

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ



УДК 627.331/34.001.29

Ю.И. БИК, Е.В. ЕРМАНИЮК, А.А. БЕЛКИН, С.М. ЗЕРКАЛЬ

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены методы повышения эффективности использования портовых гидротехнических сооружений на основе выявления резервов их несущей способности, определения сроков выполнения ремонтных работ в периоды, соответствующие началу роста вероятности появления дефектов, продления срока службы без проведения работ по реконструкции, усилению конструкций при минимальных затратах. Предложения по решению вышеперечисленных задач основаны на исследовании напряженно-деформированного состояния портовых гидротехнических сооружений с целью обеспечения безотказной работы объектов при максимальном сокращении затрат времени и средств на их техническую эксплуатацию и ремонты в течение нормативного срока службы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: напряженно-деформированное состояние, вероятность появления дефектов, безотказная работа сооружения, несущая способность, реконструкция.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-728-8-67-78

Как показывает анализ эксплуатации причальных набережных, нормативные сроки службы причалов не соответствуют практическим, так как при проектировании сооружений не в полной мере учитывается интенсивность физического и морального износа конструкций. В связи с этим при обследовании причальных набережных возникает необходимость оценить надежность конструкции. Причалы, эксплуатационная надежность которых ниже нормативного значения, должны быть реконструированы.

Значительную роль в развитие теории надежности внес В.В. Болотин, разработавший метод оценки надежности сооружений и конструкций с учетом долговечности временного процесса [1]. Решению специальных задач теории надежности в портовом гидротехническом строительстве посвящены работы В.Д. Костюкова [2–5], Б.Ф. Горюнова [6], Ф.М. Шихиева [7]. Основные положения расчета причальных сооружений на надежность регламентируются руководством РД 31.35.10–86.

При оценке надежности сооружений методами теории вероятностей исходят из предположения, что конструкция может пребывать или в состоянии

отказа (V), или в состоянии безотказной работы (\bar{V}), для каждого состояния могут быть вычислены соответствующие вероятности. Так как событие \bar{V} противоположно событию V , то

$$P_f + P_s = 1.$$

Как правило, в строительстве в качестве меры надежности принимается вероятность отказа, а не безотказной работы. К определению вероятности отказа могут быть выделены два подхода.

Вероятность отказа можно оценивать на основе статистического анализа повреждений. Однако осуществление этого метода при определении надежности причальных сооружений проблематично, так как причальные стенки являются конструкциями с большой надежностью и их выход из строя – редкое событие, имеющее очень малую вероятность. Следовательно, для статистической оценки вероятности отказа потребовался бы столь большой объем выборки, который практически невозможно добиться, так как имеется только малое количество полностью схожих однотипных причальных набережных. Кроме того, даже если и можно будет сделать сколько-нибудь достоверные выводы на основе статистики повреждений, эти выводы появятся тогда, когда они, в лучшем случае, будут иметь исторический интерес. Таким образом, оценить по статистическим данным вероятность отказа едва ли возможно.

Тем не менее даже для индивидуальных сооружений, каковыми являются причальные набережные, на основе случайных величин можно определить характеристики, носящие массовый характер и оцениваемые статистически. К этим характеристикам относятся свойства строительных материалов, производимых и испытываемых как массовые продукты, повторяющиеся внешние нагрузки, геометрические размеры, физико-механические характеристики грунтов, элементы стыков, соединений. Все эти параметры в теории надежности конструкций можно рассматривать как базисные переменные, определенные статистическими исследованиями. Математически они представляются как случайные величины и обозначаются X_1, X_2, \dots, X_m . На основе введенных базисных переменных можно теоретически определить вероятность наступления состояний отказа. Необходимо учитывать, что определяемая таким образом надежность причальных сооружений, естественно, не учитывает возможный негативный вклад за счет ошибочных действий человека.

