31010:2019. Управление рисками. Методы оценки рисков. NEQ». Детерминированные оценки состояния и риска в форме индексов риска использованы также в качестве исходных данных при разработке вероятностной методики оценки риска.

3. Разработана методология вероятностной оценки состояния и риска эксплуатируемых плотин на основе результатов их обследования. Для четырех уровней повреждения, связанных с потенциально опасным и предаварийным состояниями, выполнен анализ эмпирических функций распределения оцифрованных (квантифицированных) оценок индекса риска I . Доказана возможность применения нормального распределения вероятностей индекса I и определены вероятности аварии ($P_{failure}$) плотин при указанных уровнях повреждения. Предложенный в работе график " $P_{failure} - I_{cp}$ " определяет зависимость вероятности аварии от среднего (для каждого категоризованного уровня повреждения) значения индекса I_{cp} . Установлена экспоненциальная зависимость вероятности аварии от индекса риска I_{cp} . Предложена методика оперативной оценки вероятности аварии плотин по результатам их обследования, которая основана на применении указанного графика.

4. Представлены детерминированные и вероятностные критерии безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений. Построены и предложены для практического применения графики зависимости индекса риска I , а также вероятности аварии $P_{failure}$ от ущерба G , связанного с возможной аварией ГТС (диаграммы " $I-G$ " и " $P_{failure}-G$ "). Указана аналогия диаграммы " $P_{failure}-G$ " с известной диаграммой " $F-N$ ", совместное применение которых определяет более общие критерии безопасности (критерии допустимого риска), учитывающие также и возможные жертвы от аварии.

5. Возможность учета повреждений конкретной обследуемой плотины является важной особенностью разработанной инженерной методики оценки риска эксплуатируемых плотин. Методика позволяет выполнить оперативную оценку и регулирование риска плотин в процессе мониторинга и обследования, а также при декларировании безопасности, разработке и экспертизе проектов реконструкции и ремонта сооружений. Предложенная инженерная методика может применяться наряду с традиционными методами оценки риска, такими как анализ дерева событий (ETA), анализ дерева отказов (FTA) и другими количественными и качественными методами оценки риска, рекомендуемыми указанным нормативным документом ИЕС 31010:2019.

6. Для длительно эксплуатируемых водоподпорных ГТС актуальными являются следующие направления дальнейших исследований: **прогнозная оценка срока безопасной эксплуатации** на основе зависимости индекса риска I (и соответствующей вероятности аварии $P_{failure}$) от срока эксплуатации плотины t и конкретизация сроков $t_{по}$ и $t_{па}$ (где $t_{по}$ соответствует прогнозируемому времени наступления потенциально опасного состояния, а $t_{па}$ — времени наступления предаварийного состояния); **уточнение формулы для назначения базового тарифа страхования гражданской ответственности** с учетом зависимости вероятности аварии $P_{failure}$ от периода эксплуатации конкретного ГТС; **конкретизация предложений по финансированию предупредительных мероприятий в сфере безопасности ГТС** (в том числе по использованию страховых сумм), а также соответствующих предложений по нормативно-правовому регулированию.

Литература [References]

