

УДК 626 : 627

А.И.ВАЙНБЕРГ, канд. техн. наук  
*ОАО «Укргідропроєкт», г.Харьков*

### **ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ ПРОТИВ СДВИГА МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ**

В рамках параметрической теории надежности предлагается методика решения задач по оценке вероятности потери устойчивости гидротехнического сооружения против сдвига, основанная на непосредственном решении вероятностных задач методом статистической линеаризации. Даются рекомендации по подготовке исходных данных для выполнения вероятностных расчетов и приведен алгоритм решения поставленной задачи.

Устойчивость гидротехнических сооружений против сдвига является одним из важнейших факторов, определяющих их надежность и безопасность. Особое значение имеет необходимость обеспечения устойчивости против сдвига таких гидротехнических сооружений, как бетонные и железобетонные плотины, машинные здания гидроэлектростанций, судоходные сооружения, устои, подпорные стены различного назначения и др.

В настоящее время решение задачи по оценке надежности и безопасности гидротехнических сооружений по условию их устойчивости против сдвига, согласно действующим в настоящее время нормам проектирования [10, 12], выполняется методом предельных состояний, который не позволяет получить количественную оценку надежности и безопасности гидротехнических сооружений [1, 5, 9, 14].

Количественная оценка надежности и безопасности гидротехнических сооружений по условию их устойчивости против сдвига может быть получена вероятностными подходами на основе современной теории надежности сложных технических объектов [1-5, 9, 14].

Вероятность потери устойчивости против сдвига гидротехнических сооружений целесообразно оценивать в рамках параметрической теории надежности, основанной на вероятностной интерпретации расчетов устойчивости этих сооружений. При этом может использоваться обычная последовательность расчета в рамках параметрической теории надежности [1, 3, 5]. Основными этапами расчета риска потери устойчивости против сдвига гидротехнического сооружения являются:

1. Составление уравнения связи между входными (геометрические характеристики сооружения, характеристики активных сдвигающих сил, характеристики пассивных сил, сопротивляющихся сдвигу) и выходными параметрами (результаты расчета).

2. Подготовка исходных данных для расчета в соответствии с принятым уравнением связи и разделение входных параметров на случайные и неслучайные (детерминированные).

3. Определение вероятностных характеристик входных параметров (геометрические характеристики сооружения, характеристики активных сдвигающих сил, характеристики пассивных сил, сопротивляющихся сдвигу).

4. Определение риска (вероятности) потери устойчивости против сдвига гидротехнического сооружения.

Как уже указывалось, решение вероятностных задач в рамках параметрической теории надежности базируется на вероятностной интерпретации разработанных детерминистических методов расчета. Применительно к оценке устойчивости гидротехнических сооружений в качестве таких методов целесообразно воспользоваться прошедшими апробирование нормативными методами. Поэтому ниже изложены основные положения этих нормативных методов расчета. Далее приведена методика решения задач по выполнению каждого из указанных выше этапов по определению риска потери устойчивости гидротехнического сооружения в рамках параметрической теории надежности.

*Нормативная методика оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений по условию устойчивости против сдвига.* При оценке надежности и безопасности гидротехнических сооружений по условию их устойчивости против сдвига должны учитываться нагрузки и воздействия, регламентированные действующими нормами проектирования [10, 12]. Основными из этих нагрузок и воздействий являются собственный вес, давление воды непосредственно на поверхность сооружения, силовое воздействие фильтрующейся воды, давление грунта на подпорные стены и устои (в том числе насыщенного водой грунта, расположенного ниже уровня грунтовых вод), давление ветровых волн, давление льда, сейсмические воздействия. Ограничимся здесь рассмотрением наиболее часто встречающихся нагрузок от собственного веса, давления воды непосредственно на поверхность сооружения, силового воздействия фильтрующейся воды, давления ветровых волн, сейсмических воздействий.

Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения должны приниматься в различных, но возможных сочетаниях. При этом рассматриваются основные и особые сочетания нагрузок и воздействий.