Важен и другой аспект. С помощью статистических исследований работы таких долговечных сооружений, как причальные стенки можно достаточно надежно оценить среднюю часть кривой плотности распределения, соответственно среднее и среднеквадратическое отклонения, но практически невозможно обосновать поведение в зоне малых плотностей распределения. Поэтому в дальнейшем для обоснования надежности причальных набережных будем использовать понятие «оперативной вероятности отказа», которая может рассматриваться только как сравнительная величина для качественной оценки прочности и надежности конструкций.

Реальные строительные конструкции выполнены из материалов, свойства которых зависят от времени и воздействия различных факторов ок-

ружающей среды. Все материалы подвержены процессам старения, усталости, упрочнения, коррозии, ползучести и другим явлениям, которые изменяют несущую способность чаще всего в сторону уменьшения и существенно влияют на вероятность отказа. Совершенно очевидно, что вероятность отказа с течением времени монотонно возрастает. Если предположить, что сооружение в начальный момент своего существования ($t = 0$) находится в состоянии безотказной работы, то имеют место два граничных значения:

$$P_f(0) = 0 \text{ и } \lim_{t \rightarrow \infty} P_f(t) = 1.$$

Характеристикой надежности сооружения во времени служит плотность отказов $h_t(t)$, которая позволяет определить вероятность отказа в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ для сооружения, которое уже достигло возраста t . Величина $h_t(t)\Delta t$ вычисляется как вероятность того, что безотказно работающее до момента t сооружение откажет в последующий интервал времени $(t, t + \Delta t)$

$$h_t \Delta t = P(T_L \leq t + \Delta t | T_L > t),$$

где T_L – срок существования сооружения.

Плотность отказа, представленная графически, почти всегда имеет вид, показанный на рис. 1. В начале срока существования (фаза I) достаточно часто наблюдаются случаи отказа каких-либо элементов в связи с низким качеством работ и материалов. Затем следует фаза II с относительно постоянной плотностью отказов, которые, как правило, обусловлены перегрузками. В связи с процессами усталости, старения или коррозии к концу срока службы сооружения (фаза III) снова возрастает плотность отказов. При оценке вероятности отказа сооружения в целом необходимо иметь в виду, что отказ может последовать не только за счет единственного пересечения критического уровня. При часто повторяющихся нагрузках возникающее явление усталости материала может привести к внезапному усталостному разрушению при относительно невысоком уровне нагрузки.

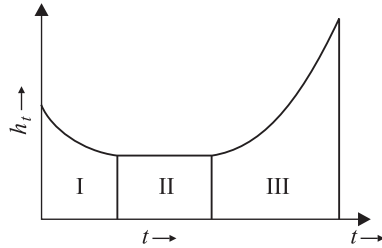


Рис. 1. График плотности отказов

Таким образом, одной из основных задач теории надежности является оценка показателей надежности и долговечности системы в целом по известным законам распределения надежности и долговечности ее элементов. Способ вычисления показателей надежности и долговечности существенно зависит от того, как взаимодействуют между собой элементы конструкции с точки зрения обеспечения безотказности системы.

Для оценки надежности работы причальных набережных необходимо воспользоваться зависимостью, согласно которой для определения вероятности отказа сооружения в целом необходимо предварительно найти показатели надежности каждого ее элемента. Вероятность безотказной работы причальных набережных определяется по формуле расчета, справедливой

для последовательного соединения элементов системы, при котором отказ хотя бы одного из них приводит к отказу всей системы в целом

$$P_s = \prod_{k=1}^m P_{sk}.$$

Здесь m – количество элементов с вероятностью безотказной работы $P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sm}$. При этом поведение элементов конструкции рассматривается как случайный процесс, а предельное состояние – в виде случайного выброса из области допустимых состояний.

Следовательно, для оценки надежности элемента важен вопрос о том, достигает ли случайный процесс некоторого определенного допустимого уровня или превосходит его.

