

УДК 502/504:627.8.059.2

В. И. ВОЛКОВ, Е. В. ДОБРОВОЛЬСКАЯФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ МЕТОДИКАМ**

Статья посвящена вопросу оценки риска аварий гидротехнических сооружений. В статье представлено сравнение вероятностей возникновения аварий (риска аварий), дается оценка различных методик расчета. Сформулированы проблемы, связанные с обеспечением безопасности гидроузлов в целом, с проведением своевременных ремонтных мероприятий для предотвращения аварий грунтовых плотин. Дается краткое изложение методик оценки риска, применяемых в России и за рубежом. Сравняются результаты расчета, анализируются причины значительных различий. Представлено сравнение вероятностей возникновения аварий (риска аварий) грунтовых плотин низконапорных гидроузлов, полученных по различным методикам. Наибольшая разница между количественными оценками риска для рассматриваемых гидроузлов составила 98,8 %. Полученные значения риска позволяют оценить уровень риска по полученным значениям вероятности аварий гидротехнических сооружений. Наибольшие значения риска возникновения аварии вследствие нарушения фильтрационных процессов, рассчитанные по методике R. Fell, наблюдались для тела плотин, наименьшие – для оснований плотин. Согласно расчету по методике ФГУП РосНИИВХ для тех же гидроузлов наблюдается обратная ситуация: наибольшие значения риска возникновения аварии вследствие нарушения фильтрационных процессов получены для оснований плотин, наименьшие значения риска – для тела плотин. Расхождение результатов оценки риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости при сравнении методик R. Fell и ОАО «НИИ ВОДГЕО» составили 98,0...98,8 %; R. Fell и ФГУП РосНИИВХ – 14,8...99,7 %; ОАО «НИИ ВОДГЕО» и ФГУП РосНИИВХ – 66,7...99,9 %.

Низконапорный гидроузел, грунтовые плотины, риск аварии, среднегодовая вероятность отказа, интегральная оценка риска.

The article concerns the problem of accidents risk assessment of hydraulic structures. In the article there is presented a comparison of probabilities of accidents risks, an assessment of different methods of calculation. Problems are formulated connected with ensuring safety of hydraulic units on the whole, carrying out timely repairing measures in order to prevent failures of earth dams. There is given a brief description of the methods of risks assessment used in Russia and abroad. The calculation results are compared, causes of significant differences are analyzed. There is given a comparison of accidents risks of earth dams of low pressure hydraulic units obtained according to different methods. The biggest difference between quantitative risk assessments for the considered hydraulic units was 98,8 %. The received risks values allow assess the level of risk according to the obtained probabilities values of failures of hydraulic units. The biggest values of accidents risks as a result of violation of filtration processes calculated according to R. Fell method were observed for a body of dams, the least – for a base of dams. According to the calculation on the methodology of FGUP RosNIIVKh for the same hydraulic units there is observed a reversed situation: the biggest values of accidents risk as a result of violation of filtration processes were received for bases of dams, the least – for a body of dams. The discrepancy of risk assessment results of earth dams because of the loss of the statical stability under comparison of methods R. Fell and ОАО «NII VODGEO» were 98,0...98,8 %; R. Fell and FGUP RosNIIVKh – 14,8...99,7 %; ОАО «NII VODGEO» and FGUP RosNIIVKh – 66,7...99,9 %.

Low-head hydraulic unit, earth dams, risk of an accident, average annual failure risk, integrated assessment of risk.

В соответствии с рядом существующих в РФ ведомственных документов, регламентирующих оценку риска и расчета размера причинения вреда жизни и здоровью населения, имуществу физических и юридических лиц, водным объектам, объектам инфраструктуры в результате аварий гидротехнических сооружений [1, 2, 4...6] авторами статьи предлагается оценивать вероятность каждого сценария возникновения аварии (риска аварии) гидротехнического сооружения (ГТС).

Сведения о вероятности различных сценариев возникновения аварий ГТС необходимы для идентификации потенциальных опасностей, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации сооружений, планирования мероприятий по обеспечению уровня безопасности, а также для определения наиболее вероятного сценария развития аварии, для которого производится расчет размера вреда в результате аварии. Поскольку авария ГТС часто сопровождается причинением ущерба жизни, здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, окружающей среде, то при оценке уровня опасности конкретных сооружений используется термин «риск» или «степень риска».

В соответствии с разработанными ОАО «ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева» методическими указаниями [1] риск аварии ГТС – это мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии сооружения и тяжесть ее последствий для здоровья, жизни людей, имущества и окружающей природной среды.

Несмотря на отсутствие в РФ утвержденных нормативно-методических документов по оценке риска аварий ГТС, в нашей стране и за рубежом имеется ряд ведомственных методик, позволяющих оценить риск аварии [4–6]. Существующие методики оценки вероятности возникновения риска сложны, громоздки и трудоемки в основном из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных.