Согласно действующим нормам проектирования [10, 12] для обоснования надежности и безопасности гидротехнических сооружений по условию их устойчивости против сдвига необходимо выполнение расчетов этих сооружений по методу предельных состояний. Такие расчеты должны проводиться по двум группам предельных состояний. Первая группа предельных состояний соответствует потере несущей способности и/или полной непригодности сооружений, их конструкций и оснований к эксплуатации. Вторая группа предельных состояний соответствует непригодности сооружений, их конструкций и оснований к нормальной эксплуатации.

Сдвиг гидротехнического сооружения может быть связан с достижением предельного состояния первой группы. Поэтому здесь рассматривается это состояние в эксплуатационный период.

Недопущение предельного состояния гидротехнического сооружения по условию устойчивости сводится к соблюдению приведенного в нормах проектирования неравенства [10]

$$\gamma_{lc} \cdot F_c \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R_c, \quad (1)$$

где  $F_c$  – расчетное значение обобщенной сдвигающей силы;  $R_c$  – расчетное значение предельного сопротивления сдвигу;  $\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетаний нагрузок, значение которого принимается в зависимости от расчетного сочетания нагрузок и воздействий;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения, значение которого принимается в зависимости от класса сооружения;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

Значения коэффициентов  $\gamma_{lc}$ ,  $\gamma_n$  и  $\gamma_c$  принимаются в соответствии с требованиями норм проектирования [10, 12].

Ограничимся здесь рассмотрением схемы плоского поступательного сдвига по горизонтальной поверхности скольжения. В этом случае расчетное значение обобщенной сдвигающей силы  $F_c$  определяется как сумма проекций на направление сдвига активных сил, действующих на сооружение. При этом должны рассматриваться расчетные значения этих сил, которые следует определять с учетом регламентированных нормами проектирования коэффициентов надежности по нагрузкам. Расчетное значение предельного сопротивления сдвигу  $R_c$  состоит из сил трения  $R_{тр}$  и сцепления  $R_{сц}$  по плоскости сдвига. В расчетах устойчивости должны приниматься расчетные значения этих

сил. Расчетное значение силы трения  $R_{mp}$  определяется как произведение суммы расчетных значений действующих на сооружение вертикальных сил  $N_0$  на расчетное значение коэффициента трения  $tg\varphi$ , т.е.  $R_{mp} = N_0 \cdot tg\varphi$ . Отметим, что значение  $N_0$  должно определяться с учетом противодействия по подошве сооружения, т.е.  $N_0 = V - W_{0f}$ , где  $V$  – сумма вертикальных сил, направленных вниз;  $W_{0f}$  – сила противодействия по подошве сооружения, направленная вверх. Расчетное значение силы сцепления по плоскости сдвига определяется как произведение расчетного значения удельного сцепления  $c$  на площадь подошвы сооружения  $A_0$ , т.е.  $R_{cy} = c \cdot A_0$ . С учетом изложенного, для случая, когда рассматривается схема плоского поступательного сдвига по горизонтальной поверхности скольжения, нормативное неравенство (1) можно записать в виде:

$$\gamma_c \cdot F_c \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \left[ (V - W_{0f}) tg\varphi + c \cdot A_0 \right]. \quad (2)$$

В зависимости от конкретных условий могут рассматриваться другие схемы сдвига. В таких случаях, по аналогии с изложенными выше соображениями, могут быть получены соответствующие конкретизированные аналоги нормативного неравенства (1).

Остановимся теперь на особенностях определения расчетных значений нагрузок на гидротехнические сооружения в рамках нормативной методики.

Расчетное значение нагрузки на сооружение  $G$ , связанной с собственным весом, определяется по формуле

$$G = V_c \cdot \rho_b \cdot g, \quad (3)$$

где  $V_c$  – объем рассматриваемого элемента сооружения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_b$  – расчетное значение плотности материала сооружения, которое определяется как произведение нормативного (среднего) значения плотности материала на регламентированное нормами проектирования значение коэффициента надежности для этой нагрузки. Таким образом учитывается изменчивость нагрузки  $G$ .

