

*А.И. Вайнберг, зам. техн. директора, д.т.н., профессор
К.О. Рыжиков, руководитель группы ПАО «Укргідропроєкт», г. Харьков*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОНАПОРНЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВОДОВОДОВ

В рамках системной теории надежности предложена методика вероятностной оценки прочности гидротехнических высоконапорных сталежелезобетонных водоводов с двухрядным армированием. Задача решается методом статистических испытаний (Монте-Карло). Приведен пример расчета вероятности разрушения сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: *вероятность, системная теория надежности, метод статистических испытаний (Монте-Карло), функция распределения случайной величины, сталежелезобетонный водовод.*

*О.І. Вайнберг, заст. техн. директора, д.т.н., професор
К.О. Рижиков, керівник Групи ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків*

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ ВИСОКОНАПІРНИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВОДОВОДІВ

В рамках системної теорії надійності запропонована методика ймовірнісної оцінки міцності гідротехнічних високонапірних сталезалізобетонних водоводів з дворядним армуванням. Завдання вирішується методом статистичних випробувань (Монте-Карло). Наведено приклад розрахунку ймовірності руйнування сталезалізобетонного водоводу Саяно-Шушенської ГЕС.

Ключові слова: *ймовірність, системна теорія надійності, метод статистичних випробувань (Монте-Карло), функція розподілу випадкової величини, сталезалізобетонний водовід.*

*A.I. Weinberg, deputy tech. director, ScD, Professor
K.O. Ryzhikov, team leader PJSC «Ukrhydroproject», Kharkiv city*

CALCULATION PROBABILITY OF FAILURE OF HIGH-PRESSURE STEEL-LINER REINFORCED CONCRETE PENSTOCKS

The methodology of probabilistic assessment of high-pressure steel-liner reinforced concrete penstocks with double reinforcement as a part of the system reliability theory is proposed. The problem solved by the method of statistical tests (Monte Carlo). The example of calculating of failure probability of the Sayano-Shushenskaya HPP steel-liner reinforced concrete penstock is presented.

Keywords: *probability, system reliability theory, Monte Carlo methods, the distribution function of a random variable, the steel-liner reinforced concrete penstock.*

Введение. В настоящее время для оценки надежности и безопасности высоконапорных сталежелезобетонных водоводов ГЭС и ГАЭС используется традиционный, детерминистический по форме, подход, основанный на полувероятностном методе предельных состояний. Регламентированный нормами проектирования метод предельных состояний, несмотря на его неоспоримые достоинства, в ряде случаев не позволяет получить объективную оценку надежности и безопасности сооружений. Это связано с тем, что принятые в нормах проектирования значения нормативных коэффициентов не всегда являются объективными и носят условный характер.

Более объективная оценка надежности и безопасности высоконапорных сталежелезобетонных водоводов может быть получена вероятностными методами современной теории надежности сложных технических систем. Применительно к различным строительным конструкциям и сооружениям такой подход регламентируется европейскими нормами проектирования [1-3]. В Украине и в России в настоящее время действуют нормы проектирования гидротехнических сооружений [4, 5], в которых наряду с расчетами методом предельных состояний рекомендуется выполнять расчеты по оценке вероятности (риска) возникновения аварий на этих сооружениях. Получаемые при этом расчетные значения вероятностей аварий на сооружениях не должны превышать регламентированных нормами проектирования допускаемых значений.

Отметим, что в настоящее время в нормах проектирования и технической литературе отсутствует апробированные методики вероятностной оценки надежности и безопасности многих типов гидротехнических сооружений и, в частности, высоконапорных сталежелезобетонных водоводов ГЭС и ГАЭС.