Анализ рисков подразделяется на два взаимно дополняющих друг друга вида: качественный и количественный. Главная задача качественного анализа заключается в выявлении и идентификации возможных видов рисков. Необходимо описать и дать стоимостную оценку всех возможных последствий гипотетической

реализации выявленных рисков и предложить мероприятия по минимизации и компенсации этих последствий, рассчитав стоимостную оценку этих мероприятий. Количественный анализ должен дать возможность численно определить размеры отдельных видов и всего риска в целом. Результаты качественного анализа служат важной исходной информацией для осуществления количественного анализа.

В своде правил [3] рекомендуется применять вероятностный анализ для обоснования принимаемых технических решений системы «сооружение–основание» и приводятся допускаемые значения вероятностей возникновения аварий (риска аварий) на напорных ГТС I–IV классов (таблица 1).

Таблица 1
Допускаемые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС, 1/год

Класс сооружения	Вероятность возникновения аварии, 1/год
I	$5,0 \cdot 10^{-5}$
II	$5,0 \cdot 10^{-4}$
III	$2,5 \cdot 10^{-3}$
IV	$5,0 \cdot 10^{-3}$

Анализ литературных источников показал, что практически отсутствуют сведения о сравнении и анализе результатов расчета вероятностей возникновения аварий, рассчитанных по различным методикам.

Такой анализ представляется крайне важным, так как возможные различия результатов могут существенно сказаться на оценке уровня безопасности и состояния ГТС. Различие оценок может привести к неэффективному использованию средств (часто весьма значительных), которые могут потребоваться при выполнении ремонтных работ, а также к их неправильному использованию, что может привести к авариям или даже разрушениям тех сооружений, сроки ремонта которых были спланировано неверно.

Авторами статьи сделана попытка сравнения вероятностей возникновения аварий (риска аварий) грунтовых плотин полученных по методикам, изложенным в [4–6].

Оценка риска аварии ГТС по методике

ОАО «НИИ ВОДГЕО». На основе метода экспертных оценок предлагается проводить оценку риска аварий ГТС по методике [4]. За основу количественной оценки опасности, уязвимости, риска аварий сооружений принят подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуаций, принимаемой за единицу. При этом опасность аварии ГТС определяется следующими показателями:

опасность превышения принятых при обосновании конструкции сооруже-

ния природных нагрузок и воздействий; обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям;

соответствие проекту конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания;

возможные последствия и ущерб при аварии ГТС.

Степень опасности по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок с учетом таблиц 2–4 [4].

Таблица 2

Сравнение результатов расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости с методикой R. Fell

№ плотины	Риск аварии P_2 по методике R. Fell), 1/год	Риск аварии P_1 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год	Δ , %	Риск аварии P_3 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Δ , %
1	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	98,0	$7,2 \cdot 10^{-3}$	99,3
2	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	98,4	$2,3 \cdot 10^{-5}$	14,8
3	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	98,6	$9,3 \cdot 10^{-3}$	99,7
4	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	98,8	$2,7 \cdot 10^{-7}$	98,5

Таблица 3

Сравнение результатов расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости по методикам ОАО «НИИ ВОДГЕО» и ФГУП РосНИИВХ

№ плотины	Риск аварии P_1 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год	Риск аварии P_3 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Δ , %
1	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	66,7
2	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	98,7
3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	78,5
4	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	99,9

Таблица 4

Сравнение результатов расчета риска возникновения аварий гидроузлов с учетом состояния водосбросного сооружения и без учета его состояния, полученных по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО»

№ гидроузла	Риск возникновения аварии, 1/год	
	Без учета состояния водосбросного сооружения	С учетом состояния водосбросного сооружения
1	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,1675
2	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
4	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$

Степень уязвимости сооружения определяется их восприимчивостью к воздействию факторов опасности. Приняты следующие основные показатели уязвимости ГТС:

состояние сооружения (по данным инструментальных наблюдений и визуального контроля);

состояние окружающей среды в зоне влияния ГТС (по данным мониторинга);

организация эксплуатации ГТС (соблюдение требований безопасной эксплуатации);

готовность объекта к локализации и ликвидации чрезвычайной ситуации.

Каждый из этих показателей также определяется посредством метода экспертных оценок с учетом соответствующих таблиц [4].

Степень риска аварии количественно выражается коэффициентом риска аварии:

$$r_a = \lambda \cdot v_y,$$

где λ – коэффициент опасности аварии; v_y – коэффициент уязвимости ГТС.

Физический смысл коэффициента r_a состоит в том, что он представляет собой долю от риска аварии ГТС при различных сочетаниях показателей опасности и уязвимости.