Расчетные значения нагрузки на гидротехническое сооружение, связанной с гидростатическим давлением,  $W$ , а также силы противодействия по подошве сооружения  $W_{0f}$  определяются при расчетных уровнях воды в верхнем и нижнем бьефах. Расчетные уровни воды

следует принимать в соответствии с расчетным максимальным расходом воды в реке  $Q$ . Значения вероятности превышения такого расхода приведены в нормах проектирования в зависимости от класса сооружения и расчетного сочетания нагрузок и воздействий [10], что позволяет учесть изменчивость нагрузок  $W$  и  $W_{0f}$ . Следовательно, расчетное значение нагрузки на гидротехническое сооружение, связанной с гидростатическим давлением,  $W$  является функцией расчетного расхода воды в реке. Расчетное значение силы противодействия по подошве сооружения  $W_{0f}$  также является функцией расчетного расхода воды в реке. Следовательно, можно записать:

$$W = W(Q), \quad (4)$$

$$W_{0f} = W_{0f}(Q). \quad (5)$$

В соответствии с требованиями норм проектирования [10, 11] расчетное значение волнового давления  $W_w$  определяется при параметрах волн в водохранилище, соответствующих расчетному значению скорости ветра  $V_w$ . Значения вероятности превышения расчетной скорости ветра принимаются в зависимости от класса сооружения и расчетного сочетания нагрузок и воздействий. Такой подход позволяет учесть изменчивость волнового давления. Очевидно, что расчетное значение волнового давления  $W_w$  является функцией скорости ветра  $V_w$ , т.е.

$$W_w = W_w(V_w). \quad (6)$$

Расчетные значения нагрузок, связанных с сейсмическими воздействиями,  $Q_s$  согласно действующим нормам проектирования [7] определяются при расчетной интенсивности землетрясения  $J$ . Расчетная интенсивность землетрясения  $J$  принимается в зависимости от расчетного сочетания нагрузок и воздействий соответственно для проектного землетрясения повторяемостью 1 раз в 500 лет и для максимального расчетного землетрясения повторяемостью 1 раз в 5000 лет. Так нормами проектирования учитывается изменчивость нагрузок, связанных с сейсмическими воздействиями. Расчетные значения этих нагрузок  $Q_s$  являются функцией интенсивности землетрясения  $J$ , т.е.

$$Q_s = Q_s(J). \quad (7)$$

Учитывая указанные особенности определения нагрузок на гидротехнические сооружения, могут быть найдены расчетные значения

входящих в неравенство (2) величин  $V$  и  $F_c$ .

При определении суммы вертикальных сил, направленных вниз,  $V$  учитываются следующие нагрузки: собственный вес, пригрузка сооружения водой со стороны верхнего и нижнего бьефов, сейсмические нагрузки. Тогда в соответствии с (3), (4) и (7) величина  $V$  может быть представлена в виде функции плотности материала сооружения  $\rho_b$ , максимального расхода воды в реке  $Q$  и интенсивности землетрясения  $J$

$$V = V(\rho_b, Q, J). \quad (8)$$

При определении расчетного значения обобщенной сдвигающей силы  $F_c$  учитываются следующие нагрузки: гидростатическое давление со стороны верхнего и нижнего бьефов, волновое давление и сейсмические нагрузки. Тогда в соответствии с (4), (5) и (7) величина  $F_c$  может быть представлена в виде функции максимального расхода воды в реке  $Q$ , максимальной скорости ветра  $V_w$  и интенсивности землетрясения  $J$

$$F_c = F_c(Q, V_w, J). \quad (9)$$

Учитывая (5), (8), (9), неравенство (2) можно записать в виде:

$$\gamma_{ic} \cdot F_c(Q, V_w, J) \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \left\{ \left[ V(\rho_b, Q, J) - W_{0f}(Q) \right] \operatorname{tg} \varphi + c \cdot A_0 \right\}. \quad (10)$$

Следует отметить, что входящие в выражение (10) функции  $F_c(Q, V_w, J)$ ,  $V(\rho_b, Q, J)$ ,  $W_{0f}(Q)$  обычно являются весьма громоздкими выражениями.

В зависимости от конкретных условий могут рассматриваться другие схемы сдвига. В таких случаях, по аналогии с изложенными выше соображениями, могут быть получены соответствующие конкретизированные аналоги нормативного неравенства (1).

