

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е. В. АНДРЕЕВ**

Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства и водопользования имени Н. А. Костякова

**Ю. В. ЗАЙЦЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет МЭИ»

**О. А. БАЮК**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

**В. В. ШЛАПАК**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет геодезии и картографии МИИГАиК»

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

*Рассматривается метод оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин, где вероятностный статистический подход является эффективным инструментом в решении поставленной задачи.*

*Низконапорные грунтовые плотины, критериальные показатели, эксплуатационная надежность, диагностические показатели, уровень безопасности, экспертная оценка, мера согласованности, коэффициент конкордации, доверительный интервал, инструментальное обследование, система экспертных оценок.*

*We consider the method of assessing the operational reliability of low-pressure ground dams where probabilistic statistical approach is an effective tool in solution of the assigned task.*

*Low-pressure groundwater dams; criterion indicators; diagnostic indicators; level of reliability; expert assessment; measure of consistency; coefficient of concordance; confidence interval; instrumental examination; system of expert assessments.*

Низконапорные грунтовые плотины (НГП) представляют собой наиболее распространенный класс сооружений, однако в силу разных причин этим плотинам не уделяется достаточного внимания в плане обеспечения и поддержания эксплуатационной безопасности. Вероятность их разрушения выросла в период перестройки экономики, ликвидации некоторых органов управления водным хозяйством и, как следствие, с отсутствием «собственника» у некоторых объектов. Кроме того, безопасность НГП снизилась в связи с отсутствием у большинства из них проектной и исполнительной документации, а

также данных за период эксплуатации, что затрудняет устанавливать категорию технического состояния и оценивать безопасность грунтового сооружения.

Обеспечение и повышение надежности гидротехнических сооружений невозможно без изучения конкретных причин, приводящих к их повреждению или разрушению. В этой связи разработка или совершенствование методов оценки эксплуатационной надежности (безопасности) низконапорных грунтовых плотин является задачей объективно необходимой.

Мониторинг эксплуатационной

надежности сооружения позволяет выявить факторы, влияющие на безопасность напорного грунтового сооружения. Необходимую оперативность и объективность оценки эксплуатационной надежности можно достичь путем решения ряда методологических и организационно-технических задач, первоочередной из которых является определение критериев безопасности [1–6].

В этой связи применение метода оценки эксплуатационной надёжности НПП, основанного на сопоставлении отдельных параметров (критериальных показателей), определяемых по результатам натуральных наблюдений, является весьма актуальным. Такой подход обоснован тем, что конечный результат (обобщенный коэффициент эксплуатационной надежности) уровня безопасности сооружения (эксплуатационной надежности) строится с учетом влияния множества факторов (*показателя, характеризующего степень исполнения проектных требований; коэффициента безопасности по нагрузке; коэффициента деформации тела плотины; коэффициента деформации основания плотины; степени обеспеченности устойчивости откосов сооружения; показателя, учитывающего неполный перечень показателей и точность их определения для оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин*), оказывающих влияние на сооружение в конкретный период времени [2–6].

Наиболее опасные зоны гидротехнического сооружения, состав количественных и качественных показателей, контролируемых в период эксплуатации, а также состав количественных диагностических показателей и их критериальные значения учитываются при расчете обобщенного показателя эксплуатационной надежности. При этом определяемые значения критериальных показателей должны увязываться с возможными сценариями аварийных событий, развитием опасных зон в теле напорного грунтового сооружения и основными возможными формами разрушения сооружения [1].

Перечень диагностических контролируемых показателей должен обеспечивать возможность оперативной оценки эксплуатационного состояния на конкретном сооружении и оперативной

разработки мероприятий по ликвидации поврежденных участков сооружения силами эксплуатирующей организации, если таковая имеется. В ходе обследования значения диагностических показателей могут корректироваться в результате изменения условий эксплуатации сооружения.