Расчеты коэффициента риска r_a позволяют оценить вероятность возникновения аварии P_a :

$$P_a = 0,5 \operatorname{erfc} \left[\frac{\beta \ln \left(\frac{r_a}{r_k} \right)}{\ln \left(\frac{r_{\text{доп}}}{r_k} \right)} \right],$$

где r_k – значение коэффициента риска ($r_k = 1$); $r_{\text{доп}}$ – допустимое значение коэффициента риска, выше которого не обеспечивается нормальный уровень безопасности ГТС; β – коэффициент вероятности, зависящий от класса ГТС (таблица 14 [4]); erfc – вероятностная функция, значения которой приведены в таблице ([4], табл. 15).

Оценка вероятности отказа грунтовых плотин по методу R. Fell. Методика [6] позволяет оценить среднегодовые частоты (среднегодовые вероятности) отказов грунтовых плотин и дамб при нормальных условиях эксплуатации по следующим причинам:

- потеря устойчивости откосов;
- нарушение фильтрационной прочности тела плотины;
- нарушение фильтрационной прочности основания плотины;

Оценка вероятности (среднегодовой частоты) отказов грунтовой плотины или дамбы по указанным причинам включает следующие этапы:

определение категории C_i грунтовой плотины или дамбы (C_i – назначается исходя из типа плотины ([6], таблица Б.1);

выбор коэффициентов F_j , влияющих на вероятность отказов грунтовой плотины по внутренним причинам;

вычисление коэффициентов риска F_{SS} , F_{EE} , F_{FE} , характеризующих соответственно устойчивость откосов плотины или дамбы, фильтрационную прочность грунтов тела сооружения и его основания;

определение вероятности отказов грунтовой плотины за время ее срока службы по графикам связи коэффициентов риска с вероятностью отказа;

определение среднегодовой вероятности отказа, допустимой для среднего срока службы грунтовых плотин;

корректировка результатов с учетом качества мониторинга, уровня эксплуатации плотины, признаков нарушения устойчивости откосов или развивающихся фильтрационных деформаций.

Выбор численных значений коэффициентов F_j , влияющих на вероятность отказов грунтовой плотины или дамбы по указанным причинам, выполняется экспертной группой по таблице ([6], табл. Б.2) с учетом условий размещения и эксплуатации, класса и категории анализируемого сооружения.

Вероятности P_{SS} , P_{EE} и P_{FE} отказа грунтовой плотины или дамбы в результате нарушения устойчивости откосов сооружения, нарушения фильтрационной прочности грунтов тела плотины или дамбы и их оснований определяются по графику связи коэффициентов риска с вероятностью отказа ([6], рис. 2.2).

Среднегодовые значения вероятности отказа грунтовой плотины или дамбы по внутренним причинам определяются путем деления величин P_{SS} , P_{EE} и P_{FE} на 30 лет (средний срок эксплуатации плотин – объектов ICOLD, на момент публикации методики). Если срок безаварийной эксплуатации анализируемого сооружения значительно превышает 30 лет, допускается деление P_{SS} , P_{EE} и P_{FE} на этот интервал.

Оценка риска аварии ГТС по методике ФГУП РосНИИВХ. Основные положения методики, приведены в [5]. Риск оценивается на основе анализа дерева событий, в котором в качестве основных причин возникновения аварий на грунтовых плотинах рассматриваются четыре независимых фактора: перелив воды через гребень, образование оползня, суффозия и ошибки при проектировании и эксплуатации гидроузла. На основании сопоставительного анализа по каждому из основных факторов дерева событий выбираются два-три сценария, по которым производится определение реального соотношения сил, препятствующих реализации

рассматриваемого вида разрушения, к силам его вызывающим.

Для каждого фактора возникновения аварии по приведенным в [5] формулам определяется значение риска λ_i . Суммарный риск аварийной опасности ГТС представляет собой сумму рисков, определяемых независимыми факторами.

Сравнительный анализ методик оценки риска возникновения аварий. Для сравнительного анализа вероятностей возникновения аварии (риска аварий) грунтовых плотин низконапорных гидроузлов, авторы статьи провели расчет для гидроузлов IV класса по методикам, описанным в [4–6]. Результаты расчета приведены в таблицах 2–5.

Таблица 5

Сравнение результатов расчета риска возникновения аварий плотин из-за нарушения фильтрационной прочности тела плотины

№ гидроузла	Риск возникновения аварии P_1 по методике R. Fell, 1/год	Риск возникновения аварии P_2 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Δ , %
1	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	50,0
2	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	32,5
3	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	19,4
4	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	77,8

Результаты оценок, представленные в таблицах 2–3, позволяют сделать следующие выводы. Расхождение результатов оценки риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости при сравнении методик R. Fell и ОАО «НИИ ВОДГЕО» составляет 98,0...98,8 %; R. Fell и ФГУП РосНИИВХ – 14,8...99,7 %; ОАО «НИИ ВОДГЕО» и ФГУП РосНИИВХ – 66,7...99,9 %.