1. Быков А.А., Порфирьев Б. Н. О взаимосвязи риска с родственными понятиями и терминологией риск-менеджмента // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. № 4. С. 4—10. [Bykov A.A., Porfiriyev B.N. On the relationship of risk with related concepts and terminology of risk management // Issues of Risk Analysis. 2013;10(4):4-10 (In Russ.)]
2. ГОСТ Р 58771-2019. «Менеджмент риска. Технологии оценки риска», разработанный с учетом основных нормативных положений международного стандарта IEC 31010:2019 “Risk management–Risk assessment techniques” [GOST R 58771-2019, Risk management. Risk Assessment Technologies, “developed taking into account the main regulatory provisions of the international standard. IEC 31010:2019 “Risk management — Risk assessment techniques”]
3. 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. [Ivashchenko I.N., Radkevich D. B., Ivashchenko K.I. Probabilistic assessment of the risk of dam accidents based on the results of their monitoring and surveys // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. 2012;7:22-28 (In Russ.)]
4. Иващенко И.Н., Иващенко К.И., Гончаров Е.А., Комельков Л.В. Допустимый риск для эксплуатируемых сооружений: методология оценки // Проблемы анализа риска. 2017. Т. 14. № 4. С. 36—49. [Ivashchenko I.N., Ivashchenko K.I., Goncharov E.A., Komelkov L.V. Permissible risk of operated facilities: assessment methodology // Issues of Risk Analysis. 2017;14(4):36-49 (In Russ.)]
5. Башкин В.Н. Возможность управления рисками ЧС и катастроф // Проблемы анализа риска. Т. 18. 2021. № 3. С. 8—9, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-3-8-9> [Bashkin V.N. The ability to manage the risks of emergencies and disasters // Issues of Risk Analysis. 2021;18(3):8-9 (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-3-8-9>]
6. World Bank. 2021. Portfolio Risk Assessment Using Risk Index. Good Practice Note on Dam Safety; Technical Note 6. World Bank, Washington, DC. © World Bank, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35490> License: CC BY 3.0 IGO
7. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, РД 153-34.2-21.342-00, РАО «ЕЭС России», 2001. [Procedure for determination of safety criteria of hydraulic structures, RD 153-34.2-21.342-00, RAO “UES of Russia”, 2001]
8. Шахнов И.Ф. Квантификация предпочтений, выраженных в вербальной форме // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 1. С. 77—79. [Shakhnov I.F. Quantification of the preferences expressed in verbal form // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. 2013;79(1):77-79 (In Russ.)]
9. Шахнов И.Ф. Применение метода тернарных сравнений в задачах квантификации // Автомат. и телемех. 2005. № 7. С. 154—163 [Shakhnov I.F. The Ternary Comparison Method: Application to Quantification. Autom Remote Control 66, 1162—1170 (2005), <https://doi.org/10.1007/s10513-005-0156-4>]
10. 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.
11. Project Risk Assessment Process. 2007 MoreSteam.com, LLC. URL: <https://www.moresteam.com/university/downloads/RiskAssessmentFlow.pdf>
12. Chen Y., Lin P. The Total Risk Analysis of Large Dams under Flood Hazards. Water. 2018;10(2):140, <https://doi.org/10.3390/w10020140>
13. Tosun H. and Seyrek E. Total risk analyses for large dams in Kizilirmak basin, Turkey, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 979—987, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-979-2010>, 2010.
14. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности, 2-е издание. М.: ДАП/ВОДГЕО, 2009, 64 с. [Methodological recommendations for assessing the risk of accidents at hydraulic structures of the water industry and industry, 2nd edition. M.: GIFT/VODGEO. 2009. 64 p.]
15. Modern technique for dam safety surveillance and evaluation / P. Bonaldi, G. Carrodory, M. Fanelli etc. Int. Water Power and Dam Construction, 1989. Vol. 41. № 4. P. 117—131.
16. Иващенко И.Н. Инженерная оценка надежности грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат, 1993. 141 с. ISBN 5-283-02048-7 [Ivashchenko I.N. Engineering assessment of the reliability of ground dams. M.: Energoatomizdat. 1993. 141 pp. ISBN 5-283-02048-7 (In Russ.)]
17. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003. Т. 1. 556 с. [Bellendir Ye.N., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shulman S.V. Probabilistic methods of assessments of reliability of soil hydro-engineering

