



УДК 624.196

ВАЙНБЕРГ А.И., докт. техн. наук, профессор,
начальник отдела ПАО "Укргідропроект", г. Харьков



АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕРИ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ ВЫСОКОНАПОРНОГО ТУННЕЛЯ

Введение. Сталежелезобетонные обделки широко применяются в практике строительства туннелей при возведении высоконапорных гидроузлов ГЭС и ГАЭС. Являющиеся одним из видов комбинированных обделок сталежелезобетонные обделки представляют собой конструкцию в виде внутренней стальной оболочки и наружного железобетонного кольца с однорядным или двухрядным расположением арматуры. Отметим, что входящая в конструкцию обделки стальная оболочка в решающей степени обеспечивает восприятие внутреннего давления воды и, кроме того, выполняет функцию противифльтрационного элемента.

До настоящего времени согласно действующим нормам проектирования [8, 10] для обоснования надежности и безопасности сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей использовался детерминистический подход, основанный на методе предельных состояний. В соответствии с этим подходом выполняются расчеты их напряженно-деформированного состояния и прочности с учетом совместной работы обделки и вмещающего туннель массива горных пород в рамках решения плоской задачи при действии внутреннего давления воды. Нормы проектирования регламентируют рассмотрение наиболее опасных сочетаний постоянных и временных (длительных, кратковременных и особых) нагрузок и воздействий. В результате таких расчетов определяется необходимая толщина стальной оболочки и площадь сечения рабочей кольцевой арматуры по условиям прочности обделки туннеля.

В настоящее время интенсивно развиваются вероятностные подходы к оценке надежности и безопасности гидротехнических сооружений в рамках современной теории надежности сложных технических объектов [1–3, 6 и др.]. Такие подходы позволяют получить количественную оценку надежности и безопасности гидротехнических сооружений в виде вероятности возникновения аварии на этих сооружениях. В соответствии с недавно вышедшими в Украине и России нормами проектирования гидротехнических сооружений [7, 9] для оценки их надежности и безопасности наряду

с методом предельных состояний следует использовать вероятностные методы. Однако в ряде случаев использование вероятностных методов тормозится отсутствием методики расчета для различных видов сооружений и конструкций, в частности, для обделок гидротехнических туннелей.

В настоящей работе в рамках системной теории надежности на основе непосредственного решения вероятностных задач методом Монте-Карло приводится методика определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля.

Определение напряжений в стальной оболочке и арматуре сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля (детерминистический подход). Для вероятностной оценки прочности сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля необходимо иметь зависимости для определения напряжений в стальной оболочке и арматуре. В действующих нормах проектирования туннелей [8, 10] приведены такие зависимости, исходя из того, что в железобетонном кольце обделки возникают сквозные радиальные трещины, а жесткость обделки равна жесткости металлического сечения (стальной оболочки и арматуры). В работе [5] показано, что реальную жесткость обделки, несмотря на наличие сквозных радиальных трещин, следует принимать большей, т.к. необходимо учитывать уменьшение деформаций в арматуре на участках между трещинами. В этой работе получены следующие выражения для определения напряжений в арматуре σ_s и стальной оболочке σ_{ss}

$$\sigma_s = \frac{p_w r_i A_s + \frac{2}{3} R_{bim} (r_e - r_i) \left[\frac{A_{ss} r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or} r_s}{E_s} \right]}{A_s \left[\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]},$$

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{(1 - \nu_s^2) r_i} \frac{p_w r_i - \frac{2}{3} R_{bim} (r_e - r_i)}{\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s}}. \quad (1)$$

В этих формулах p_w – внутреннее давление



воды в туннеле; r_i и r_e – соответственно внутренний и наружный радиусы обделки; A_s – площадь сечения рабочей кольцевой арматуры на единицу длины туннеля; A_{ss} – площадь сечения стальной оболочки на единицу длины туннеля, равная толщине этой оболочки t , R_{btm} – средняя прочность бетона при растяжении; E_s и ν_s – соответственно, модуль упругости и коэффициент Пуассона стали; K_{or} – приведенный коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород.

Значение внутреннего давления воды в туннеле p_w в общем случае является суммой статического давления воды p_{st} , пульсационного давления p_p , давления гидравлического удара p_{wp} и сейсмического давления воды p_s , т. е.

$$p_w = p_{st} + p_p + p_{wp} + p_s.$$

Рассмотрим определение компонентов внутреннего давления воды.

Статическое давление воды p_{st} соответствует разности отметок уровня воды в водохранилище Z_w и оси туннеля Z_0 , т. е.

$$p_{st} = \rho_w g (Z_w - Z_0), \quad (2)$$

где ρ_w – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

Пульсационное давление p_p и давление гидравлического удара p_{wp} принимаются по данным расчетов неустановившегося движения воды в туннеле и данным завода-изготовителя турбинного оборудования в зависимости от условий закрытия (или открытия) направляющего аппарата турбины, наличия уравнительного резервуара и других факторов.

