

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е. В. АНДРЕЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

### **ПРИНЦИПЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН, ПОПАДАЮЩИХ В ГРУППУ РИСКА НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРТНОГО ЗАКЛЮЧЕНИЯ**

*Утверждается, что наиболее развитой и безупречной с точки зрения теоретического обоснования формой обобщенного показателя состояния надежности сооружения является интенсивность и частота отказов, вероятность безотказной работы грунтовой плотины в течение последующего срока эксплуатации после ремонтно-восстановительных работ.*

*Низконапорная плотина, массив данных контролируемых показателей, интенсивность и частота отказов, вероятность безотказной работы, потенциальная сопротивляемость, экстремальные воздействия, аварийные события, стохастическая модель, статистические данные, системный подход.*

*It is theoretically substantiated that the most developed and perfect form of the overall index of reliability state is the intensity and frequency of failures, probability of faultless operation of the ground dam during the further operation life after repair-reconstruction work.*

*Low pressure dam, data array of the indices under control, intensity and frequency of failures, probability of faultless operation, potential resistance, extreme impacts, emergency events, stochastic model, statistical data, system approach.*

Контроль за эксплуатационной надежностью после проведения обследования и возможных ремонтно-восстановительных работ тела или отдельных элементов низконапорной грунтовой плотины (НГП) необходим на всем последующем периоде эксплуатации сооружения. Мониторинг, основанный на получении массива данных по контролируемым показателям за определенный период времени, представляется весьма затруднительным (в особенности, когда ни один из контролируемых показателей не достиг предельно допустимого уровня, а процесс накопления повреждений в НГП развивается). Принципиально более правильной является оценка состояния

сооружения на основе применения обобщенных показателей, использующих всю доступную количественную и качественную информацию о состоянии как отдельных элементов сооружения, так и НГП в целом. Наиболее развитой и безупречной (с точки зрения теоретической разработки и обоснования) формой обобщенного показателя состояния сооружения (его надежности) является интенсивность и частота отказов, вероятность безотказной работы НГП в течение последующего срока эксплуатации после восстановительных работ. Принципиальное преимущество этой формы – возможность контроля состояния сооружения с учетом его потенциальной сопротивляемости наступлению

различных возможных видов предельного состояния, а также возможных различных экстремальных воздействий (паводок, сильный ветер, ураган и т. п.).

Для оценки и прогнозирования надежности НГП авторами предложен системный подход. Благодаря системному подходу можно использовать более широкий диапазон характеристик объекта исследования, декомпозировать изучаемый объект с необходимой глубиной для достижения цели исследования, применять другие методологические подходы.

В качестве математической модели, позволяющей оценивать эксплуатационную надежность НГП, предлагается рассмотреть совокупность элементов НГП как стохастическую систему, состоящую из  $N$  элементов, в которых возникают аварийные события под действием внешних факторов и вследствие изменения характеристик свойств отдельных элементов конструкции плотины в период эксплуатации.

Вся совокупность элементов низконапорной грунтовой плотины может быть описана как система, состоящая из  $N$  элементов, где элемент – это единая НГП. Надежность в данной системе определяется  $\lambda$ - и  $f$ -характеристиками, где  $\lambda$ -характеристика – интенсивность возникновения аварийных событий в НГП;  $f$ -характеристика – частота возникновения аварийных событий в системе НГП. Интенсивность возникновения аварийных событий определяется следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{\Delta n}{(N - n_i) \cdot \Delta \tau}$$

где  $\Delta n$  – число аварийных событий в системе НГП за промежуток времени  $\Delta \tau$ ;  $N$  – общее число элементов НГП, входящих в рассматриваемую систему;  $n_i$  – число аварий (аварийных событий), имевших место к началу рассматриваемого промежутка времени  $\Delta \tau$ .

Частота возникновения аварийных событий в системе НГП

$$f = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta \tau}$$

В соответствии с предложенной расчетной моделью представим, что на промежутках времени  $\Delta \tau_1 \dots \Delta \tau_m$  имеют место аварийные события  $\Delta n_1 \dots \Delta n_m$  (рис. 1).