Таким образом, для количественных оценок риска, полученных по разным методикам для одних и тех же грунтовых плотин, имеет место значительное расхождение результатов.

По полученным в таблице 4 результатам оценки риска можно сделать следующие выводы. Интегральная оценка вероятности возникновения аварии по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО» показывает, что итоговое значение риска определяют показатели опасности или уязвимости, оценка уровня опасности или уязвимости которых осуществляется на основании экспертных оценок (с учетом рекомендаций [4]). Подобный подход позволяет определить вероятность аварии (риск аварии) как для отдельных ГТС, так и для гидроузла в целом.

Полученные значения риска позволяют оценить уровень риска по полученным значениям вероятности аварий ГТС. Например, для гидроузла 1 вероятность возникновения аварии грунто-

вой плотины составляет $2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/год и соответственно уровень риска оценивается как приемлемый (допустимый) ([4], табл. 16), а с учетом водосбросного сооружения вероятность возникновения аварии гидроузла 1 составляет 0,1675 1/год и уровень риска соответственно оценивается уже как повышенный ([4], табл. 16). Значительное расхождение в количественной оценке риска связано с неработоспособным (аварийным) состоянием водосброса гидроузла 1.

Результаты расчета, приведенные в таблицах 5 и 6, позволяют сделать следующие выводы: расхождение между результатами оценки риска возникновения аварий из-за нарушения фильтрационной прочности тела плотины составляет 19,4...77,8 %; из-за нарушения фильтрационной прочности основания плотины – 65,6...98,8 %.

Таким образом, наибольшая разница между количественными оценками риска для рассматриваемых гидроузлов составляет 98,8 %, т. е. имеет место существенное различие.

Наибольшие значения риска возникновения аварии вследствие нарушения фильтрационных процессов, рассчитанные по методике R. Fell, наблюдаются для тела плотин, наименьшие же значения риска получены для оснований плотин.

Согласно расчету по методике ФГУП РосНИИВХ для тех же гидроузлов наблюдается обратная ситуация: наибольшие

Сравнение результатов расчета риска возникновения аварий плотин из-за нарушения фильтрационной прочности основания

№ гидроузла	Риск возникновения аварии P_1 по методике R. Fell, 1/год	Риск возникновения аварии P_2 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Δ , %
1	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	65,6
2	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	76,3
3	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	97,5
4	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	98,8

значения риска возникновения аварии вследствие нарушения фильтрационных процессов получены для оснований плотин, наименьшие значения риска – для тела плотин.

Выводы

На основании вышеизложенного, необходимо разработать специальную программу сравнительного анализа для продолжения аналогичных исследований для разных типов и классов грунтовых плотин, а также бетонных плотин, работающих в отличных условиях и имеющих различный уровень и степень поврежденных.

При разработке программы сравнительного анализа методик следует заложить в расчеты оценку влияния определенного элемента расплывчатости качественных и количественных экспертных оценок, применяемых при оценке вероятности возникновения аварий (риска аварий).

На основе проведенных исследований, связанных с оценкой безопасности ГТС и последствий их аварий (разрушений) необходимо сравнить и проанализировать ряд нормативных документов, разработанных для оценки уровня безопасности и определения вероятного вреда от аварий (ущерба).

1. Методические указания по проведению анализа риска аварий: СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04 / под ред. Е. Н. Беллендира, Н. Я. Никитиной [Электронный ресурс]. – URL: http://infosait.ru/norma_doc/47/47545/index.htm (дата обращения 10.09.2014).

2. Порядок определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результа-

те аварии гидротехнического сооружения [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901819891> (дата обращения 10.09.2014).

3. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2012 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094156> (дата обращения 10.09.2014).

4. Куранов Н. П., Розанов Н. Н., Тимофеева Е. А. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности: ОАО «НИИ ВОДГЕО», ЗАО «ДАР/ВОДГЕО» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.opengost.ru/iso/5458> (дата обращения 10.09.2014).

5. Зотеев В. Г., Шахов И. С., Морозов М. Г., Приходько М. А. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 10. – С. 41–48.

6. R. Fell Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions // Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm. – Stockholm, 1996. – P. 567–576.

Материал поступил в редакцию 10.09.14.
Волков Владимир Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений

Тел. 8 (495) 153-86-48

E-mail: volcov_vi45@mail.ru

Добровольская Елена Васильевна, аспирантка

E-mail: dbrvlsk_elena@mail.ru

Тел: 8-916-023-70-55