Обзор последних источников исследований и публикаций. В последние годы был разработан ряд проектных нормативных документов, в которых предложены подходы к решению вероятностных задач по оценке надежности и безопасности некоторых конструкций и сооружений [6-8]. В настоящее время имеется обширная литература посвященная вопросам вероятностной оценки надежности и безопасности различных типов конструкций гидротехнических сооружений [9-12]. Однако в нормативных документах и в технической литературе до сих пор отсутствуют указания по вероятностной оценке надежности и безопасности сталежелезобетонных водоводов. В работе [13] предложена методика решения вероятностных задач теории надежности применительно к стальным трубопроводам. Ввиду существенных конструктивных отличий и отличий, связанных с условиями работы, эта методика не может быть использована для вероятностной оценки надежности сталежелезобетонных водоводов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Анализ конструкций и условий работы высоконапорных сталежелезобетонных водоводов ГЭС и ГАЭС показал, что прочность этих конструкций зависит от целого ряда случайных величин, таких как: внутреннее давление воды, зависящее от случайного уровня воды в верхнем бьефе, температур воздуха и воды, деформационных и прочностных характеристик бетона и стальных элементов. Использование вероятностных методов для оценки надежности и безопасности сталежелезобетонных водоводов является новой малоисследованной задачей.

Поэтому **целью** настоящей работы является разработка методики расчетов, позволяющих выполнить вероятностную оценку прочности высоконапорных сталежелезобетонных водоводов ГЭС и ГАЭС.

Основной материал и результаты исследований. Рассматривается высоконапорный сталежелезобетонный водовод с наиболее часто применяемым двухрядным армированием. Поперечное сечение такого водовода включает

внутреннюю стальную оболочку и железобетонное кольцо, в пределах которого размещается несущая кольцевая внутренняя и наружная арматура. Кроме того в пределах железобетонного кольца размещается продольная арматура, которая обычно является распределительной. На рис. 1 для примера показано поперечное сечение сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС. Отметка оси рассматриваемого сечения составляет +323,600 м.

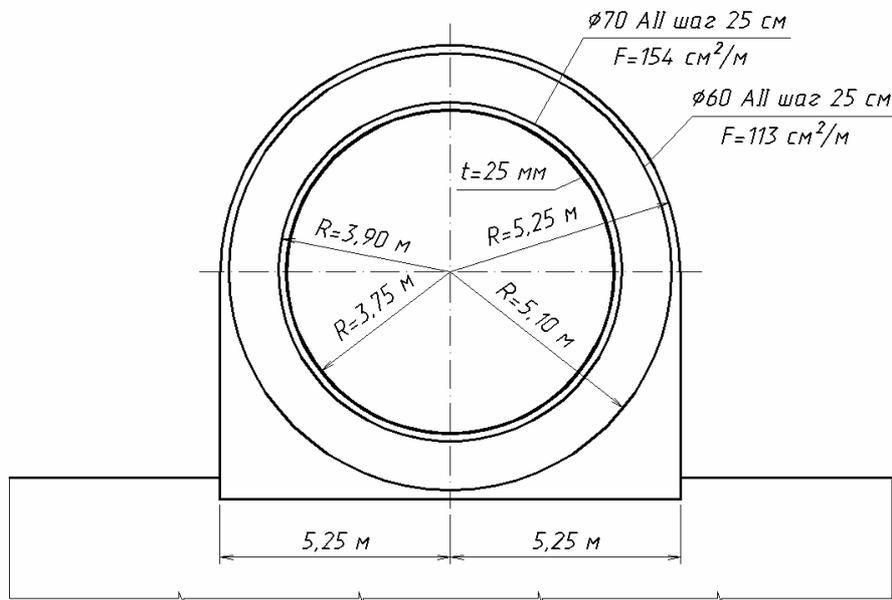


Рис. 1. Поперечное сечение сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС

Большие кольцевые и меньшие продольные напряжения в стальной оболочке и кольцевые усилия в несущей арматуре возникают под действием внутреннего давления воды (статического, пульсационного, давления гидравлического удара), а также в значительной степени вследствие сезонных колебаний температуры наружного воздуха и воды в водоводе.

Считается, что разрушение сталежелезобетонного водовода может произойти, если напряжения в одном или одновременно в нескольких несущих металлических элементах (стальная оболочка, внутренняя кольцевая арматура, наружная кольцевая арматура), превысят предел прочности материала этих элементов при растяжении. Поэтому задачу по определению вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода следует решать в рамках системной теории надежности. Сам водовод целесообразно рассматривать как систему с последовательным соединением элементов – стальная оболочка, внутренняя кольцевая арматура, наружная кольцевая арматура.