Сейсмическое давление воды в туннеле p_s согласно нормам проектирования определяется по формуле

$$p_s = \frac{a_s}{2\pi} \rho_w C_w T_0, \quad (3)$$

где a_s и T_0 – соответственно, расчетное значение сейсмического ускорения и преобладающий период сейсмических колебаний грунта, принимаемые в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия на участке расположения туннеля; C_w – скорость звука в воде $C_w = 1300$ м/с.

Значение приведенного коэффициента удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород K_{or} следует принимать в зависимости от глубины заложения туннеля h_{q2} ,

равной расстоянию от шельги свода туннеля до поверхности земли. Ограничимся здесь рассмотрением туннелей глубокого заложения, для которых

$$K_{or} = \frac{E_q}{1 + \nu}, \quad (4)$$

где E_q и ν – соответственно, модуль деформации и коэффициент Пуассона вмещающего туннель массива горных пород.

Основные положения методики определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля. Предлагаемая методика определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля базируется на обычно применяемых подходах решения задач системной теории надежности [1–3, 6 и др.]. В соответствии с этими подходами рассматриваются следующие основные этапы расчета.

1. Составление уравнений связи между входными и выходными параметрами.

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

3. Определение вероятностных характеристик входных параметров.

4. Определение вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля на основе решения соответствующей задачи статистической динамики.

В рассматриваемом случае уравнения связи целесообразно принять согласно выражениям (1) в виде

$$\sigma_s = \frac{p_w r_i A_s + \frac{2}{3} R_{bt} (r_e - r_i) \left[\frac{t r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or} r_s}{E_s} \right]}{A_s \left[\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]} \leq R_s,$$

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{(1 - \nu_s^2) r_i} \frac{p_w r_i - \frac{2}{3} R_{bt} (r_e - r_i)}{\frac{A_s}{r_s} + \frac{t}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s}} \leq R_{ss}, \quad (5)$$

где R_s и R_{ss} – сопротивление, соответственно, арматуры и стальной оболочки растяжению.

Все входящие в уравнения связи (5) параметры в общем случае являются случайными величинами. Однако некоторые геометрические параметры без большой погрешности могут рассматриваться как детерминированные величины. К



детерминированным параметрам можно отнести внутренний радиус обделки r_p , площадь сечения рабочей кольцевой арматуры на единицу длины туннеля A_s , толщину стальной оболочки t , модуль упругости E_s и коэффициент Пуассона ν_s стали. Остальные параметры, входящие в уравнения связи (5), следует рассматривать как случайные величины.

Перейдем к определению вероятностных характеристик случайных входных параметров.

Для наружного радиуса обделки r_e , рассматриваемого как случайная величина, вид функции распределения и ее параметры могут быть найдены с учетом следующих обстоятельств [4]. При проходке туннеля практически всегда имеют место переборы. Недоборы не допускаются, т. к. в пределах сечения выработки должно быть обеспечено размещение постоянной обделки проектных размеров. Строительные нормы [11] регламентируют допустимое значение переборов Δr_e , и, например, при коэффициенте крепости породы до 4 допустимое значение переборов составляет 100 мм. Однако при проходке туннелей в неблагоприятных инженерно-геологических условиях могут иметь место значительные вывалы, которые существенно превышают допустимое значение переборов. Учитывая указанные обстоятельства, случайную величину – наружный радиус обделки r_e можно считать суммой проектного наружного радиуса обделки $r_{e,pr}$, рассматриваемого как детерминированная величина, и перебора Δr_e , рассматриваемого как случайная величина, распределенная по закону равномерной плотности в пределах от 0 до $\Delta r_{e,max}$, где $\Delta r_{e,max}$ – максимальное значение перебора, принимаемое равным либо допустимому значению, либо максимальному наблюдаемому значению.

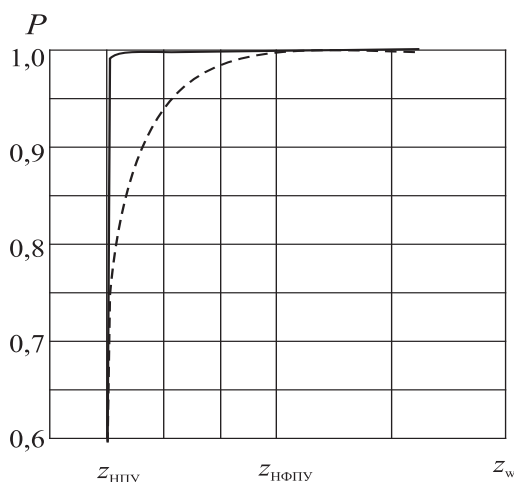


Рис. 1. Функция распределения уровня воды в водохранилище

Как показано в работе [3] прочность арматуры R_s может рассматриваться как распределенная по нормальному закону случайная величина с математическим ожиданием m_{R_s} и коэффициентом вариации C_{v,R_s} . Значения m_{R_s} и C_{v,R_s} для арматуры различных классов приведены в [3]. Аналогично, прочность стальной оболочки R_{ss} может рассматриваться как распределенная по нормальному закону случайная величина с математическим ожиданием $m_{R_{ss}}$ и коэффициентом вариации $C_{v,R_{ss}}$. При определении $m_{R_{ss}}$ и $C_{v,R_{ss}}$ следует использовать данные обработки результатов испытаний прочности стальной оболочки при растяжении.

