

вызванной образованием оползней и обвалов в зоне подпора водозаборного гидроузла. Зона влияния чрезвычайной ситуации фактически не выйдет за пределы землеотвода малой ГЭС.

#### Выводы

Согласно прогнозным оценкам, строительство и эксплуатация Нижнепекулярской малой гидроэлектростанции не приведет к нарушению экологического равновесия в районе ее размещения, изменению условий жизни местного населения.

Разработанные в проекте Нижнепекулярской малой ГЭС технические решения, методы их геоэкологического обоснования, состав природоохранных мероприятий могут рассматриваться как типовые для условий горных территорий Республики Черногории. Использование таких типовых подходов позволит оптимизировать проектирование и строительство объектов малой энергетики в Черногории.

1. Верхнебалкарская МГЭС: выбор параметров и компоновки сооружений с учетом требований безопасной эксплуатации /

Г. Н. Батранюк [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 9. – С. 11–14.

2. Особенности воздействия малых деривационных ГЭС на природную среду районов их размещения // И. Л. Дмитриева [и др.] // Малая энергетика. – 2008. – № 1–2. – С. 63–67.

3. Малик Л. К. Проблемы и перспективы создания малых ГЭС на малых реках // Малая энергетика. – 2004. – №1. – С. 37–48.

Материал поступил в редакцию 02.06.11.

*Дмитриева Ирина Львовна, кандидат химических наук, начальник отдела экологической безопасности, доцент*

*Тел. 8 (916) 968-60-45*

*E-mail: cskte@rambler.ru*

*Гурьевич Татьяна Борисовна, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела экологической безопасности*

*Тел. 8 (903) 580-20-25*

*E-mail: cskte@rambler.ru*

*Самосейко Анна Николаевна, ведущий сотрудник отдела экологической безопасности*

*E-mail: cskte@rambler.ru*

УДК 502/504:627.824.003.12:627.81.004

**Ю. М. КОСИЧЕНКО, Е. А. САВЕНКОВА**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ МАЛОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

*Представлены результаты расчетов надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища, находящейся в одном из четырех возможных диагнозов при различной вероятности состояния диагностических параметров. Для оценки вероятности диагнозов использован метод Байеса.*

*Грунтовая плотина, диагностический параметр, метод Байеса, априорная вероятность, надежность.*

*There are given calculation results of the operation reliability of a ground dam for a small water basin located in one of the four possible diagnoses under a different probability of the state of diagnostic parameters. The Bayesian method was used to assess the probability of diagnoses.*

*Ground dam, diagnostic parameter, Bayesian method, a priori probability, reliability.*

Обеспечение длительной безаварийной работы гидротехнических сооружений является одной из основных задач проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. Оценка уровня безопасности на стадии эксплуатации осуществляется инструментальными и визуальными методами с использованием технических и программных средств мониторинга.

Основными диагностическими показателями грунтовых плотин малых водохранилищ объемом от 1 до 10 млн м<sup>3</sup>, определяемых в результате натуральных наблюдений, являются: превышение гребня плотины над НПУ; пропускная способность открытых и трубчатых водосбросов; просадки гребня плотины; состояние откосов плотины (оползание и разрушение волнами); усиленная фильтрация через тело и основание плотины [1].

Российским научно-исследовательским институтом проблем мелиорации с участием авторов были проведены обследования по определению технического состояния гидротехнических сооружений малых водохранилищ на прудовых гидроузлах Ростовской области и Краснодарского края [2, 3]. По результатам обследований выявлено, что техническое состояние многих из них является аварийным, а по уровню безопасности они соответствуют неудовлетворительному или опасному уровню. На 60 % обследованных объектов превышение гребня плотины над уровнем воды в верхнем бьефе занижено и составляет от 0,25...0,50 м до 1,5...1,6 м, на большинстве прудов верховые откосы разрушены волнобоем, глубина разрушения достигает 1,5...2 м по всему фронту уреза воды. На открытых водосбросах сопрягающие сооружения разрушены. Аналогичные результаты получены учеными Московского государственного университета природообустройства при обследовании низконапорных гидроузлов Московской области [4].