В результате решения такой задачи может быть найдено значение вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода, которое учитывает возможность разрушения стальной оболочки и/или внутренней кольцевой арматуры и/или наружной кольцевой арматуры.

При решении задачи в рамках системной теории надежности обычно рассматриваются следующие этапы.

1. Составление уравнений связи между входными (характеристики нагрузок и воздействий, свойств материалов и т.п.) и выходными (результаты расчета) параметрами для каждого элемента системы (стальная оболочка, внутренняя и наружная кольцевая арматура).

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

3. Определение на основе имеющейся информации вероятностных характеристик входных параметров.

4. Определение вероятности (риска) разрушения водовода на основе решения соответствующей задачи статистической динамики.

Для определения вероятности (риска) разрушения водовода (4-й этап) целесообразно воспользоваться методом статистических испытаний (Монте-Карло), который позволяет решать практически любые задачи в рамках теорий надежности.

Составление уравнений связи.

В работе [14] в рамках решения плоской задачи получены основные уравнения, позволяющие определять напряжения в стальной оболочке и арматуре, возникающие под действием внутреннего давления воды в водоводе и вследствие температурных воздействий в рамках детерминистического подхода. При составлении этих уравнений, которые целесообразно использовать для составления уравнений связи, учитывались возникающие радиальные трещины в железобетонной оболочке.

Запишем систему уравнений связи из условий прочности каждого несущего элемента для радиального сечения водовода с трещиной.

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{t_r} \cdot \left[(p + p_T) \cdot r_{ss} - \frac{2}{3} \cdot \sigma_b \cdot t_b \right] \leq R_{ss}, \quad (1)$$

$$\sigma_{si} = \left[\frac{E_s}{E_{ss}} \cdot \frac{r_{ss}}{r_{si}} \cdot (\sigma_{ss} + \alpha_{ss} \cdot E_{ss} \cdot \Delta T_{ss}) - \alpha_s \cdot E_s \cdot \Delta T_{si} \right] \cdot A_1 \leq R_s, \quad (2)$$

$$\sigma_{se} = \left[\frac{E_s}{E_{ss}} \cdot \frac{r_{ss}}{r_{se}} \cdot (\sigma_{ss} + \alpha_{ss} \cdot E_{ss} \cdot \Delta T_{ss}) - \alpha_s \cdot E_s \cdot \Delta T_{se} \right] \cdot A_1 \leq R_s. \quad (3)$$

В этих уравнениях y_{ss} , y_{si} , y_{se} – кольцевые напряжения в стальной оболочке, во внутренней и наружной кольцевой арматуре; y_b – кольцевые напряжения в бетоне для сечения между трещинами; R_{ss} , R_{si} , R_{se} – значения сопротивления растяжению стали оболочки, стали внутренней и наружной кольцевой арматуры; $p = p_{si} + p_{hd}$ – внутреннее давление воды равное сумме гидростатического и гидродинамического давления от гидравлического удара и пульсации; r_{ss} , r_{si} , r_{se} – радиусы стальной оболочки, внутренней и наружной кольцевой арматуры; A_{si} , A_{se} – площади поперечного сечения внутренней и наружной кольцевой арматуры; α_s , α_{ss} – коэффициенты линейного температурного расширения стали арматуры и оболочки; E_s , E_{ss} – модули упругости стали арматуры и оболочки; A_1 – параметр, равный

$$A_1 = \frac{p \cdot r_{ss} - \sigma_{ss} \cdot t}{p \cdot r_{ss} - \sigma_{ss} \cdot t_{ss} - \frac{2}{3} \cdot \sigma_b \cdot t_b}; \quad (4)$$

где t_r – приведенная толщина стальной оболочки, определяемая по формуле

$$t_r = t + \frac{E_s}{E_{ss}} \cdot \frac{r_{ss}}{r_{se} \cdot r_{si}} \cdot (A_{se} \cdot r_{si} + A_{si} \cdot r_{se}); \quad (5)$$