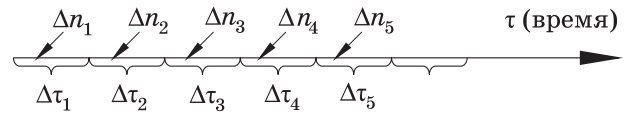


Рис. 1. Число возникающих аварийных событий  $\Delta n_1 \dots \Delta n_m$  на соответствующих временных интервалах времени  $\Delta \tau_1 \dots \Delta \tau_m$

В соответствии с принимаемой моделью расчета можно рассчитать интенсивность и частоту аварийных событий в системе низконапорной грунтовой плотины. На правом участке (на временном интервале  $\Delta \tau_1$ ) интенсивность и частота возникновения аварийных событий соответственно равны:

$$\lambda_1 = \frac{\Delta n_1}{N \cdot \Delta \tau_1}$$

$$f_1 = \frac{\Delta n_1}{N \cdot \Delta \tau_1}$$

где  $\Delta n_1$  – число аварийных событий на промежутке времени  $\Delta \tau_1$ ;  $N$  – общее число элементов НГП, входящих в рассматриваемую систему.

Как следует из приведенных соотношений, на первом временном интервале  $\Delta \tau_1$  интенсивность возникновения аварийных событий равна частоте аварийных событий, поскольку на первом временном интервале число предшествующих событий равно нулю ( $n_i = 0$ ).

На втором участке  $\Delta \tau_2$  интенсивность и частота возникновения аварийных ситуаций соответственно равны:

$$\lambda_2 = \frac{\Delta n_2}{(N - n_1) \cdot \Delta \tau_2}$$

$$f_2 = \frac{\Delta n_2}{(N - n_1) \cdot \Delta \tau_2}$$

Особенностью второго участка является то, что  $\lambda > \lambda_2$ , значение интенсивности аварийных событий несколько выше, чем значение частоты событий.

На третьем временном участке число событий к началу рассматриваемого промежутка времени  $n_i = \Delta n_1 + \Delta n_2$ . Значения интенсивности и частоты аварийных событий рассчитываем по формулам:

$$\lambda_3 = \frac{\Delta n_3}{(N - (\Delta n_1 + \Delta n_2)) \cdot \Delta \tau_3}$$

$$f_3 = \frac{\Delta n_3}{N \cdot \Delta \tau_3}$$

На четвертом временном участке число аварийных событий увеличилось

на  $\Delta n_3$  и составило  $n_i = \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3$ , а значение интенсивности и частоты событий определим так:

$$\lambda_4 = \frac{\Delta n_4}{(N - (\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3)) \cdot \Delta \tau_4};$$

$$f_4 = \frac{\Delta n_4}{N \cdot \Delta \tau_4}.$$

Аналогично определяются значения  $\lambda$  и  $f$  на последующих временных участках. Рассчитанные по указанной методике значения интенсивности и частоты аварийных событий могут представляться и в графическом виде.

Надежность функционирования низконапорной грунтовой плотины на начальном участке работы характеризуется повышенным значением  $\lambda$ -характеристики, т. е. проявляются дефекты в элементах конструкции НГП. Затем следует участок нормальной эксплуатации НГП, характеризующийся примерно постоянным значением отказов (аварийных ситуаций), далее за счет длительной эксплуатации элементов конструкции и развивающихся суффозионных процессов интенсивность аварийных событий вновь возрастает.

Частота возникновения аварии НГП описывается  $f$ -характеристикой, которая практически повторяет ход зависимости  $\lambda$ -характеристики и по численному значению ниже на 5...10 %  $\lambda$ -характеристики. Предлагается стохастическая модель описания надежности НГП, такая модель предполагает наличие статистических данных по плотине за 5–7 лет с момента последнего обследования. На основе указанных статистических данных в соответствии с предложенной моделью рассчитываются  $\lambda$ - и  $f$ -характеристики для каждого года из рассматриваемого временного интервала. На основе расчета  $\lambda$ - и  $f$ -характеристик строятся зависимости интенсивности и частоты аварийных событий от времени эксплуатации плотин.

Основные причины аварий на НГП: недостаточная степень уплотнения грунта и, как следствие, заниженные значения деформационно-прочностных показателей и т. п.; нарушение устойчивости и прочности напорного фронта сооружения или несущей способности основания; превышение допустимых значений деформации конструктивных элементов плотины в процессе эксплуатации; нарушение фильтрационной прочности вследствие изменения фильтра-

ционных характеристик грунтовых материалов; потеря устойчивости конструктивных элементов сооружения; недостаточная пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений.