В случае, когда случайные величины имеют нормальное распределение, а уравнение предельного состояния линейно относительно X_i , надежность сооружения может быть оценена приближенным способом. При нормальном распределении случайных величин плотность распределения выражается в виде

$$f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) = \left[\frac{1}{(2\pi)^{m/2}} \prod_{i=1}^m \sigma_{x_i} \right] \exp \left\{ -0,5 \sum_{i=1}^m [(x_i - m_{x_i}) / \sigma_{x_i}]^2 \right\}.$$

Если уравнение предельного состояния линейно, то его можно записать в виде

$$g(x) = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i x_i,$$

где c_i – постоянные, определяемые структурой статической системы.

Дальнейшие выкладки существенно упрощаются после проведения замены переменных

$$y_i = x_i - \frac{m_{x_i}}{\sigma_{x_i}}.$$

Новая переменная имеет нулевое среднее и единичное среднеквадратическое отклонение. Тогда плотность распределения новой величины

$$f_y(y_1, y_2, \dots, y_m) = \left[\frac{1}{(2\pi)^{0,5m}} \right] \left(-0,5 \sum_{i=1}^m y_i^2 \right).$$

Функцию предельного состояния в y -пространстве можно записать в виде

$$h(y) = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i m_{x_i} + \sum_{i=1}^m c_i \sigma_{x_i} y_i = 0.$$

Уравнение предельного состояния в y -пространстве также линейно, преобразуется в форму Гессе

$$h(y) = \sum_{i=1}^m \alpha_i y + \beta = 0,$$

где α_i – коэффициент чувствительности

$$\alpha_i = \frac{c_i \sigma_{xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (c_i \sigma_{xi})^2}};$$

β – индекс безопасности

$$\beta = c_0 + \frac{\sum_{i=1}^m c_i m_{xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (c_i \sigma_{xi})^2}}.$$

Вероятность отказа по зависимости

$$P_f = \int \dots \int_V \prod_{i=1}^m f_{xi}(x_i) dx_i.$$

В приведенных выше рассуждениях предполагается, что функции и плотности распределения всех случайных величин x_i известны. Однако для установления с достаточной достоверностью типа распределения требуется большой объем выборок, в особенности для «периферийных» зон распределений. Как уже указывалось, при изучении причальных набережных соответствующих экспериментальных точек, как правило, недостаточно. В то же время тип распределения, определяемый, прежде всего, по периферийным зонам, оказывает решающее влияние на вероятность отказа. Обойти эти сложности позволяет метод моментов, согласно которому определяется не вероятность отказа, а индекс безопасности, независящий от типа распределения [8–10].

Индекс безопасности вычисляется по математическому ожиданию m_{xi} и среднеквадратическому отклонению σ_{xi} , которые находятся на основе статистической информации о сооружении.

В методе моментов определяются моменты запаса прочности

$$z = g(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

по первым двум моментам заданных случайных величин x_i .

Если запас прочности является линейной функцией базисных переменных

$$z = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i x_i,$$

то моменты функций случайных величин согласно теории вероятностей могут быть определены по заданным математическому ожиданию $E[x_i] = m_{xi}$, дисперсии $\text{Var}[x_i] = \sigma_{xi}^2$ и ковариации $\text{Cov}[x_i, x_j] = \sigma_{xi} \sigma_{xj} \rho_{xixj}$

$$\left. \begin{aligned} E[z] &= m_z = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_m) f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) \prod_i dx_i; \\ \text{Var}[z] &= \sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \{g(x_1, x_2, \dots, x_m) - \\ &- E[g(x_1, x_2, \dots, x_m)]\}^2 f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) \prod_i dx_i. \end{aligned} \right\}$$