Изучение повреждений сооружений

необходимо для повышения надежности эксплуатации и качества проектирования и строительства подобных сооружений.

В настоящее время для количественной оценки надежности гидротехнических сооружений нашел применение метод Байеса благодаря его простоте и эффективности [5–7]:

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (1)$$

где  $P(D_i)$  – априорная вероятность диагноза  $D_i$ ;  $P(k_j / D_i)$  – условная вероятность появления признака  $k_j$  у объектов с состоянием  $D_i$ ;  $P(k_j)$  – вероятность появления признака  $k_j$  во всех сооружениях независимо от состояния.

При оценке надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища в качестве возможных состояний рассмотрим четыре основных (диагноза):  $D_1$  – отказ грунтовой плотины при переливе воды через гребень вследствие недопустимого запаса гребня над НПУ (менее 0,5 м) из-за просадок тела и основания плотины;  $D_2$  – отказ водосбросного сооружения по причине его неудовлетворительного состояния и недостаточной пропускной способности и заклинивания затворов;  $D_3$  – отказ плотины вследствие усиленной фильтрации и недопустимых фильтрационных деформаций грунта тела и основания, а также контактной фильтрации вдоль стенок трубчатого водосброса;  $D_4$  – нормальное (безотказное) состояние. По данным статистической обработки имеющейся информации [8], интенсивность отказов грунтовых плотин малых водохранилищ объемом от 1 до 10 млн м<sup>3</sup> получена равной  $7,75 \cdot 10^{-3}$  1/год, или 0,00775.

На основании обобщения данных об отказах (разрушениях) грунтовых плотин малых водохранилищ приведем значения риска аварий в зависимости от причин, объединенных в группы отказов (табл. 1).

Таблица 1

Отказы для малых водохранилищ от 1 до 10 млн м<sup>3</sup>

Группа отказов	Вид отказа	Процент отказа	Риск аварии
1	Отказ грунтовой плотины из-за малого запаса гребня (< 0,5 м). Отказ из-за неравномерной просадки гребня	45 %	$3,5 \cdot 10^{-3}$
2	Отказ водосбросного сооружения	30 %	$2,3 \cdot 10^{-3}$
3	Отказ при фильтрации через тело и основание плотины. Отказ при контактной фильтрации вдоль стенок трубчатого водосброса	25 %	$1,87 \cdot 10^{-3}$

Учитывая данные по отказам, вероятности их появления составят:  $P(D_1) = 0,0035$ ;  $P(D_2) = 0,0023$ ;  $P(D_3) = 0,0019$ ;  $P(D_4) = 0,9923$ .

В процессе наблюдений за грунтовой плотинной проверяются признаки  $k_1$  (пропускная способность водосброса недостаточна для пропуска паводка расчетной обеспеченности для сооружений IV класса с обеспеченностью 1...5 %) и признак  $k_2$  (снижение запаса гребня плотины над НПУ ниже предельного значения, который примем равным 0,5 м).

Таким образом, в качестве признаков опасного состояния грунтовой плотины запишем следующие условия:

$$k_1 < Q_{p=1-5\%}; k_2 < d = 0,5 \text{ м.}$$

С учетом формулы Байеса (1) общий вид зависимости для определения вероятностей диагнозов (состояний) грунтовой плотины при проверке двух диагностических признаков  $k_1$  и  $k_2$  имеет следующий вид:

$$P(D_i / k_1 k_2) = \frac{P(D_i)P(k_1 / D_i)P(k_2 / D_i)}{P(D_1)P(k_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(k_2 / D_4)}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – число состояний (диагнозов) плотины.