При определении значений критериальных диагностических показателей эксплуатируемых сооружений также следует учитывать:

результат поверочных расчетов наиболее ответственных элементов сооружения с использованием данных о фактических физико-механических характеристиках материалов сооружения;

результаты анализа статистических моделей, построенных с использованием метода натуральных наблюдений и определенных значений фактических нагрузок;

результаты расчета осадки основания сооружения и тела сооружения;

расчет устойчивости грунтовых сооружений и их оснований на сдвиг;

температурно-влажностный режим и термонапряженное состояние сооружения и основания;

устойчивость откосов плотин из грунтовых материалов;

пьезометрический уровень и расходы фильтрационного потока;

пропускную способность водосбросных сооружений;

запас отметки гребня плотины над ФПУ.

Определение безопасности гидротехнического сооружения подразумевает возможность определения количественных оценок безопасности (как это делается в отношении надежности, например), поэтому осуществление контроля безопасности сооружений только на основе анализа контролируемых показателей в ряде случаев затруднительно (например, когда ни один из контролируемых параметров не достиг предельно допустимого уровня, а разрушение плотины продолжается). Более правильным с точки зрения оценки эксплуатационной надежности является подход, когда состояние сооружения оценивают на основе применения обобщенных показателей, использующих всю доступную количественную и качественную информацию о состоянии как отдельных элементов плотины, так и гидротехнического сооружения в целом [1–6].

Поэтому эффективным способом является экспертная оценка уровня безопасности гидротехнического сооружения в безразмерной (балльной шкале). Для каждого сценария возможной аварии определяется перечень действующих факторов безопасности, эти факторы ранжируются по значимости, экспертным путем определяется значение каждого фактора и по определенному правилу (формуле) строится общая балльная оценка уровня безопасности гидротехнического сооружения [2– 6].

Известно, что современные нормативные документы не устанавливают конкретное значение допустимого уровня безопасности (риска аварии), характеризующего степень отклонения состояния

гидротехнического сооружения от проектного состояния и условий его эксплуатации. Однако определенная доля риска аварии гидротехнического сооружения остается даже при выполнении всех требований нормативных документов.

Поэтому комплексную оценку состояния гидротехнического сооружения следует выполнять в форме оценки уровня риска аварии в вероятностной постановке задачи, так как выбор количественного показателя, определяющего уровень надежности гидротехнического сооружения, а также вычисление выбранного показателя для конкретного сооружения являются весьма сложными задачами, не имеющими общепринятого однозначного решения (табл. 1) [2–5, 7].

Таблица 1

Качественные характеристики уровня безопасности ГТС

Категория технического состояния	Описание технического состояния ГТС	Эксплуатационная надежность $K_{э.н.}$	Поврежденность $\varepsilon = 1 - K_{э.н.}$
1	<b>Нормальный уровень безопасности:</b> ГТС соответствуют проекту, действующим нормам и правилам, значения критериев безопасности не превышают предельно допустимых для работоспособного состояния сооружений и оснований, эксплуатация осуществляется без нарушений действующих законодательных актов, норм и правил, предписания органов государственного надзора выполняются	$0,96 < K_{э.н.} \leq 1$	$\varepsilon = 0...0,04$
2	<b>Пониженный уровень безопасности:</b> невыполнение первоочередных мероприятий или неполное выполнение предписаний органов государственного надзора по обеспечению безопасности ГТС и другие нарушения правил эксплуатации при прочих условиях, приведенных в п. 1	$0,86 < K_{э.н.} \leq 0,95$	$\varepsilon = 0,05...0,14$
3	<b>Неудовлетворительный уровень безопасности:</b> снижение механической или фильтрационной прочности, превышение предельно допустимых значений критериев безопасности для работоспособного состояния, другие отклонения от проектного состояния, способные привести к развитию аварии	$0,81 < K_{э.н.} \leq 0,85$	$\varepsilon = 0,15...0,19$
4	<b>Опасный уровень безопасности:</b> наступает вследствие развивающихся процессов снижения прочности и устойчивости элементов ГТС и их оснований, превышения предельно допустимых значений критериев безопасности, характеризующих переход от частично неработоспособного к неработоспособному состоянию сооружений и оснований	$0,75 < K_{э.н.} \leq 0,8^*$	$\varepsilon = 0,20...0,25$ и выше

\* Если  $K_{э.н.} < 0,75$ , то показатель уровня надежности будет соответствовать опасному уровню безопасности.