Учитывая, что

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) \prod_i dx_i &= 1; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_j f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) \prod_i dx_i &= E[x_j] = m_{xj}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (x_j - m_{xj}) f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) \prod_i dx_i &= 0; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (x_j - m_{xj})^2 f_x(x_1, \dots, x_m) \prod_i dx_i &= \text{Var}[x_j] = \sigma_{xj}^2; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (x_j - m_{xj})(x_k - m_{xk}) f_x(x_1, \dots, x_m) \prod_i dx_i &= \text{Cov}[x_j, x_k], \end{aligned} \right\}$$

получим

$$\left. \begin{aligned} E[z] &= m_z = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i m_{xi}; \\ \text{Var}[z] &= \sigma_z^2 = \sum_{i=1}^m c_i^2 \sigma_{xi}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_i c_j \text{Cov}[x_i, x_j], \end{aligned} \right\}$$

или в матричной форме

$$\left. \begin{aligned} E[z] &= m_z = c_0 + c^T E[x], \\ \text{Var}[z] &= \sigma_z^2 = c^T C_x c, \end{aligned} \right\},$$

где

$$C_x = \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{x_m}^2 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_m \end{pmatrix}; \quad E[x] = \begin{pmatrix} m_{x_1} \\ \vdots \\ m_{x_m} \end{pmatrix}.$$

Индекс безопасности определяется как отношение математического ожидания запаса прочности к его среднеквадратическому отклонению

$$\beta_c = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{E[z]}{\sqrt{\text{Var}[z]}}.$$

Если уравнение предельного состояния нелинейно, то его можно линеаризировать с помощью разложения Тейлора

$$g(x_1, \dots, x_m) = g(m_{x_1}, \dots, m_{x_m}) + \sum_{i=1}^m (x_i - m_{x_i}) \partial g / \partial x_i |_{x=m}.$$

Тогда вышеприведенные выражения для математического ожидания и среднеквадратического отклонения примут вид:

$$\left. \begin{aligned} E[z] &= g(m_{x_1}, \dots, m_{x_m}); \\ \text{Var}[z] &= \sum_{i=1}^m (\partial g / \partial x_i)^2 \text{Var}[x_i] + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^m \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} \right) \text{Cov}[x_i, x_j]. \end{aligned} \right\}$$

Отметим, что все входящие в формулу производные вычисляются в точке математического ожидания.

Введем вектор производных уравнения предельного состояния в точке математического ожидания

$$G(m) = \begin{pmatrix} \partial g / \partial x_1 |_{x=m} \\ \vdots \\ \partial g / \partial x_m |_{x=m} \end{pmatrix}, \quad \text{где } m = E[x].$$

Тогда индекс безопасности, называемый также индексом Корнелла, будет иметь вид

$$\beta = \frac{E[z]}{\sqrt{\text{Var}[z]}} = \frac{g(m)}{\sqrt{G^T(m) C_X G(m)}}.$$

Вышеописанный подход к определению надежности сооружения по индексу безопасности Корнелла достаточно прост и в то же время дает приемлемые по точности результаты. Он может быть рекомендован для оперативной оценки состояния причальных набережных. В случае необходимости более точных расчетов целесообразно использовать метод семиинвариантов, успешно апробированный В.Д. Костюковым [2, 3].

Учитывая, что около половины общей длины причального фронта составляют больверки, выполненные из металлического шпунта, для которых, по результатам обследования авторов, наиболее вероятными видами отказов являются разрушения лицевой стенки и разрыв анкерных тяг, проиллюстрируем рекомендуемый автором метод оценки надежности причальных набережных на этих двух случаях.

Прочность лицевой стенки больверка определяется из условия

$$W\sigma_T - M \geq 0,$$

где W – момент сопротивления лицевой стенки;

σ_T – предел текучести стали лицевой стенки;

M – момент в лицевой стенке.