Используя формулу (2), определим вероятность нахождения плотины мало-го водохранилища в одном из состояний  $D_1 - D_4$  при различном значении диагностических параметров. Примем априори, что при состоянии  $D_1$  признак  $k_1$  для грунтовых плотин IV класса малых водохранилищ встречается в 30 % случаев ( $P(k_1 / D_1) = 0,30$ ), а признак  $k_2$  – в 60 % случаев ( $P(k_2 / D_1) = 0,60$ ). При состоянии  $D_2$  признак  $k_1$  встречается в 70 % случаев ( $P(k_1 / D_2) = 0,70$ ), а признак  $k_2$  – в 20 % случаев ( $P(k_2 / D_2) = 0,20$ ). При состоянии  $D_3$  –  $P(k_1 / D_3) = 0,10$ ;  $P(k_2 / D_3) = 0,05$ ; при состоянии  $D_4$  –  $P(k_1 / D_4) = 0,05$ ,  $P(k_2 / D_4) = 0,03$ .

Определим вероятность состояний

грунтовой плотины, если обследование показало, что признак  $k_1$  (пропускная способность водосброса недостаточна) отсутствует, но имеется признак  $k_1$  (малый запас гребня над уровнем воды). Отсутствие признака  $k_1$  является наличием признака  $\bar{k}_1$  (противоположное событие). Соответственно вероятность появления признака  $\bar{k}_1$  определяется как разность полной вероятности, равной единице, и вероятности признака  $k_1$  [6]:

$$P(\bar{k}_1 / D_i) = 1 - P(k_1 / D_i).$$

Также определим вероятность состояний грунтовой плотины, если отсутствует признак  $k_2$ , но имеется признак  $k_1$  с наличием противоположного признака  $\bar{k}_2$ :

$$P(\bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_2 / D_i).$$

В том случае, когда оба признака  $k_1$  и  $k_2$  отсутствуют, вероятность появления противоположных признаков вычисляется аналогично по следующей формуле:

$$P(\bar{k}_1 \bar{k}_2 / D_i) = 1 - P(k_1 k_2 / D_i).$$

Из формулы Байеса (1) могут быть получены следующие расчетные формулы вероятностей диагнозов (состояний) грунтовой плотины при проверке диагностических признаков:

при отсутствии признака  $k_1$  и наличии признака  $k_2$  –

$$P(D_i / \bar{k}_1 k_2) = \frac{P(D_i)P(\bar{k}_1 / D_i)P(k_2 / D_i)}{P(D_1)P(\bar{k}_1 / D_1)P(k_2 / D_1) + P(D_2)P(\bar{k}_1 / D_2)P(k_2 / D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 / D_3)P(k_2 / D_3) + P(D_4)P(\bar{k}_1 / D_4)P(k_2 / D_4)};$$

при наличии признака  $k_1$  и отсутствии признака  $k_2$  –

$$P(D_i / k_1 \bar{k}_2) = \frac{P(D_i)P(k_1 / D_i)P(\bar{k}_2 / D_i)}{P(D_1)P(k_1 / D_1)P(\bar{k}_2 / D_1) + P(D_2)P(k_1 / D_2)P(\bar{k}_2 / D_2) + P(D_3)P(k_1 / D_3)P(\bar{k}_2 / D_3) + P(D_4)P(k_1 / D_4)P(\bar{k}_2 / D_4)};$$

при отсутствии обоих признаков  $k_1$  и  $k_2$  –

$$P(D_i | \bar{k}_1 \bar{k}_2) = \frac{P(D_3)P(\bar{k}_1 | D_3)P(\bar{k}_2 | D_3)}{P(D_1)P(k_1 | D_1)P(k_2 | D_1) + P(D_2)P(k_1 | D_2)P(k_2 | D_2) + P(D_3)P(\bar{k}_1 | D_3)P(\bar{k}_2 | D_3) + P(D_4)P(\bar{k}_1 | D_4)P(\bar{k}_2 | D_4)}$$

где  $i=1,2,\dots,n$ ;  $n$  – число состояний (диагнозов) плотины.