Для определения итогового показателя надежности гидротехнического сооружения разработана методика оценки уровня безопасности (надежности) гидротехнического

сооружения в безразмерной (балльной) шкале. Экспертной комиссией первоначально рассматриваются и уточняются отдельные элементы гидротехнического сооружения

и выделенные критерии, по которым будет определяться обобщенный коэффициент, характеризующий надежность работы рассматриваемого гидротехнического сооружения. Таким образом, мы имеем  $k_i$  отдельных элементов (критериев) или функциональных особенностей гидротехнического сооружения, по которым экспертным методом будем определять характеристики надежности. Экспертная оценка устанавливается с учетом всей совокупности факторов, имевших место при эксплуатации данной плотины.

Итак, для каждого критерия членами экспертной комиссии устанавливается оценка (по десятибалльной шкале), характеризующая надежность данного критерия, после чего проводится поэтапное уточнение полученной системы экспертных оценок следующим образом.

Рассчитывается среднее значение экспертной оценки:

$$Q_{\text{ср.}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – число членов экспертной комиссии.

Определяется размах по системе экспертных оценок:

$$P = Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{max}}$  и  $Q_{\text{min}}$  – максимальные и минимальные оценки соответственно.

Члены комиссии знакомятся с результатами проведенной экспертизы (обсуждение результатов).

Члены экспертной комиссии, которые выставили максимальный и минимальный балл (в рассматриваемой совокупности экспертных оценок), дают пояснения (обоснования поставленным баллам, оценкам).

Если, по мнению членов экспертной комиссии, размах значений имеет повышенный результат (значение), то проводится повторный цикл экспертных оценок с учетом всех вышеуказанных факторов.

Далее по новой системе экспертных оценок определяется среднее значение  $Q_{\text{ср.}}$ , размах по новой системе экспертных оценок и даются пояснения членами экспертной комиссии, которые дали максимальную и минимальную экспертные оценки. По системе повторных экспертных оценок комиссия принимает решение – считать ли их окончательными или, повторив операцию, выставить новые оценки. При повторной операции размах  $P$  существенно снижается, и комиссия имеет систему экспертных оценок по надежности совокупности критериев гидротехнического сооружения.

Предлагаемая методика определения характеристик надежности предполагает статистическую обработку полученной системы экспертных оценок – рассчитывается дисперсия по системе экспертных оценок:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{\text{ср.}} - Q_i)^2 \text{ при } n < 100, \quad (3)$$

где  $n$  – число экспертных оценок;  $Q_{\text{ср.}}$  – среднее арифметическое по рассматриваемой системе экспертных оценок.

Затем рассчитывается стандартное отклонение  $S$  по данной совокупности экспертных оценок и доверительный интервал значений  $\text{Din } Q$ :

$$S = \sqrt{D}, \quad \text{Din } Q = \frac{t_p S}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где  $t_p$  – коэффициент Стьюдента, определяемый исходя из объема рассматриваемых значений по специальным таблицам (значения коэффициента Стьюдента  $t_p$  – для доверительной вероятности  $p = 0,9$  в зависимости от числа измерений приведены в табл. 5 [8]).

Истинные значения  $Q$  с доверительной вероятностью  $p$  находятся между значениями  $Q_{\text{ср.}} - \text{Din } Q$ , и  $Q_{\text{ср.}} + \text{Din } Q$ , т. е. в интервале

$$J((Q_{\text{ср.}} - \text{Din } Q), (Q_{\text{ср.}} + \text{Din } Q)). \quad (5)$$

Коэффициент Стьюдента для других значений доверительной вероятности в зависимости от числа измерений приведен в таблице 5 [8].