Будем считать случайными некоррелированными величинами W и σ_T . Разбросом момента в лицевой стенке пренебрегаем. Параметры распределения случайных величин могут быть приняты на основании исследований, проведенных авторами на причальных набережных различных сибирских рек (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Параметры распределения для лицевой стенки

Случайная величина	$m_{x_i} = E[x_i]$	$\sigma_{x_i} = (\text{Var}[x_i])^{1/2}$
$x_1 = W, \text{ м}^3$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-4}$
$x_2 = \sigma_T, \text{ Па}$	$2,81 \cdot 10^8$	$2,70 \cdot 10^7$

Уравнение предельного состояния лицевой стенки имеет вид

$$g(x) = W\sigma_T - M = x_1x_2 - M = 0.$$

Из-за того, что случаен не только момент сопротивления в стенке, но и предел текучести материала, уравнение нелинейно. Проведем его линеаризацию по методу Тейлора

$$g(m) = m_W m_{\sigma_T} - M.$$

Примем изгибающий момент в лицевой стенке $M = 500$ кН/м, тогда

$$g(m) = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,81 \cdot 10^8 - 50000 = 3,15 \cdot 10^5;$$

$$C(x) = \begin{pmatrix} 9 \cdot 10^{-8} & 0 \\ 0 & 7,29 \cdot 10^{14} \end{pmatrix};$$

$$\partial g / \partial W = \sigma_T; \quad \partial g / \partial W|_{x=m} = m_{\sigma_T} = 2,81 \cdot 10^8;$$

$$\partial g / \partial \sigma_T = W; \quad \partial g / \partial \sigma_T|_{x=m} = m_W = 2,9 \cdot 10^{-3};$$

$$G(m) = \begin{pmatrix} 2,81 \cdot 10^8 \\ 2,90 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix};$$

$$\text{Var}[z] = G^T(m)C_X G(m) = \left(\frac{\partial g}{\partial W} \right)^2 \sigma_W^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_T} \right)^2 \sigma_{\sigma_T}^2 =$$

$$= (2,81 \cdot 10^8)^2 (3 \cdot 10^{-4})^2 + (2,9 \cdot 10^{-3})^2 (2,7 \cdot 10^7)^2 = 132,37 \cdot 10^8.$$

В результате расчетов получаем индекс безопасности

$$\beta_C = \frac{g(m)}{\sqrt{\text{Var}[z]}} = \frac{3,15 \cdot 10^5}{\sqrt{132,37 \cdot 10^8}} = 2,74.$$

Для определения надежности лицевой стенки больверка, соответствующей найденному индексу безопасности, составлена табл. 2.

Из табл. 2 видно, что индексу безопасности $\beta_C = 2,74$ соответствует вероятность безотказной работы $P_S = 0,992$. Результат прекрасно согласуется с данными В.Д. Костюкова, хотя и получен быстро и легко выполнимым приближенным методом расчета.

Достаточно простые математические выкладки, используемые в прилагаемом методе, можно сократить, если воспользоваться составленной авторами статьи номограммой (рис. 2), позволяющей определить величину $(\text{Var}[z])^{1/2}$, т.е. знаменатель в выражении для индекса безопасности β . На номограмме σ_T и m_{σ_T} даны в мегапаскалях, σ_W и m_W в кубических метрах.

Таблица 2. Соотношение между индексом безопасности и вероятностью безотказной работы