где t – толщина стальной оболочки; p_T – приведенное внутреннее давление воды, соответствующее температурным воздействиям, значение которого определяется из выражения

$$p_T = \frac{\alpha_s \cdot E_s}{r_{ss}} \cdot (\Delta T_{se} \cdot A_{se} + \Delta T_{si} \cdot A_{si}) - \frac{\alpha_{ss} \cdot E_s \cdot \Delta T_{ss}}{r_{se} \cdot r_{si}} \cdot (A_{se} \cdot r_{si} + A_{si} \cdot r_{se}), \quad (6)$$

где ΔT_{ss} , ΔT_{si} , ΔT_{se} – расчетные перепады температур для стальной оболочки, внутренней и наружной кольцевой арматуры, определяемые по формулам:

$$\Delta T_{ss} = T_0 - T_w, \quad (7)$$

$$\Delta T_{si} = T_0 - T_w - \frac{T_w - T_a}{\frac{\lambda}{\beta_a \cdot r_e} + \ln\left(\frac{r_e}{r_{ss}}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r_{si}}{r_{ss}}\right), \quad (8)$$

$$\Delta T_{se} = T_0 - T_w - \frac{T_w - T_a}{\frac{\lambda}{\beta_a \cdot r_e} + \ln\left(\frac{r_e}{r_{ss}}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r_{se}}{r_{ss}}\right), \quad (9)$$

где T_0 , T_w , T_a – температуры замыкания конструкции, воды в водоводе и окружающего воздуха; r_e – наружный радиус водовода; λ – теплопроводность бетона; β_a – коэффициент теплоотдачи с открытой поверхности бетона в воздух.

В работе [14] было показано, что наибольшие напряжения в стальной оболочке и внутренней кольцевой арматуре возникают в летний период, а в наружной кольцевой арматуре в зимний период. Поэтому расчеты прочности необходимо выполнять отдельно для летнего и зимнего периодов. В первом случае в уравнениях связи необходимо использовать перепады температур ΔT_{ss} , ΔT_{si} , ΔT_{se} , вычисленные по формулам (7) – (9), принимая $T_a = T_{aw}$, $T_w = T_{ww}$, $T_0 = T_{0c}$, где T_{aw} , T_{ww} – температуры воздуха и воды в теплое время года, T_{0c} – температура замыкания конструкции в холодное время года. Во втором случае в уравнениях связи необходимо использовать перепады температур ΔT_{ss} , ΔT_{si} , ΔT_{se} , вычисленные по формулам (7) – (9), принимая $T_a = T_{ac}$, $T_w = T_{wc}$, $T_0 = T_{0w}$, где T_{ac} , T_{wc} – температуры воздуха и воды в холодное время года, T_{0w} – температура замыкания конструкции в теплое время года.

Подготовка исходных данных.

Все входящие в уравнения связи величины в общем случае являются случайными, однако изменчивостью некоторых из этих величин можно пренебречь и рассматривать их как детерминированные. В настоящей работе следующие величины считаются детерминированными.

1. Геометрические характеристики: r_b , r_e , r_{ss} – радиусы соответственно внутренней, наружной, кольцевой арматуры; t , t_b – толщины стальной оболочки и железобетонного кольца соответственно; A_{si} , A_{se} – площади сечения внутренней и наружной кольцевой арматуры.

2. Теплофизические величины материалов водовода: $\bar{\alpha}_s$, $\bar{\alpha}_{ss}$ – коэффициенты линейного температурного расширения стали арматуры и оболочки; λ – теплопроводность бетона; β_a – коэффициент теплоотдачи с открытой поверхности бетона в воздух.

Все остальные параметры уравнений связи считаются случайными величинами. К числу этих параметров относятся: физические и прочностные характеристики материалов сталежелезобетонного водовода, гидростатическое и гидродинамическое давление в водоводе; температуры и температурные перепады в элементах водовода. Общие подходы к определению функций распределения случайных величин приведены в [12].

В настоящей работе приняты следующие законы распределения случайных входных параметров.

1. Распределение $P_Z=P_Z(Z)$ случайной величины – статического уровня воды перед плотиной Z . Параметры этого распределения могут быть получены на основе анализа результатов выполняемых при проектировании гидроузла гидрологических, водохозяйственных и водноэнергетических расчетов.