*Методика составления уравнения связи между входными и выходными параметрами при расчете риска потери устойчивости гидротехнических сооружений.* В общем случае уравнение связи между входными (геометрические характеристики сооружения, характеристики активных сдвигающих сил, характеристики пассивных сил, сопротивляющихся сдвигу) и выходными параметрами (результаты расчета) составляется на основе анализа регламентированного нормами проектирования неравенства (1). В случае рассмотрения схемы плоского поступательного сдвига по горизонтальной поверхности скольже-

ния согласно (10) уравнение связи целесообразно записать в виде:

$$Y = [V(\rho_b, Q, J) - W_{0f}(Q)] \cdot tg\varphi + c \cdot A_0 - F_c(Q, V_w, J) \geq 0 \quad (11)$$

или

$$Y = \varphi(\rho_b, Q, V_w, J, tg\varphi, c) \geq 0, \quad (11^1)$$

где  $Y$  – запас устойчивости сооружения против сдвига, равный разности удерживающих и сдвигающих сил. Величина  $Y$ , по предложенному в работе [8] определению, представляет собой совокупный фактор. Входящие в правую часть этого уравнения величины были определены ранее. Именно такое уравнение связи и будет рассматриваться в дальнейшем.

Заметим, что неравенство (11) (или (11<sup>1</sup>)) определяет область допустимых значений совокупного фактора  $Y \geq 0$ , что соответствует недопущению предельного состояния сооружения по условию устойчивости против сдвига, когда  $Y < 0$ .

Аналогично могут быть получены уравнения связи между входными и выходными параметрами в других случаях, когда рассматриваются другие схемы сдвига сооружения в зависимости от конкретных условий его работы.

*Определение вероятностных характеристик случайных входных параметров для расчета риска потери устойчивости гидротехнических сооружений.* В общем случае все входные параметры уравнения связи (11) (или (11<sup>1</sup>)) являются случайными величинами. Однако геометрические размеры сооружения, входящие в функции  $F_c(Q, V_w, J)$ ,  $V(\rho_b, Q, J)$ ,  $W_{0f}(Q)$ , а также площадь подошвы сооружения  $A_0$  могут рассматриваться как не случайные (детерминированные) величины по следующим соображениям.

В соответствии с правилами приемки бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений допускаемые отклонения геометрических размеров незначительны по сравнению с самими геометрическими размерами. Поэтому, как показали предварительные расчеты, вариабельностью этих размеров сооружения можно пренебречь с достаточной степенью достоверности.

Остальные входные параметры уравнения связи (11) (или (11<sup>1</sup>)) являются случайными величинами. К числу этих параметров относятся: плотность материала сооружения  $\rho_b$ , максимальный расход воды в реке  $Q$ , максимальная скорость ветра  $V_w$ , интенсивность землетрясения  $J$ , коэффициент трения  $tg\varphi$  и удельное сцепление  $c$  по плоскости сдвига. Покажем, как определяются характеристики распределе-

ний этих случайных величин.

Характеристики распределения плотности материала сооружения  $\rho_b$  могут быть определены исходя из следующих соображений. Обычно при проведении бетонных работ в период строительства гидроузла строительной лабораторией выполняются контрольные замеры различных характеристик бетона, в частности, его плотности. На основе статистической обработки данных таких замеров устанавливаются характеристики распределения плотности бетона. Отметим, что обычно распределение плотности бетона является близким к нормальному с математическим ожиданием  $m_{\rho_b}$  и коэффициентом вариации  $V_{\rho_b}$ . Значения коэффициента вариации  $V_{\rho_b}$  обычно колеблется в пределах от 0,01 до 0,05. Предварительно значение коэффициента вариации  $V_{\rho_b}$  может быть принято равным  $V_{\rho_b} = 0,03$ . Зная значения  $m_{\rho_b}$  и  $V_{\rho_b}$ , нетрудно найти значения числовых характеристик функции распределения плотности бетона  $\rho_b$ : среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\rho_b} = m_{\rho_b} \cdot V_{\rho_b}$ , дисперсии  $D_{\rho_b} = \sigma_{\rho_b}^2$  и центральных моментов третьего  $\mu_{3\rho_b} = 0$  и четвертого  $\mu_{4\rho_b} = 3 \cdot \sigma_{\rho_b}^4$  порядков. Для железобетонных сооружений дополнительно учитывается вес арматуры в конструкциях.