Результаты расчетов различных состояний грунтовой плотины приведены в табл. 2.

При анализе результатов расчета вероятности состояний грунтовой плотины малых водохранилищ будем учитывать допускаемые их значения как в целом для плотины при нормальном (безаварий-

ном) состоянии  $D_4$ , так и для отдельных ее состояний  $D_1 - D_3$ .

Согласно Д. В. Стефанишину [9], допускаемый обобщенный риск предельных состояний первой группы плотин из грунтовых материалов IV класса для нижней границы составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  1/год, для верхней –  $6 \cdot 10^{-3}$  1/год. Принимая в качестве расчетной допускаемую величину обобщенного риска аварий грунтовых плотин  $5 \cdot 10^{-3}$  1/год (нижний предел), найдем распределение частных рисков основных причин аварийных ситуаций и допустимые количественные значения вероятностей отдельных состояний грунтовых плотин с учетом двух диагностических признаков  $k_1$  и  $k_2$  –  $P(D_i | k_1 k_2)$  (табл. 3).

Допускаемая вероятность появления состояния (диагноза) грунтовой плотины рассчитывалась, исходя из следующего соотношения:

$$P_{\text{доп}}(D_i | k_1 k_2) = 1 - R_{\text{доп}}$$

где  $R_{\text{доп}}$  – допускаемый риск аварийной ситуации.

Таблица 2

Результаты оценки вероятности состояний грунтовой плотины малого водохранилища с учетом вероятности различных состояний и диагностических признаков

$D_i$	$P(k_1   D_i)$	$P(k_2   D_i)$	$P(D_i)$	$P(D_i   k_1 k_2)$	$P(D_i   \bar{k}_1 \bar{k}_2)$	$P(D_i   k_1 \bar{k}_2)$	$P(D_i   \bar{k}_1 k_2)$
$D_1$	0,30	0,60	0,0035	$2,58 \cdot 10^{-1}$	$0,49 \cdot 10^{-1}$	$0,83 \cdot 10^{-2}$	$0,10 \cdot 10^{-2}$
$D_2$	0,70	0,20	0,0023	$3,19 \cdot 10^{-1}$	$0,46 \cdot 10^{-2}$	$0,25 \cdot 10^{-1}$	$0,60 \cdot 10^{-3}$
$D_3$	0,10	0,05	0,0019	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,36 \cdot 10^{-2}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$
$D_4$	0,05	0,03	0,9923	$6,09 \cdot 10^{-1}$	$9,43 \cdot 10^{-1}$	$9,62 \cdot 10^{-1}$	$9,96 \cdot 10^{-1}$

Примечание: \* – значения вероятностей состояния отвечают допускаемым показателям; / – значения являются близкими к допускаемым.

Таблица 3

Допускаемые значения рисков аварийных ситуаций и вероятностей отдельных состояний грунтовых плотин малых водохранилищ

$D_i$	Состояние грунтовой плотины	Доля состояния (причины), %	Допускаемый риск аварийной ситуации, 1/год	Допускаемая вероятность состояний $P_{\text{доп}}(D_i   k_1 k_2)$
$D_1$	Недостаточный запас гребня над уровнем воды	30	$1,50 \cdot 10^{-3}$	0,99850
$D_2$	Недостаточная пропускная способность водосброса	45	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,99775
$D_3$	Опасные фильтрационные деформации в теле и основании	25	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,99875
$D_4$	Нормальное (безаварийное состояние)	100	$5,00 \cdot 10^{-3}$	0,99500

Сопоставление расчетных данных вероятностей отдельных состояний грунтовой плотины в табл. 2 с допускаемыми значениями в табл. 3 показывает, что по-

лученные значения значительно ниже их для состояний грунтовой плотины  $D_1 - D_3$ . Следовательно, можно считать, что опасное состояние грунтовой плотины по этим

причинам маловероятно.