- structures. SPb: B.E. Vedeneev VNIIG publishing house. 2003. Vol. 1. 556 pp. (In Russ.)]
18. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Т. 2. 2004. 524 с. [Bellendir Ye.N., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shulman S.V. Probabilistic methods of assessments of reliability of ground hydro-engineering structures. SPb: B.E. Vedeneev VNIIG publishing house. 2004. Vol. 2. 524 pp. (In Russ.)]
19. СТО 70238424.27.140.026-2009. Гидроэлектростанции. Оценка и прогнозирование рисков возникновения аварий гидротехнических сооружений. Нормы и требования. Москва. 2009. [STO 70238424.27.140.026-2009. Hydroelectric power stations. Assessment and forecasting of risks of accidents of hydraulic structures. Norms and requirements. Moscow. 2009]
20. Кауфман Б.Д., Иванова Т.В., Шульман С.Г. Развитие методов оценки надежности гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 278. С. 15—22. [Kaufman B.D., Ivanova T.V., Shulman S.G. Development of methods for reliability assessment of hydroengineering structures // VNIIG B.E. Vedeneev. 2015;278:15-22 (In Russ.)]
21. 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> [Lyapichev Yu.P. Methods of analysis and risk assessment of accidents of hydraulic structures. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2019;15(4):327-336 (In Russ.), <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-327-336>
22. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley // New York. IEEE Press. 1996. 597 p. <https://doi.org/10.1109/9780470546277>
23. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 1. Q. 76. 19—22 September. Beijing-China. 2000. 896 p.
24. International Commission on Large Dams. Australian National Committee. Guidelines on risk assessment / Australian National Committee on Large Dams Inc ANCOLD Australia 2003. URL: <https://www.ancold.org.au>.
25. Guide to risk assessment for reservoir safety management. Vol. 2: Methodology and supporting information. Repor — SC090001/R2. Published by: Environment Agency, Horison House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, March 2013. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6034c964d3bf7f265824d056/_SC090001_methodology.pdf
26. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. April 2004. URL: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_P-93.pdf
27. Regional Guidelines on Flood Risk Management. April 2016. Pprd-east-2-regional-guidelines-on-flood-risk-management.pdf
28. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. Госстандарт России. Москва. 2020. [GOST R ISO 5479-2002. Statistical methods. Check of deviation of probability distribution from normal distribution. Gosstandart of Russia. Moscow. 2020]
29. ISO 5479-97:1997. Statistical methods. Tests for departure of the probability distribution from the normal distribution.
30. Предельно допустимые уровни риска (пояснительная записка) // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 3. № 2. С. 163—168. [Maximum Permissible Risk Levels (Explanatory Application to the Declaration) // Issues of Risk Analysis. 2006;3(2):163-168 (In Russ.)]
31. 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. 2007. Т. 4. № 4. С. 368—404. [Akimov V.A., Bykov A.A., Vostokov V.Yu., Dolgin N.N., Kondratiev-Firsov V.M., Makiev Yu.D., Malyshev V.P. Emergency Risk Assessment Methods and Risk Standards for Emergency Situations (Manual for the Assessment of Risks of Technological Emergencies Including Those Associated with the Operation of Critical Infrastructures in the Russian Federation) // Issues of Risk Analysis. 2007;4(4):368-404 (In Russ.)]
32. Малаханов В.В. Техническая диагностика грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат. 1990. 121 с. ISBN 5-283-01975-6 [Malakhanov V.V. Technical diagnostics of ground dams. M.: Energoatomizdat. 1990. 121p. ISBN 5-283-01975-6 (In Russ.)]

33. Малаханов В.В., Толстиков В.В., Кузнецов Д.В. Информационно-диагностическая программа «Шершнеvский гидроузел» // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 97—111. [Malakhanov V.V., Tolstikov V.V., Kuznetsov D.V. Information and diagnostic program “Shershnevsky hydroelectric complex” // Vestnik MGSU. 2006;2:97-111 (In Russ.)]
34. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Правдивец Ю.П. [и др.] Гидротехнические сооружения: Учеб. для вузов / Под ред. Рассказова Л.Н. Ч. 2. М.: Стройиздат, 1996. 344 с. [Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Pravdivets Yu.P. [et al.] Hydraulic structures / Training for universities / Edited by Rasskazov L.N./Part 2. M.: Stroyizdat. 1996. 344 p. (In Russ.)]
35. Ивашинцов Д.А., Соколов А.С., Шульман С.Г., Юдеlevич А.М. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2001. 432 с. ISBN 5-85529-082-4 [Ivashintsov D.A., Sokolov A.S., Shulman S.G., Yudelevich A.M. Parametric identification of hydraulic structural design models // SPb: B.E. Vedeneev VNIIG publishing house. 2001. 432 p. ISBN 5-85529-082-4 (In Russ.)]
36. Загрядский И.И. Анализ поведения бетонных плотин (по данным наблюдений). СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014. [Zagryadsky I.I. Analysis of the behavior of concrete dams (according to observations). SPb: B.E. Vedeneev VNIIG publishing house. 2014 (In Russ.)]
37. Вульфoвич Н.А., Гордон Л.А., Стефаненко Н.И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений). СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. ISBN 978-5-85529-156-8 [Vulfovich N.A., Gordon L.A., Stefanenko N.I. Arch-gravity dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station (Technical state assessment according to field observations). SPb: B.E. Vedeneev VNIIG publishing house. 2012. ISBN 978-5-85529-156-8 (In Russ.)]
38. Волосухин В.А., Бандурин М.А. Программно-технический комплекс для проведения мониторинга и определения остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1. С. 57—68. [Volosukhin V.A., Bandurin M.A. Software-technical complex for monitoring and determination of residual water or resource facilities operated long // Vestnik PNIPU. Construction and Architecture. 2013;1:57-68 (In Russ.)]
39. Бандурин М.А. Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем: Монография. 2-е изд., перераб. и доп. Новочеркасск: Лик, 2021. 217 с. ISBN 978-5-906932-03-8. [Bandurin M.A. Diagnostics of technical condition and assessment of residual service life of water supply facilities of irrigation systems: Monograph. 2nd ed., redesign and additional. Novocherkassk: Lick. 2021. 217 p. ISBN 978-5-906932-03-8 (In Russ.)]
40. Снежко В.Л., Симонович О.С., Сидорова С.А. Прогноз уровня безопасности низконапорных грунтовых плотин // Природообустройство. 2019. № 2. С. 72—80, <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-2-72-80> [Snezhko V.L., Simonovich O.S., Sidorova S.A. The forecast of safety level of ground low head dams // Environmental engineering. 2019;2:72-80 (In Russ.), <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-2-72-80>]
41. Волков В.И., Снежко В.Л., Козлов Д.В. Прогноз уровня безопасности низконапорных и бесхозяйных гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2018. № 11. С. 35—41. [Volkov V.I., Snezhko V.L., Kozlov D.V. The forecast level of security low-pressure and ownerless hydraulic structures // Gidrotehnicheskoe Stroitelstvo. 2018;11:35-41 (In Russ.)]
42. Административный регламент предоставления фондом социального страхования Российской Федерации государственной услуги по принятию решения о финансовом обеспечении предупредительных мер по сокращению производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников и санаторно-курортного лечения работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными производственными факторами. Утвержден приказом Фонда социального страхования Российской Федерации от 7 мая 2019 г. № 237. [Administrative regulations for the provision by the Social Insurance Fund of the Russian Federation of State services for the adoption of a decision on the financial provision of preventive measures to reduce industrial injuries and occupational diseases of workers and sanatorium and resort treatment of workers employed in work with harmful and (or) dangerous industrial factors. Approved by order of the Social Insurance Fund of the Russian Federation dated May 7, 2019 No. 237 (In Russ.)]
43. Environmental Liability Directive Protecting Europe’s Natural Resources. Luxembourg: Publications Office of