β	P_S	β	P_S
0	0,500	3	0,998
1	0,841	4	0,999
2	0,977	5	1,000

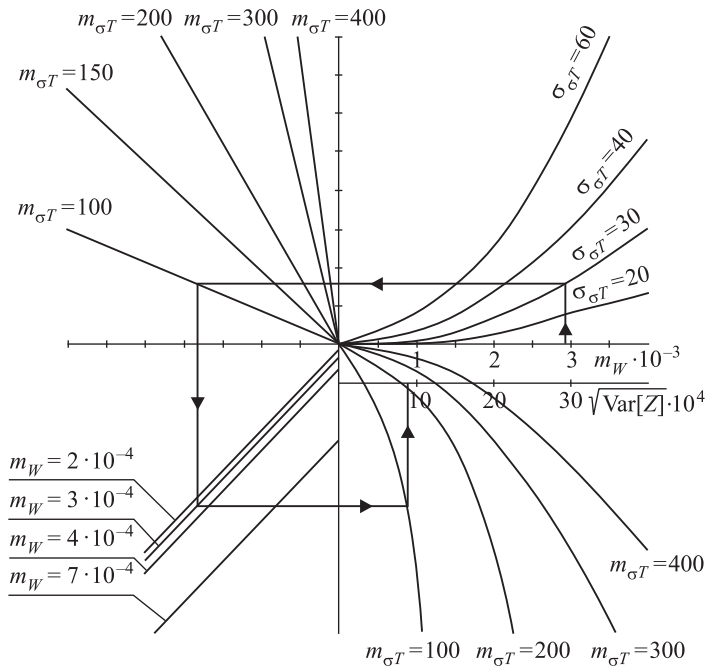


Рис. 2. Номограмма к определению $\sqrt{\text{Var}[z]}$ для лицевой стенки больверка

Определим вероятность безотказной работы анкерных тяг. Прочность сечения стальных анкерных тяг вычисляется из условия

$$\pi d^2 \sigma_T - 6 Rl \geq 0,$$

где d – диаметр тяги;

R – анкерное усилие на 1 пог. м сооружения;

l – расстояние между анкерами.

В результате коррозии может существенно измениться диаметр анкерной тяги, поэтому примем в качестве случайных некоррелированных величин d и σ_T . Разбросом анкерных усилий и расстояний между анкерами пренебрегаем. Параметры распределения случайных величин представлены в табл. 3.

Уравнение предельного состояния анкерных тяг

$$g(x) = \pi d^2 \sigma_T - 6 Rl = 0.$$

Проведем линеаризацию уравнения по разложению Тейлора

$$g(m) = \pi m_d^2 m_{\sigma_T} - 6 Rl = 0.$$

Принимаем анкерное усилие $R = 481,5$ кН, а расстояние между анкерами $l = 1,6$ м, тогда

$$g(m) = \pi(8 \cdot 10^{-2})^2 2,81 \cdot 10^8 - 6 \cdot 481,5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 = 10,25 \cdot 10^5;$$

Т а б л и ц а 3. Параметры распределения для анкерных тяг

Случайная величина	$m_{x_i} = E[x_i]$	$\sigma_{x_i} = (\text{Var}[x_i])^{1/2}$
$x_1 = d, \text{ м}^3$	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$
$x_2 = \sigma_T, \text{ Па}$	$2,81 \cdot 10^8$	$2,70 \cdot 10^7$

$$C_X = \begin{pmatrix} 36 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 7,29 \cdot 10^{14} \end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial g}{\partial d} = 2\pi\sigma_T d; \quad \partial g / \partial d|_{x=m} = 2\pi m_{\sigma T} m_d = 141,17 \cdot 10^6;$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_T} = \pi d^2; \quad \partial g / \partial \sigma_T|_{x=m} = \pi m_d^2 = 200,96 \cdot 10^{-4};$$

$$G(m) = \begin{pmatrix} 132,3 \cdot 10^6 \\ 176,6 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[z] &= G^T(m)C_X G(m) = \left(\frac{\partial g}{\partial W}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_T}\right)^2 \sigma_{\sigma T}^2 = \\ &= (141,17 \cdot 10^6)^2 (6 \cdot 10^{-3})^2 + (200,96 \cdot 10^{-4})^2 (2,7 \cdot 10^7)^2 = 10,11 \cdot 10^{11}. \end{aligned}$$

В результате расчетов получаем индекс безопасности

$$\beta_C = \frac{g(m)}{\sqrt{\text{Var}[z]}} = \frac{1025 \cdot 10^5}{\sqrt{10,11 \cdot 10^{11}}} = 1,02.$$

В соответствии с табл. 3 определяем вероятность безотказной работы анкерных тяг $P_S = 0,844$.