Характеристики распределения максимальных расходов воды в реке  $Q$  всегда определяются при проектировании гидротехнических сооружений на основе статистической обработки данных гидрометрических наблюдений в створе гидроузла.

Характеристики распределения максимальных скоростей ветра  $V_w$  всегда определяются при проектировании гидротехнических сооружений на основе статистической обработки данных наблюдений на метеостанциях в районе расположения гидроузла.

Характеристики распределения интенсивности землетрясений  $J$  также определяются при проектировании гидротехнических сооружений на основе сейсмологических исследований.

Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство. Функции распределений случайных величин  $Q$ ,  $V_w$ ,  $J$  представляют собой зависимости ежегодных вероятностей от соответствующих квантилей. Для выполнения расчетов по оценке риска потери устойчивости сооружения необходимо знать функции распределений этих случайных

величин для расчетного срока службы сооружения, который в соответствии с рекомендациями [13] принимается равным 100 лет для сооружений I и II классов и 50 лет для сооружений III и IV классов. Ординаты функции распределения для расчетного срока службы сооружения  $T$  могут быть получены возведением в степень  $T$  ординат функции распределения, соответствующей ежегодным вероятностям [9]. В дальнейшем рассматриваются функции распределения для расчетного срока службы сооружения. Зная функции распределений случайных величин  $Q$ ,  $V_w$ ,  $J$  для расчетного срока службы сооружения, нетрудно найти значения числовых характеристик этих случайных величин: математические ожидания  $m_Q$ ,  $m_{V_w}$ ,  $m_J$ ; среднеквадратические отклонения  $\sigma_Q$ ,  $\sigma_{V_w}$ ,  $\sigma_J$ ; дисперсии  $D_Q$ ,  $D_{V_w}$ ,  $D_J$ ; центральные моменты третьего порядка  $\mu_{3Q}$ ,  $\mu_{3V_w}$ ,  $\mu_{3J}$ ; центральные моменты четвертого порядка  $\mu_{4Q}$ ,  $\mu_{4V_w}$ ,  $\mu_{4J}$ .

Характеристики распределений коэффициента трения  $tg\varphi$  и удельного сцепления  $c$  устанавливаются на основе статистической обработки данных лабораторных и полевых исследований, которые выполняются в процессе инженерно-геологических изысканий. Согласно действующим нормам проектирования оснований гидротехнических сооружений [12], для оценки изменчивости коэффициента трения и удельного сцепления рассматривается нормальный закон распределения для системы двух случайных величин  $tg\varphi$  и  $c$ . Этот закон характеризуется математическими ожиданиями  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$  и корреляционным моментом  $K_{tg\varphi c}$  [6]. Значения параметров  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ ,  $K_{tg\varphi c}$  определяются в результате статистической обработки данных лабораторных и полевых исследований. Несложно найти значения дисперсии  $D_{tg\varphi}$ ,  $D_c$ , центральных моментов третьего  $\mu_{3tg\varphi}$ ,  $\mu_{3c}$  и четвертого  $\mu_{4tg\varphi}$ ,  $\mu_{4c}$  порядка этих случайных величин.

В случае если в основании сооружения залегают песчаные грунты, сцепление обычно не учитывается ввиду его незначительности. В этом случае рассматривается нормальное распределение коэффициента трения  $tg\varphi$ . Параметры этого распределения  $m_{tg\varphi}$  и  $\sigma_{tg\varphi}$ , как и ранее, определяются в результате статистической обработки данных

лабораторных и полевых исследований. Могут быть найдены значения числовых характеристик коэффициента трения  $D_{tg\varphi}$ ,  $\mu_{3tg\varphi}$ ,  $\mu_{4tg\varphi}$ .