- the European Union, 2013, p. 23. URL: https://ec.europa.eu/environment/legal/liability/pdf/eld_brochure/ELD%20brochure.pdf
44. USACE. 2010a. USACE Process for the National Flood Insurance Program (NFIP) Levee System Evaluation. URL: http://publications.usace.army.mil/publications/eng-circulars/EC_1110-2-6067.pdf.
45. Федеральный закон № 225-ФЗ «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте». [Federal Law No. 225-FZ “On Compulsory Civil Liability Insurance of the Owner of a Dangerous Object for Causing Harm as a Result of an Accident at a Dangerous Object” (In Russ.)]
46. Федеральный закон № 226-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона “Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте”». [Federal Law No. 226-FZ “On Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with the Adoption of the Federal Law” On Compulsory Civil Liability Insurance of the Owner of a Hazardous Object for Causing Harm as a Result of an Accident at a Hazardous Object (In Russ.)]
47. Постановление Правительства РФ от 1 октября 2011 г. № 808 «Об утверждении страховых тарифов по обязательному страхованию гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте, их структуры и порядка применения страховщиками при расчете страховой премии». [Decree of the Government of the Russian Federation of October 1, 2011 No. 808. “On

approval of insurance tariffs for compulsory civil liability insurance of the owner of a dangerous object for causing harm as a result of an accident at a dangerous object, their structure and the procedure for application by insurers in calculating the insurance premium” (In Russ.)]

Сведения об авторах

Иващенко Илья Николаевич: доктор технических наук, директор центра безопасности и натурных наблюдений сооружений электростанций, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (АО «НИИЭС», JSC “NIIES”)

Количество публикаций: более 70, 3 монографии

Область научных интересов: безопасность сооружений, оценка и регулирование риска

Контактная информация:

Адрес: 125362, Россия, г. Москва, Строительный проезд, д. 7а

i-n-i@list.ru

Гончаров Михаил Алексеевич: эксперт, научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики», (НИУ «Высшая школа экономики», HSE–NR University), факультет права, Институт проблем правового регулирования

Количество публикаций: 6

Область научных интересов: оценка и регулирование риска, нормативно-правовое обеспечение безопасности плотин

Контактная информация:

Адрес: 109028, Россия, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11

mgoncharov@hse.ru

Статья поступила в редакцию: 29.09.2021

Одобрена после рецензирования: 04.10.2021

Принята к публикации: 26.10.2021

Дата публикации: 30.12.2021

The article was submitted: 29.09.2021

Approved after reviewing: 04.10.2021

Accepted for publication: 26.10.2021

Date of publication: 30.12.2021