2. Распределение $P_{Ihd}=P_{Ihd}(I_{hd})$ случайной величины – интенсивности гидродинамического давления в долях от статического давления в водоводе принято нормальным с математическим ожиданием m_{Ihd} и среднеквадратическим отклонением y_{Ihd} . Значения m_{Ihd} и y_{Ihd} определяются на основе анализа данных завода-изготовителя гидросилового оборудования.

3. Распределения $P_{Eb}=P_{Eb}(E_b)$, $P_{Ess}=P_{Ess}(E_{ss})$, $P_{Es}=P_{Es}(E_s)$ случайных величин – модулей упругости бетона, стали оболочки и арматуры приняты нормальными с математическими ожиданиями соответственно m_{Eb} , m_{Ess} , m_{Es} и среднеквадратическими отклонениями соответственно y_{Eb} , y_{Ess} , y_{Es} . Значения этих параметров определяются на основе анализа результатов испытаний каждого материала или с использованием данных норм проектирования.

4. Распределения $P_{Rbt}=P_{Rbt}(R_{bt})$, $P_{Rss}=P_{Rss}(R_{ss})$, $P_{Rs}=P_{Rs}(R_s)$ случайных величин – прочности бетона, стали оболочки и арматуры при растяжении могут быть приняты нормальными с математическими ожиданиями соответственно m_{Rbt} , m_{Rss} , m_{Rs} и среднеквадратическими отклонениями соответственно y_{Rbt} , y_{Rss} , y_{Rs} . Значения этих параметров определяются на основе анализа результатов испытаний каждого материала или с использованием данных норм проектирования.

5. Распределения $P_{Taw}=P_{Taw}(T_{aw})$, $P_{Tac}=P_{Tac}(T_{ac})$ случайных величин – максимальных и минимальных температур воздуха в летнее и зимнее время принимаются нормальными с математическими ожиданиями соответственно m_{Taw} , m_{Tac} и среднеквадратическими отклонениями соответственно y_{Taw} , y_{Tac} . Параметры этих распределений могут быть получены на основании обработки рядов наблюдений за температурой в районе строительства гидроузла. При отсутствии детальных климатических исследований можно воспользоваться нормами проектирования [15, 16], где содержится информация о температурах в теплое и холодное время года с некоторой заданной обеспеченностью для различных районов.

6. Распределение $P_{Tww}=P_{Tww}(T_{ww})$ случайной величины – температуры воды в водоводе в летнее время принимается нормальным с математическим ожиданием m_{Tww} и среднеквадратическим отклонением y_{Tww} . Вероятностные характеристики определяются на основании обработки результатов прогнозных расчетов температурного режима в водохранилище.

Необходимо указать, что функции распределения уровней воды, температур воздуха и воды соответствуют ежегодным вероятностям, а остальные – вероятностям в течение расчетного срока службы гидроузла. В дальнейшем все расчеты выполняются для расчетного срока службы гидроузла T , принимаемого в соответствии с нормами проектирования [4, 5]. Поэтому полученные значения ординат функций распределения уровней воды, температур воздуха и воды пересчитываются для расчетного срока службы.

Определение вероятности (риска) разрушения водовода методом статистических испытаний Монте-Карло.

Может быть принят следующий алгоритм решения поставленной задачи.

В соответствии с методом Монте-Карло выполняется N число статистических испытаний. Принята такая последовательность расчетов при каждом испытании.

1. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью следующих параметров:

- максимальных статических уровней воды в верхнем бьефе гидроузла P_Z ;

- интенсивности гидродинамического давления в долях от гидростатического давления P_{hd} ;
- модуля упругости стали оболочки P_{Ess} ;
- модуля упругости стали арматуры P_{Es} ;
- модуля упругости бетона P_{Eb} ;
- прочности бетона при растяжении P_{Rbi} ;
- прочности стали оболочки при растяжении P_{Rss} ;
- прочности стали кольцевой арматуры при растяжении P_{Rs} ;
- максимальных температур воздуха в летнее время P_{Taw} ;
- температур воды в водоводе в летнее время P_{Tww} ;
- минимальных температур воздуха в зимнее время P_{Tac} .