В заключение для рассматриваемой совокупности значений по надежности выбранного критерия определяется коэффициент вариации – как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению балльной оценки по надежности рассматриваемого критерия:

$$K_{\text{вар}} = \frac{S}{Q_{\text{ср.}}} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Как отмечено ранее, целесообразно оценивать меру согласованности мнений экспертов и устанавливать причины несовпадения суждений. Для оценки меры согласованности мнений экспертов формируется таблица 2.

Итак по каждому критерию системы оценки надежности и по ряду функциональных характеристик экспертной комиссией устанавливается балльная оценка надежности. По всей совокупности критериев мы имеем систему экспертных оценок, значения дисперсии, стандартного отклонения, величину доверительного интервала значений и коэффициент вариации.

Оценка меры согласованности мнений членов экспертной комиссии с расчетом коэффициента Кендалла

Коэффициент	Приведенный коэффициент	Номер эксперта							$\Sigma_{cp}$	$\Delta$	$\Delta$	$k_{i.сп.}$
		1	2	3	4	5	6	7				
$k_1$	$k_1$	5	5	6	6	6	5	6	39	15,7	246,5	5,57
$k_2$	$k_2$	2	3	2	3	2	3	2	17	6,3	39,7	2,42
$k_3$	$k_3$	3	2	2	2	2	2	3	16	7,3	53,3	2,28
$k_4$	$k_4$	5	5	5	5	6	5	5	36	12,7	161,3	5,14
$k_5$	$k_5$	2	3	2	1	2	3	1	14	9,3	86,5	2,0
$k_6$	$k_6$	3	2	3	3	2	2	3	18	5,3	28,1	2,57
$\Sigma$	–	–	–	–	–	–	–	–	23,3	–	615,4	19,98

По отдельным критериям имеется система экспертных оценок (сумма баллов). Далее рассчитывается среднее значение баллов по всей совокупности рассматриваемых критериев, учитывающих надежность гидротехнического сооружения:

$$C_{cp} = \sum C_i / n, \quad (7)$$

где  $n$  – число анализируемых элементов (критериев).

Далее для каждого элемента конструкции рассчитывается  $\delta = C_{cp} - C_i$  и определяется величина  $\delta^2$ .

Коэффициент согласованности мнений экспертов  $W$  с учетом приведенной таблицы определяется из соотношения

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)} = \frac{12 \cdot 615,4}{7^2(6^3 - 6)} = \frac{7384,8}{10,290} = 0,72,$$

где  $W \geq 0,5$  – сумма квадратов отклонений;  $n$  – число членов экспертной комиссии;  $m$  – число рассматриваемых элементов (критериев), по которым определяется значение надежности ее функционирования.

Считается, что согласованность мнений вполне достаточна, если коэффициент конкордации  $W \geq 0,5$ . При значении  $W = 0,2 \dots 0,45$  целесообразно проводить уточнение экспертных оценок и делать повторную экспертизу по вышеизложенной методике.

Итак, в соответствии с принятой методикой расчета по каждому критерию имеется система экспертных оценок, данные по дисперсии, стандартному отклонению, значению доверительного интервала и коэффициенту вариации [3–6].

Следующий этап формирования итогового показателя надежности гидротехнического сооружения состоит в ранжировании рассматриваемых элементов (критериев) по их значимости,

т. е. вводятся коэффициенты весомости вклада в обеспечение надежности функционирования гидротехнического сооружения.

Определение коэффициентов весомости проводится с помощью формирования экспертных оценок и их уточнения вышеописанным методом, расчета коэффициента конкордации (согласованности). В результате по всем элементам имеется система коэффициентов весомости  $B_{\phi 1}, B_{\phi 2} \dots B_{\phi n}$  (по десятибалльной шкале).