Для облегчения расчетов индекса безопасности работы анкерных тяг авторами составлена номограмма для определения $(\text{Var}[z])^{1/2}$ (рис. 3). На номограмме $m_{\sigma T}$ и $\sigma_{\sigma T}$ даны в мегапаскалях, m_d и σ_d в метрах.

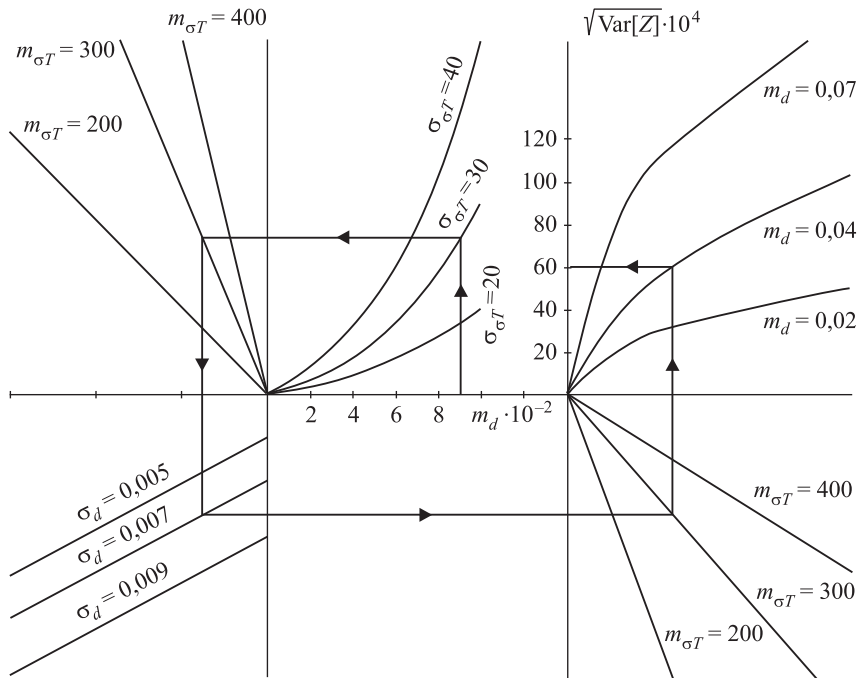


Рис. 3. Номограмма к определению $\sqrt{\text{Var}[z]}$ для анкерных тяг

Заключение. Предложенная авторами методика определения надежности элементов конструкций по индексу безопасности может быть использована и для оценки вероятности отказа различных конструктивных элементов причальных набережных и сооружения в целом. Авторы рекомендуют при оперативной оценке надежности причальных сооружений пользоваться предложенными в работе номограммами, позволяющими с достаточной точностью оценивать состояние исследуемых элементов конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин В.В. Долговечность конструкций при квазистационарных случайных режимах напряжений // Инженерный сборник АН СССР. 1960. Т. 29. С. 30–36.
2. Костюков В.Д. Вероятностные методы расчета запасов прочности и долговечности портовых гидротехнических сооружений. М.: Транспорт, 1979. 111 с.
3. Костюков В.Д. Надежность морских причалов и их реконструкция. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
4. Костюков В.Д. Оценка надежности причальных сооружений. М.: Транспорт, 1984. 23 с.
5. Костюков В.Д. Вероятностные методы в расчетах и исследованиях конструкций морских гидротехнических сооружений. М.: Транспорт, 1970. 45 с.
6. Горюнов Б.Ф. Техническая эксплуатация портовых сооружений. М.: Транспорт, 1974. 352 с.
7. Шихиев Ф.М. Новые конструкции глубоководных причальных сооружений и особенности их расчета. М.: Рекламинформбюро ММФ, 1976. 32 с.
8. Бик Ю.И., Щербинина М.А. Оценка надежности гидротехнических сооружений: Учеб. для вузов. Новосибирск: НГАВТ, 2005. 122 с.
9. Бик Ю.И., Дегтярева В.В. Индекс безопасности как мера надежности строительных конструкций // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 3–4. С. 57–59.
10. Бик Ю.И. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений. Новосибирск: СГУВТ, 2018. 105 с.