2. По значениям вероятностей находятся квантили – значения соответствующих параметров по известным функциям распределения:

- максимальный статический уровень воды в верхнем бьефе гидроузла Z ;
- интенсивность гидродинамического давления в долях от гидростатического давления I_{hd} ;
- модуль упругости стали оболочки E_{ss} ;
- модуль упругости стали арматуры E_s ;
- модуль упругости бетона E_b ;
- прочность бетона при растяжении R_{bi} ;
- прочность стали оболочки при растяжении R_{ss} ;
- прочность стали кольцевой арматуры при растяжении R_s ;
- максимальная температура воздуха в летнее время T_{aw} ;
- температура воды в водоводе в летнее время T_{ww} ;
- минимальная температура воздуха в зимнее время T_{ac} .

3. Определяется значение гидростатического давления внутри водовода, исходя из разности отметок уровня верхнего бьефа и отметкой расчетного сечения $p_{st} = (Z - Z_s) \cdot c_w \cdot g$, где c_w – плотность воды.

4. Находится значение гидродинамического давления $p_{hd} = p_{st} I_{hd}$.

5. Вычисляются значения напряжений в стальной оболочке, внутренней и наружной кольцевой арматуре для летнего периода в соответствии с левыми частями неравенств (1) – (3).

6. Проверяются условия соблюдения прочности стальных элементов водовода в соответствии с неравенствами (1) – (3) для летнего периода. Считается, что прочность системы не обеспечена, если не выполняется хотя бы одно из условий прочности.

7. Вычисляются значения напряжений в стальной оболочке, внутренней и наружной кольцевой арматуре для зимнего периода в соответствии с левыми частями неравенств (1) – (3).

8. Проверяются условия соблюдения прочности стальных элементов водовода в соответствии с неравенствами (1) – (3) для зимнего периода. Считается, что прочность системы не обеспечена, если не выполняется хотя бы одно из условий прочности.

После выполнения всех N испытаний вычисляется значение вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода P_{usT} в течение расчетного срока службы T . Это значение P_{usT} определяется как отношение числа испытаний N_{Is} , при которых хотя бы одно из условий прочности для летнего и/или зимнего периодов не выполняется, к числу всех испытаний N .

Может быть найдено значение ежегодной вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода по известной формуле [12] $P_{us} = 1 - (1 - P_{usT})^{1/T}$.

В ПАО «Укрэнергопроект» разработана компьютерная программа для выполнения расчетов по определению вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода с двухрядным армированием в соответствии с приведенным алгоритмом.

Пример расчета. Для иллюстрации применения предложенной методики с использованием разработанной компьютерной программы выполнены расчеты по определению вероятности (риска) разрушения высоконапорного сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 1). Сооружения Саяно-Шушенской ГЭС относятся к I классу сооружений по классификации норм проектирования России [4] и классу СС3 по классификации норм проектирования Украины [5]. Расчетный срок службы составляет $T = 100$ лет.

Таблица 1. Детерминированные величины

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Наружный радиус водовода	$r_e, \text{ м}$	5,25
Радиус стальной оболочки	$r_{ss}, \text{ м}$	3,75
Толщина стальной оболочки	$t, \text{ мм}$	25
Радиус внутренней кольцевой арматуры	$r_{si}, \text{ м}$	3,9
Площадь поперечного сечения внутренней кольцевой арматуры	$A_{si}, \text{ см}^2$	154
Радиус наружной кольцевой арматуры	$r_{se}, \text{ м}$	5,1
Площадь поперечного сечения наружной кольцевой арматуры	$A_{se}, \text{ см}^2$	113
Толщина железобетонного кольца	$t_b, \text{ м}$	1,5
Отметка расчетного сечения водовода	$Z_s, \text{ м}$	323,6
Коэффициент линейного температурного расширения стали	$\bar{\alpha}_s, 1/^\circ\text{C}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент линейного температурного расширения бетона	$\bar{\alpha}_b, 1/^\circ\text{C}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Теплопроводность бетона	$\lambda, \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$	1,7
Коэффициент теплоотдачи с открытой поверхности бетона в воздух	$\alpha_a, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	20
Плотность воды	$\rho, \text{ кг/м}^3$	1000
Минимальная температура воды в зимнее время внутри водовода	$T_{wc}, ^\circ\text{C}$	4
Температура замыкания конструкции в летнее время	$T_{ow}, ^\circ\text{C}$	10,5
Температура замыкания конструкции в зимнее время	$T_{oc}, ^\circ\text{C}$	-16,5