Основной закономерностью при большом сроке эксплуатации плотин является нелинейное увеличение интенсивности и частоты от времени эксплуатации сооружения. В предлагаемой модели представим текущее изменение  $\lambda$ - и  $f$ -характеристик рассматриваемой системы:

$$\lambda(\tau) = \lambda_0 \exp[\alpha(\tau - \tau_0)];$$

$$f(\tau) = f_0 \exp[\gamma(\tau - \tau_0)],$$

где  $\lambda_0$  и  $f_0$  – исходные значения интенсивности и частоты аварийных ситуаций при некотором фиксированном значении времени  $\tau_0$ ;  $\alpha$  и  $\gamma$  – коэффициенты, характеризующие динамику изменения интенсивности и частоты возникновения аварийных событий в рассматриваемой совокупности НГП на рассматриваемом промежутке времени  $\tau - \tau_0$ .

Используя приведенные соотношения для каждого года эксплуатации НГП, рассчитываем коэффициенты  $\alpha$  и  $\gamma$  и получаем для рассматриваемого временного цикла 5–7 лет совокупность  $\alpha$ -коэффициентов –  $\alpha_1 \dots \alpha_n$ , характеризующих динамику изменения интенсивности аварийных событий в системе НГП и совокупность  $\gamma$ -коэффициентов, характеризующих динамику изменения частот аварийных событий в рассматриваемой системе НГП.

Для прогнозирования дальнейшего изменения  $\lambda$ - и  $f$ -характеристик (в последующие годы) рассчитываем среднее значение коэффициентов  $\alpha$  и  $\gamma$  за последний промежуток времени (рекомендуется за 5–7 лет) и получаем значения  $\lambda_{cp}$  и  $f_{cp}$ , которые с определенной достоверностью характеризуют значения интенсивности и частоты аварийных событий в течение рассматриваемого временного цикла. Далее значения интенсивности и частоты аварийных событий на следующий год определяются так:

$$\lambda_{n+1}(\tau) = \lambda_n \exp[\alpha_{cp}(\tau_{n+1} - \tau_n)];$$

$$f_{n+1}(\tau) = f_n \exp[\gamma_{cp}(\tau_{n+1} - \tau_n)],$$

где  $\lambda_n$  и  $f_n$  – значения интенсивности и частоты аварийных событий в последний год, предшествующий прогнозируемому.

Значение  $\tau_{n+1} - \tau_n$  может быть принято равным одному году, тем самым мы получаем значения интенсивности и частоты аварийных событий (в системе НГП) на последующий год эксплуатации

грунтовых плотин.

Предложенная стохастическая модель может быть использована для прогнозирования интенсивности и частоты аварийных событий путем расчета вероятности нахождения значений  $\lambda$  и  $f$  в определенном задаваемом интервале значений. В этом случае проводится расчет средних значений интенсивности и частоты аварийных событий по рассматриваемому промежутку времени:

$$\lambda_{cp} = \sum_{i=1}^{i=d} \lambda_i / d;$$

$$f_{cp} = \sum_{i=1}^{i=d} f_i / d,$$

где  $d$  – число рассматриваемых временных интервалов (обычно число лет, в течение которых определяли значения  $\lambda$ - и  $f$ -характеристик).

Далее определяем стандартное отклонение для совокупности значений  $\lambda$ - и  $f$ -характеристик, т. е.  $S_\lambda$  и  $S_f$ :

$$S_\lambda = \sqrt{\frac{1}{d-1} \sum_{i=1}^{i=d} (\lambda_{cp} - \lambda_i)^2};$$

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{d-1} \sum_{i=1}^{i=d} (f_{cp} - f_i)^2}.$$

Вероятность того, что значение интенсивности аварийных событий в системе НГП в следующем году  $\lambda$  будет лежать в интервале значений  $A...B$  (где  $A$  – нижняя задаваемая граница интервала, а  $B$  – верхняя граница интервала значений прогнозируемого развития аварийных событий в системе низконапорных грунтовых плотин), запишем так:

$$P(A < \lambda < B) = \int P(\lambda) d\lambda = \frac{1}{2} \left[ \Phi_1 \left( \frac{B - \lambda_{cp}}{S_\lambda} \right) - \Phi_2 \left( \frac{A - \lambda_{cp}}{S_\lambda} \right) \right].$$

В правой части указанного равенства имеем интеграл вероятности рассматриваемого события, выраженный через функции Лапласа  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Определяем аргументы функций  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Значения  $B - \lambda_{cp} / S_\lambda$  и  $A - \lambda_{cp} / S_\lambda$  находим по таблице значений интеграла вероятностей функции Лапласа [1–3]. Затем рассчитываем вероятность события. Значения интенсивности аварийных событий будут находиться в указанном интервале значений.