*Определение вероятности потери устойчивости гидротехнического сооружения.* Как указывалось выше, при оценке надежности и безопасности вероятности потери устойчивости гидротехнического сооружения против сдвига может быть найдена на основе решения вероятностной задачи в рамках параметрической теории надежности. Решение такой задачи может быть осуществлено методом статистической линеаризации [8], методом статистической параболизации [4], методом статистических испытаний (Монте-Карло) [3]. Ограничимся здесь рассмотрением метода статистической линеаризации.

Для решения поставленной задачи необходимы следующие исходные данные, методика отыскания которых изложена выше.

Уравнение связи вида (11).

- Значения числовых характеристик  $m_{\rho_b}$ ,  $\sigma_{\rho_b}$ ,  $D_{\rho_b}$ ,  $\mu_{3\rho_b}$ ,  $\mu_{4\rho_b}$  случайной величины  $\rho_b$ .
- Значения числовых характеристик  $m_Q$ ,  $\sigma_Q$ ,  $D_Q$ ,  $\mu_{3Q}$ ,  $\mu_{4Q}$  случайной величины  $Q$  для расчетного срока службы сооружения.
- Значения числовых характеристик  $m_{V_w}$ ,  $\sigma_{V_w}$ ,  $D_{V_w}$ ,  $\mu_{3V_w}$ ,  $\mu_{4V_w}$  случайной величины  $V_w$  для расчетного срока службы сооружения.
- Значения числовых характеристик  $m_J$ ,  $\sigma_J$ ,  $D_J$ ,  $\mu_{3J}$ ,  $\mu_{4J}$  случайной величины  $J$  для расчетного срока службы сооружения.
- Значения числовых характеристик  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ ,  $D_{tg\varphi}$ ,  $D_c$ ,  $\mu_{3tg\varphi}$ ,  $\mu_{3j}$ ,  $\mu_{4tg\varphi}$ ,  $\mu_{4c}$ ,  $K_{tg\varphi c}$  системы двух случайных величин  $tg\varphi$  и  $c$ .

Введем обозначения случайных величин:

$$X_1 = \rho_b, \quad X_2 = Q, \quad X_3 = V_w, \quad X_4 = J, \quad X_5 = tg\varphi, \quad X_6 = c. \quad (12)$$

В этом случае числовые характеристики этих случайных величин имеют соответствующие обозначения  $m_i$ ,  $D_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $\mu_{3i}$ ,  $\mu_{4i}$ ,  $K_{56}$ , а уравнение связи принимает вид:

$$Y = \varphi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \geq 0. \quad (13)$$

В соответствии с методом статистической линеаризации [8] для определения вероятности потери устойчивости гидротехнического сооружения против сдвига необходимо найти значения числовых ха-

рактических характеристик совокупного фактора  $Y$ . В рассматриваемом случае эти значения могут быть найдены по формулам аналогичным тем, которые приведены в [8]. В приведенных ниже формулах дополнительно учитывается корреляционная связь между случайными величинами  $X_5 = tg\varphi$ ,  $X_6 = c$ .

$$\begin{aligned}
 m_Y &= \varphi(m_{X_1}, m_{X_2}, \dots, m_{X_n}), \\
 D_Y &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 \cdot D_{X_i} + 2 \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right)_m \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \right)_m \cdot K_{56}, \\
 \sigma_Y &= \sqrt{D_Y}, \\
 \mu_{3Y} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^3 \cdot \mu_{3X_i}, \\
 \mu_{4Y} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^4 \cdot \mu_{4X_i} + 6 \cdot \sum_{i < j} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 \cdot D_{X_i} \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right)_m^2 \cdot D_{X_j} + \\
 &+ 4 \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right)_m \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \right)_m \cdot \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right)_m^2 \cdot D_{X_1} + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \right)_m^2 \cdot D_{X_2} \right] \cdot K_{56}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

В этих формулах  $\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m$  – первые производные от функции  $\varphi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$ . Индекс  $m$  обозначает, что в выражениях производных вместо аргумента  $X_i$  подставлено его математическое ожидание  $m_{X_i}$ . Отметим, что значения производных  $\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m$  могут определяться как в результате непосредственного дифференцирования функции  $\varphi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$ , так и численным методом (см., например [4]).