Значение расчетных детерминированных величин приведены в таблице 1. Вероятностные характеристики функций распределений расчетных случайных величин приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики функций нормального распределения случайных величин

Параметр	Обозначение	Вероятностные характеристики	
		Математическое ожидание m	Средне-квадратическое отклонение y
Интенсивность гидродинамического давления в долях от гидростатического*	I_{hd}	0,2	0,12
Модуль упругости стали оболочки*	E_{ss} , МПа	$2,06 \cdot 10^5$	$6,18 \cdot 10^3$
Модуль упругости стали арматуры*	E_s , МПа	$2,06 \cdot 10^5$	$6,18 \cdot 10^3$
Прочность бетона при растяжении*	R_{bt} , МПа	1,405	0,19
Прочность стали оболочки при растяжении*	R_{ss} , МПа	300	24
Прочность стали внутренней арматуры при растяжении*	R_{si} , МПа	362,5	29
Прочность стали наружной арматуры при растяжении*	R_s , МПа	362,5	29
Температура окружающего воздуха в летнее время**	T_{aw} , °C	19,5	4,14
Температура воды в водоводе в летнее время**	T_{ww} , °C	19,5	1,22
Температура окружающего воздуха в зимнее время**	T_{ac} , °C	-32,5	4,62

* – вероятностные характеристики функций распределения представлены для вероятностей, соответствующих расчетному сроку службы $T=100$ лет.

** – вероятностные характеристики функций распределения представлены для ежегодных вероятностей.

На рис. 2 показано распределение случайной величины Z – статического уровня верхнего бьефа (УВБ) Саяно-Шушенской ГЭС. Параметры этого распределения определялись в зависимости от максимальных расходов воды в реке, которые находились с учетом трансформации паводка в водохранилище. Использовались проектные уровни воды в водохранилище: нормальный подпорный уровень $Z_{нпу} = 540,00$ м с ежегодной вероятностью превышения 0,1% и форсированный подпорный уровень $Z_{фпу} = 544,50$ м с ежегодной вероятностью превышения 0,01%.

С использованием разработанной программы выполнены расчеты по определению вероятности (риска) разрушения сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС. Для обеспечения приемлемой точности решения поставленной задачи было выполнено 1 млн. статистических испытаний. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