Итоговый показатель надежности гидротехнического сооружения в соответствии с предложенной моделью рассчитывается с помощью интегрального коэффициента  $K_{общ.}$ , который вычисляют как сумму произведений отдельных средних экспертных оценок (по критериям), деленную на коэффициенты их весомости:

$$K_{общ.} = \frac{k_1 B_{\phi 1} + k_2 B_{\phi 2} + k_3 B_{\phi 3} + k_4 B_{\phi 4} + k_5 B_{\phi 5} + k_6 B_{\phi 6}}{B_{\phi 1} + B_{\phi 2} + B_{\phi 3} + B_{\phi 4} + B_{\phi 5} + B_{\phi 6}}. \quad (8)$$

Апробация данного подхода при обследовании гидротехнических сооружений в Ярославской области подтвердила свою объективность и достоверность. Так, по результатам инструментального обследования сооружений был присвоен неудовлетворительный и опасный уровень безопасности соответственно, что совпало с результатами расчетов по методу экспертной оценки уровня безопасности [3–6].

Применительно к объектам экспериментального обследования для двух низконапорных грунтовых плотин итоговый показатель  $K_{общ.}$  представляется

следующим:

плотина № 1 ( $H = 5,7$  м; Ярославская область, Переславский район, поселок Ефимьево) –

$$K_{\text{общ.}} = \frac{0,88 \cdot 5,57 + 0,83 \cdot 2,42 + 0,6 \cdot 2,28}{5,57 + 2,42 + 2,28 + 5,14 + 2 + 2,57} + \frac{0,75 \cdot 5,14 + 1 \cdot 2 + 0,83 \cdot 2,57}{5,57 + 2,42 + 2,28 + 5,14 + 2 + 2,57} = 0,813;$$

$K_{\text{общ.}} = 0,81$  – неудовлетворительный уровень безопасности (см. табл. 1);

плотина № 2 ( $H = 7,1$  м; Ярославская область, Переславский район, поселок Берендеево) –

$$K_{\text{общ.}} = \frac{0,82 \cdot 5,57 + 0,83 \cdot 2,42 + 0,6 \cdot 2,28}{5,57 + 2,42 + 2,28 + 5,14 + 2 + 2,57} + \frac{0,75 \cdot 5,14 + 1 \cdot 2 + 0,83 \cdot 2,57}{5,57 + 2,42 + 2,28 + 5,14 + 2 + 2,57} = 0,79;$$

$K_{\text{общ.}} = 0,79$  – опасный уровень безопасности (см. табл. 1).

#### Вывод

Предлагаемый итоговый показатель надежности гидротехнического сооружения позволяет с достаточной для практических целей точностью оценивать безопасность функционирования низконапорной грунтовой плотины с учетом большого числа различных факторов (критериев), объективно устанавливающих техническое состояние сооружения.

1. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений: РД 153-34.2-21.342-00. – М., 2000. – 12 с.

2. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В. Особенности влияния неэксплуатационных динамических нагрузок на гидротехнические сооружения // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 25–29.

3. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В. Принципы формализации в построении математической модели оценки надежности низконапорных грунтовых плотин // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 39–44.

4. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В. Проблемы эксплуатационной надежности и безопасности грунтовых плотин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 42–47.

5. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В.

Принципы мониторинга технического состояния низконапорных грунтовых плотин, попадающих в группу риска на основании экспертного заключения // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 38–42.

6. Андреев Е. В. Совершенствование методов оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 211 с.

7. Административный регламент исполнения Росводресурсами, Ростехнадзором, Ространснадзором государственной функции по государственной регистрации гидротехнических сооружений и ведению российского регистра гидротехнических сооружений; утв. приказом Минприроды России 27 апреля 2009 года № 117/ 66.

8. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М., 1965. – 512 с.

Материал поступил в редакцию 08.09.14.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: zharnitskiy@mail.ru

**Андреев Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. 8-926-264-43-07

E-mail: Andreev-rf@mail.ru

**Зайцев Ю.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и технология электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)»

Тел. 8-926-698-92-27

E-mail: zzz6452zz@yandex.ru

**Баюк Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория вероятностей и математическая статистика»

Тел. 8-926-135-12-69

E-mail: oleg\_bayuk@mail.ru

**Шлапак Василий Викторович**, кандидат технических наук, декан геодезического факультета

Тел. 8-(499)-261-89-94

E-mail: geofak@miigaik.ru