Имея значения числовых характеристик  $m_Y$ ,  $D_Y$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\mu_{3Y}$ ,  $\mu_{4Y}$  совокупного фактора  $Y$ , можно найти значение вероятности достижения предельного состояния  $P_{uT}$  в течение расчетного срока службы сооружения на основе разложения в ряд Грамма-Шарлье. Выражение

для определения значения  $P_{uT}$  при удержании трех членов ряда имеет вид

$$P_{uT} = 1 - \Phi(z) - \frac{1}{6} \frac{\mu_{3Y}}{\sigma_Y^3} \varphi_0^{(2)}(z) - \frac{1}{24} \left( \frac{\mu_{4Y}}{\sigma_Y^4} - 3 \right) \varphi_0^{(3)}(z), \quad (15)$$

где  $z = \frac{m_Y}{\sigma_Y}$ ,  $\Phi(z)$  – интеграл вероятностей;  $\varphi_0^{(2)}(z)$ ,  $\varphi_0^{(3)}(z)$  – производные от функции плотности нормального распределения  $\varphi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0,5z^2)$ .

Ежегодная вероятность потери устойчивости гидротехнического сооружения против сдвига  $P_u$  может быть найдена по формуле [9]

$$P_u = 1 - (1 - P_{uT})^{1/T}.$$

По изложенной выше методике выполнен расчет по определению вероятности потери устойчивости наименее надежной (по условию обеспечения устойчивости) 5-й секции машинного здания Киевской ГЭС, которое является сооружением II класса. Полученное в результате расчета значение ежегодной вероятности потери устойчивости этой секции против сдвига равно  $2,1 \cdot 10^{-6}$  1/год.

Для оценки надежности и безопасности здания Киевской ГЭС по условию устойчивости против сдвига необходимо сравнить полученное значение вероятности потери устойчивости рассматриваемой секции с допускаемым значением вероятности возникновения аварий на напорных гидротехнических сооружениях. В соответствии с рекомендациями норм проектирования гидротехнических сооружений [13] допускаемое значение вероятности возникновения аварий на сооружениях II класса равно  $5 \cdot 10^{-4}$  1/год. Как видно, полученные значения риска (вероятности) потери устойчивости 5-й секции здания Киевской ГЭС значительно ниже допускаемого значения. Таким образом, выполненная вероятностная оценка показала, что надежность и безопасность здания Киевской ГЭС по условию устойчивости против сдвига обеспечена.

1. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Т.1. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2003. – 554 с.

2. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Т.2. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2004. – 524 с.

3. Вайнберг А.И. Особенности применения метода статистических испытаний при оценке надежности и безопасности гидротехнических сооружений в рамках параметрической теории надежности // Наукowy вісник будівництва. Вип.47. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – С.269-277.

4. Вайнберг А.И. Применение метода статистической параболлизации для оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: Зб.наук. праць. Вип.30. – Рівне: НУВГП, 2005. – С.38-57.

5. Векслер Ф.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2002. – 590 с.

6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк. 1998. – 576 с.

7. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. / Мінбуд України. – К.: ДП “Укрархбудінформ”, 2006. – 84 с.

8. Ермолаев Н.Н., Михеев В.В. Надежность оснований сооружений. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.

9. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

10. СНиП 2.06.01-86. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 32 с.

11. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с.

12. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 48 с.

13. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения / Госстрой России. – М., 2004. – 24 с.

14. Сольский С.В., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2006. – 302 с.

*Получено 14.05.2008*

УДК 678.049.92 : 691.421

В.А.ПАШИНСЬКИЙ, д-р техн. наук, О.С.ХМАРА

*Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

## **МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МОРОЗОСТІЙКОСТІ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ**

Обґрунтовується доцільність проведення досліджень морозостійкості кераміки на малих зразках і визначено необхідну тривалість циклу їх заморожування-розморозжування. Отримано формули для оцінювання невизначеності непрямих вимірювань основних технічних характеристик будівельних матеріалів, які дозволили обґрунтувати вибір засобів вимірювань для проведення експериментальних досліджень морозостійкості.

Прогнозування довговічності стінових конструкцій за критерієм морозостійкості є актуальним завданням, при розв’язанні якого необ-