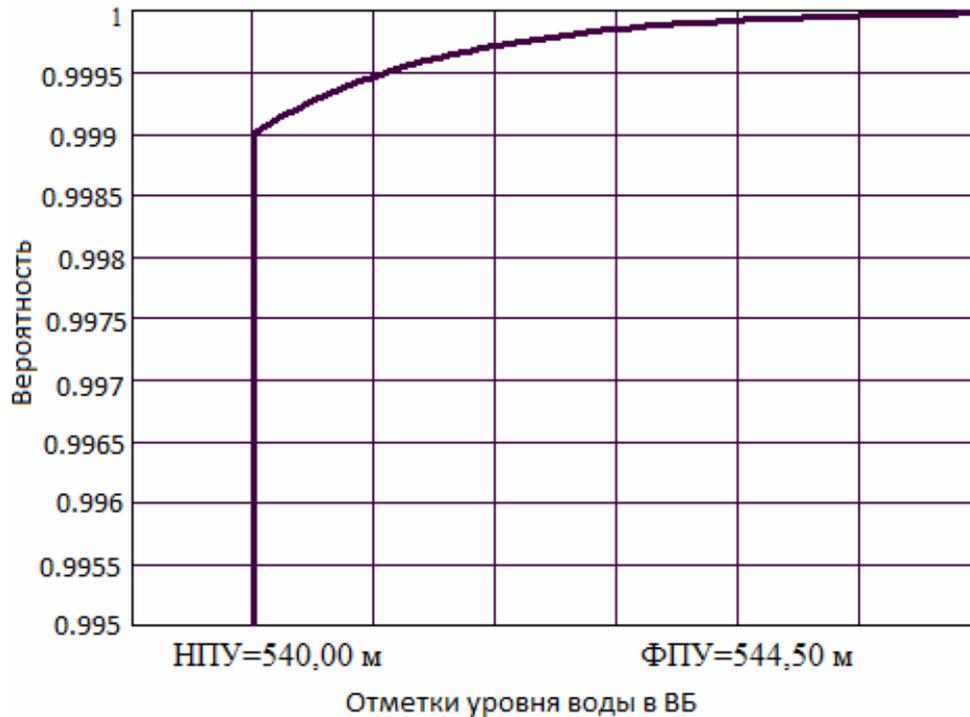


Рис. 2. Функция распределения уровня воды в верхнем бьефе, соответствующая ежегодной вероятности

Таблица 3. Результаты расчетов вероятности разрушения высоконапорных сталежелезобетонных водоводов Саяно-Шушенской ГЭС

Наименование величин	Значения
Обобщенная вероятность разрушения сталежелезобетонного водовода в течение расчетного срока службы $P_{уст}$,	$9,923 \cdot 10^{-4}$
Обобщенная ежегодная вероятность разрушения сталежелезобетонного водовода $P_{ис}$, 1/год	$9,928 \cdot 10^{-6}$
Допускаемая ежегодная вероятность разрушения водовода P_n , 1/год	$5 \cdot 10^{-5}$

Выводы.

1. Предложена методика и разработан алгоритм решения задачи по определению вероятности (риска) разрушения высоконапорного сталежелезобетонного водовода с двухрядным армированием в рамках системной теории надежности. Используется метод статистических испытаний (Монте-Карло).

2. Разработана компьютерная программа, реализующая предложенную методику расчетов.

3. Выполнены расчеты по определению вероятности (риска) разрушения для наиболее опасного сечения сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС. Получено значение ежегодной вероятности (риска) разрушения водовода равное $9,928 \cdot 10^{-6}$ 1/год, что меньше нормативного значения для напорных гидротехнических сооружений I класса (класса СС3), равного $5 \cdot 10^{-5}$ 1/год.

Литература

1. ENV 1991-1. Eurocode 1: Basis of Design and Actions of Structures/ Part 1: Brussels: CEN. 1993.
2. ENV 1991-1. Eurocode 1: Basis of Design and Actions of Structures/ Part 2-4: Wind Actions. - Brussels: CEN. 1993.
3. ISO 2394:1998. General principles on reliability for structures - International Organization for Standardization. 1998
4. СП 58.13330.2012. Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 39 с.
5. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Мінрегіонбуд України. – К.: ДП “Укрархбудінформ”, 2010. – 37 с.
6. Методика вероятностно-статического расчета обратных фильтров гидросооружений с учетом природной изменчивости зерновых составов грунтов. – М.: Гидропроект, 1982. – 32 с.
7. Основные положения расчета причальных сооружений на надежность / РД 31.31.35-85. – М.: ВО Мортехинформреклама, 1986. – 32 с.
8. Рекомендации по оценке надежности гидротехнических сооружений: П-818-86 / Гидропроект. – М., 1986. – 83 с.
9. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Том 1 / Беллендир Е.Н., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. – СПб.: Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. – 554 с.
10. Векслер Ф.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / Векслер Ф.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В. – СПб.: Изд-во «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 592 с.
11. Надежность накопите лей промышленных и бытовых отходов / Сольский С.В., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. – СПб.: Изд-во «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. – 302 с.
12. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы / Вайнберг А.И. – Харьков: Издательство “Тяжпромавтоматика”, 2008. – 304 с.
13. Пічугін С.Ф. Розрахунок рівня надійності лінійної частини підземних магістральних трубопроводів/ Пічугін С.Ф., Винников П.Ю. // Зб. наук. праць (Серія: галузеве машинобудування, будівництво) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 1 (40). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 109 – 119.
14. Вайнберг А.И. Напряженное состояние высоконапорных сталежелезобетонных водоводов / Вайнберг А.И., Рыжиков К.О. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – Т. 271. – С. 109 – 119.
15. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
16. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: Минрегион России, 2012. – 109 с.

© А.И. Вайнберг, К.О. Рыжиков
Надійшла до редакції 07.05.2015