Последнее состояние  $D_4$ , которое в целом характеризует нормальное состояние грунтовой плотины, удовлетворяет допускаемым нормам только при условии отсутствия признаков  $k_1$  и  $k_2$  –  $P(D_4 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 9,96 \cdot 10^{-1}$ . Близкие значения вероятностей состояния к допускаемым характеристикам получены при отсутствии обоих признаков  $k_1$  или  $\bar{k}_2$  –  $P(D_4 / \bar{k}_1 k_2) = 9,43 \cdot 10^{-1}$  и  $P(D_3 / k_1 \bar{k}_2) = 9,62 \cdot 10^{-1}$ .

Следует отметить, что вероятность появления состояний плотины  $D_1$  и  $D_2$  при условии обнаружения обоих диагностических признаков  $k_1$  и  $k_2$  существенно выше, чем при наличии только одного признака  $k_1$  или  $k_2$  и отсутствии другого признака  $k_2$  или  $k_1$ . А в случае отсутствия обоих признаков  $k_1$  и  $k_2$  вероятность этих состояний получается наименьшей.

Так, например, для состояния  $D_1$  при наличии признаков  $k_1$  и  $k_2$  вероятность появления его составляет  $P(D_1 / k_1 k_2) = 2,58 \cdot 10^{-1}$ , а при отсутствии одного из признаков снижается до значений  $P(D_1 / \bar{k}_1 k_2) = 0,49 \cdot 10^{-1}$  и  $P(D_1 / k_1 \bar{k}_2) = 0,83 \cdot 10^{-2}$ . Наименьшее значение получено при отсутствии этих признаков:  $P(D_1 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = 0,1 \cdot 10^{-2}$ .

#### Выводы

С уменьшением числа обследуемых диагностических признаков прогнозируемая вероятность того или иного состояния плотины будет снижаться и составит минимальное значение при отсутствии диагностики любых признаков, характеризующих техническое состояние и работоспособность сооружения. Это свидетельствует о целесообразности предварительного проведения обследований и установлении реальных диагностических параметров с целью уточнения прогнозируемых состояний объекта.

На основании вышеизложенного анализа расчетов прогнозируемой вероятности состояний грунтовой плотины по формулам Байеса наглядно продемонстрировано существенное влияние ряда диагностических признаков, установленных при эксплуатации объекта, на результаты.

1. Кремез С. А. Опыт строительства

и эксплуатации малых водохранилищ в ЦЧО. – Воронеж: Воронежский университет, 1965. – 170 с.

2. Савенкова Е. А. Результаты обследований гидроузлов малых водохранилищ Ростовской области // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. период. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2011. – № 2(02). – С. 6.

3. Савенкова Е. А., Косиченко Ю. М. Диагностика технического состояния прудов и малых водохранилищ и пути их эффективного использования // Мелиорация и водное хозяйство. – 2011. – № 1. – С. 43–45.

4. Каганов Г. М., Волков В. И., Секисова И. А. Анализ состояния низконапорных гидротехнических сооружений Российской Федерации на примере обследования гидроузлов Московской области // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 8. – С. 26–32

5. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 241 с.

6. Финагенов О. М., Белякова С. Н. Оценка эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 9. – С. 24–27.

7. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых плотин гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир [и др.] – СПб: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. – Т. 2. – 524 с.

8. Аварии и повреждения больших плотин / Н. С. Розанов [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 390 с.

9. Стефанишин Д. В. Оценка нормативной безопасности плотин по критериям риска // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 2. – С. 44–47.

Материал поступил в редакцию 29.07.12.

**Косиченко Юрий Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заместитель директора по науке  
Тел. 8-909-404-92-88

E-mail: [rosniipm@yandex.ru](mailto:rosniipm@yandex.ru)  
**Савенкова Елена Александровна**,  
научный сотрудник  
Тел. 8-904-348-03-08

E-mail: [Elena\\_Savenkova\\_85@mail.ru](mailto:Elena_Savenkova_85@mail.ru)