Бик Юрий Игоревич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: yibik@mail.ru

Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск

Ерманюк Евгений Валерьевич, д-р физ.-мат. наук

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Белкин Александр Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Зеркаль Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 08.07.2019

Bic Yuriy Igorevich, DSc, Professor; E-mail: yibik@mail.ru

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Ermanyuk Evgeniy Valerievich, DSc

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Belkin Aleksandr Anatolievich, DSc, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Zerkal Sergey Mikhaylovich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CALCULATING OF TENSE-DEFORMED STATE OF OPERATED HYDRAULIC FACILITIES

Methods to improve the efficiency of existing port hydraulic facilities on the basis of identification of their carrier reserves are considered; Determining the timing of repair work during periods consistent with the beginning of the increase in the probability of defects; Extending the life of non-reconstruction work; strengthening structures at minimal cost. Proposals for solving the above problems are based on the study of the tense-deformed state of port hydraulic facilities. The aim of the work is to ensure the smooth operation of the facilities while reducing the time and money spent on their technical operation and repairs during the regulatory life.

Key words: tense-deformed condition, probability of defects, failure of construction, carrying ability, reconstruction.

REFERENCES

1. Bolotin V.V. Dolgovechnost' konstruktsey pri kvazistatsionarnykh sluchaynykh rezhimakh napryazheniy [Longevity of structures under quasi-stationary random voltage modes]. Inzhenernyy sbornik AN SSSR [Engineering collection of the AS USSR]. 1960. Vol. 29. Pp. 30–36. (in Russian)
2. Kostyukov V.D. Veroyatnostnye metody rascheta zapasov prochnosti i dolgovechnosti portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Probability methods of calculating the safety and durability of port hydraulic facilities]. Moscow, 1979. 111 p. (in Russian)
3. Kostyukov V.D. Nadezhnost' morskikh prichalov i ikh rekonstruktsiya [Reliability of sea berths and their reconstruction]. Moscow, 1987. 223 p. (in Russian)
4. Kostyukov V.D. Otsenka nadezhnosti prichal'nykh sooruzheniy [Assessment of the reliability of mooring facilities]. Moscow, 1984. 23 p. (in Russian)
5. Kostyukov V.D. Veroyatnostnye metody v raschetakh i issledovaniyakh konstruktsey morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Probable methods in calculations and studies of the constructions of marine hydraulic structures]. Moscow, 1970. 45 p. (in Russian)
6. Goryunov B.F. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya portovykh sooruzheniy [Technical operation of port facilities]. Moscow, 1974. 352 p. (in Russian)
7. Shihyev F.M. Novye konstruktsey glubokovodnykh prichal'nykh sooruzheniy i osobennosti ikh rascheta [New constructions of deep-sea mooring facilities and features of their calculation]. Moscow, 1976. 32 p. (in Russian)
8. Bik Yu.I., Scherbinina M.A. Otsenka nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Assessment of the reliability of hydraulic facilities]. Novosibirsk, 2005. 122 p. (in Russian)
9. Bik Yu.I., Degtyareva V.V. Indeks bezopasnosti kak mera nadezhnosti stroitel'nykh konstruktsey [Safety Index as a measure of the reliability of construction structures]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East]. 2016. No. 3-4. Pp. 57–59. (in Russian)
10. Bik Yu.I. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Experimental studies of the tense-deformed state of hydraulic facilities]. Novosibirsk, 2018. 105 p. (in Russian)