Выбрав 5...7 вариантов (интервалов значений  $A...B$ ), определяем интер-

вал, характеризующийся наибольшей вероятностью (прогнозируемое значение  $\lambda$ -характеристики находится в данном интервале значений). Поскольку  $\lambda$ -характеристика имеет, как правило, тенденцию к увеличению (особенно при больших сроках эксплуатации плотин), то значение верхнего предела прогнозируемой величины аварийных событий в системе НГП выбирается больше значения  $\lambda$ -характеристики периода (года), предшествующего прогнозируемому.

Аналогично для частоты аварийных событий в системе НГП определяем вероятность того, что  $f$ -характеристика будет лежать в интервале значений  $C...D$ :

$$P(C < f < D) = \int P(f) df = \frac{1}{2} \left[ \Phi_1 \left( \frac{D - f_{cp}}{S_f} \right) - \Phi_2 \left( \frac{C - f_{cp}}{S_f} \right) \right],$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – функции Лапласа, определяющие значения интеграла вероятности; определяются по таблице значений интеграла вероятностей по предварительно рассчитанным значениям  $(D - f_{cp}) / S_f$  и  $(C - f_{cp}) / S_f$ .

Аналогично, как и для интенсивности аварийных событий, находим интервал значений, в котором прогнозируемая величина частоты аварийных событий соответствует максимальному значению вероятности. При выборе анализируемого интервала значений учитывается, что  $f$ -характеристика тоже имеет тенденцию к увеличению, особенно при больших сроках эксплуатации плотин. Заметим, что большое число грунтовых плотин в Российской Федерации имеет срок эксплуатации более 25–30 лет, и вероятность возникновения аварийных событий на данных гидросооружениях значительно возросла.

Например, при наличии данных за 5 лет для коэффициента уплотнения грунта в теле сооружения получим  $K_{cp} = 0,9$  (рис. 2).

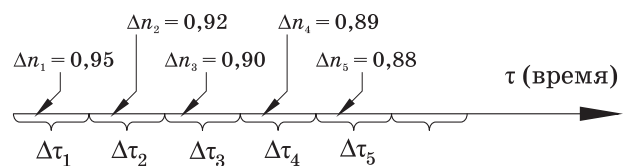


Рис. 2. К определению коэффициента уплотнения грунта в теле плотины при наличии данных за 5 лет

Тогда:

$$\begin{aligned}
 P(0,86 < f < 0,88) &= \int P(f)df = \\
 &= \frac{1}{2} \left[ \Phi_1 \left( \frac{b - K_{cp}}{S} \right) - \Phi_2 \left( \frac{a - K_{cp}}{S} \right) \right] = \\
 &= \frac{1}{2} [-0,7457 - 0,4313] = \\
 &= \frac{-0,3327}{2} = 0,166 \cdot 100 \rightarrow 16,6\%; \\
 \frac{b - K_{cp}}{S} &= \frac{0,88 - 0,9}{0,035} = \\
 &= \frac{-0,02}{0,035} = -0,57 \rightarrow \Phi_1 \rightarrow -0,7457; \\
 \frac{a - K_{cp}}{S} &= \frac{0,88 - 0,9}{0,035} = \\
 &= \frac{-0,02}{0,035} = -0,57 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow -0,4313,
 \end{aligned}$$

где  $a, b$  – граничные значения коэффициента уплотнения грунта

#### Выводы

Вероятность того, что коэффициент уплотнения  $K_{com}$  в последующий период лежит в интервале  $0,86 < K_1 < 0,88$ , равна 16,6 %. Аналогичным образом, имея

динамику изменения значений коэффициентов, можно определить вероятность попадания в заданный интервал каждого в отдельности или установить динамику изменения показателя эксплуатационной надежности плотины.

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.

2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

3. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б. Ю. Лемешко [и др.] – Новосибирск, 2011. – 887 с.

Материал поступил в редакцию 5.12.12.

*Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью» Тел. 8-905-720-30-72*

*E-mail: zharnitskiy@mail.ru*

*Андреев Евгений Владимирович, аспирант*

*Тел. 8-926-264-43-07*

УДК 502/504:627.8

#### И. С. РУМЯНЦЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

#### И. С. СОБОЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ КРИОЛИТОЗОНЫ В СТАЦИОНАРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Описана история вопроса, представлены численно-аналитический и адаптивный методы прогноза термоабразии, показана их совместная реализация на примере берега проектируемого Амгуэмского водохранилища.*

*Криолитозона, водохранилище, берег, термоабразия, прогнозирование.*

*There is described a history of the question, numerical – analytical and adaptive methods of thermo-abrasion forecasting are given, their joint realization is shown by the example of the bank of the Amguemsky reservoir which is under design.*

*Cryolite zone, water reservoir, bank, thermo-abrasion, forecasting.*