Прочность бетона при растяжении R_{bt} также может рассматриваться как распределенная по нормальному закону случайная величина с математическим ожиданием $m_{R_{bt}} = R_{btm}$ и коэффициентом вариации $C_{v,R_{bt}} = 0.135$ [3].

Приведенный коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород K_{or} также целесообразно рассматривать как распределенную по нормальному закону случайную величину с математическим ожиданием $m_{K_{or}}$ и коэффициентом вариации $C_{v,K_{or}}$. Значения $m_{K_{or}}$ и $C_{v,K_{or}}$ следует принимать по результатам обработки данных инженерно-геологических изысканий для вмещающего туннель массива горных пород.

Рассмотрим, наконец, как принимается вид функции распределения и ее параметры для внутреннего давления воды в туннеле p_w . Для этого необходимо определить распределения компонентов внутреннего давления: статического давления воды p_{st} , пульсационного давления p_p , давления гидравлического удара p_{wp} и сейсмического давления воды p_s .

Для высоконапорных туннелей ГЭС изменчивость статического давления воды p_{st} , согласно (2), связана с изменчивостью отметки уровня воды в водохранилище Z_w . В работе [3] показано как на основании гидрологических и водохозяйственных расчетов может быть получена функция распределения Z_w для ежегодных вероятностей. Вид этой функции представлен на Рис. 1 (сплошная линия).

Отметим, что если водохранилище представляет собой верхний водоем ГАЭС, отметка уровня воды в нем Z_w является детерминированной величиной, значение которой равно отметке НПУ в верхнем водоеме.



Изменчивостью пульсационного давления p_p и давления гидравлического удара $p_{гуд}$ можно пренебречь и рассматривать эти величины как детерминированные, т. к. в запас можно принять, что ежегодная вероятность возникновения гидравлического удара, соответствующего полному сбросу нагрузки ГЭС, и имеющего место при этом пульсационного давления равна 1.

Распределение сейсмического ускорения a_s , от которого зависит сейсмическое давление воды в туннеле, принимается по данным сейсмологических изысканий. Вид этой функции для ежегодных вероятностей представлен на Рис. 2 (сплошная линия).

Таким образом, распределения всех случайных величин, входящих в уравнения связи (5) найдены.

Необходимо отметить следующее важное обстоятельство. Функции распределений уровня воды в водохранилище Z_w и сейсмического ускорения a_s представляют собой зависимости ежегодных вероятностей от соответствующих величин. Для выполнения расчетов по оценке вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля необходимо знать функции распределений этих случайных величин для расчетного срока службы сооружения, который в соответствии с рекомендациями [7, 9] 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 могут быть получены возведением в степень ординат функции распределения, соответствующей ежегодным вероятностям. Функции распределения Z_w и a_s для расчетного срока службы сооружения показаны на Рис. 1, 2 штрихпунктирными линиями.

Для решения задачи статистической динамики по определению вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля могут быть применены различные методы, например, метод численного интегрирования, метод линеаризации, метод статистических испытаний (Монте-Карло) и др. В настоящей работе используется метод статистических испытаний (Монте-Карло).

Последовательность расчетов по определению вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля. Для определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля методом статистических испытаний (Монте-Карло) может быть использован следующий алгоритм.

Согласно методу Монте-Карло выполняется N статистических испытаний.

Последовательность расчетов при каждом статистическом испытании может быть принята такой.

1. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{re} наружного радиуса обделки r_e .

2. По значению P_{re} определяется квантиль — значение наружного радиуса обделки r_e .

3. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{Rs} прочности арматуры R_s .

4. По значению P_{Rs} определяется квантиль — значение прочности арматуры R_s .

5. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{Rss} прочности материала стальной оболочки R_{ss} .

6. По значению P_{Rss} определяется квантиль — значение прочности материала стальной оболочки R_{ss} .

7. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{Rbt} прочности бетона при растяжении R_{bt} .

8. По значению P_{Rbt} определяется квантиль — значение прочности бетона при растяжении R_{bt} .

9. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{Kor} приведенного коэффициента удельного упругого отпора K_{or} .

10. По значению P_{Kor} определяется квантиль — значение приведенного коэффициента удельного упругого отпора K_{or} .

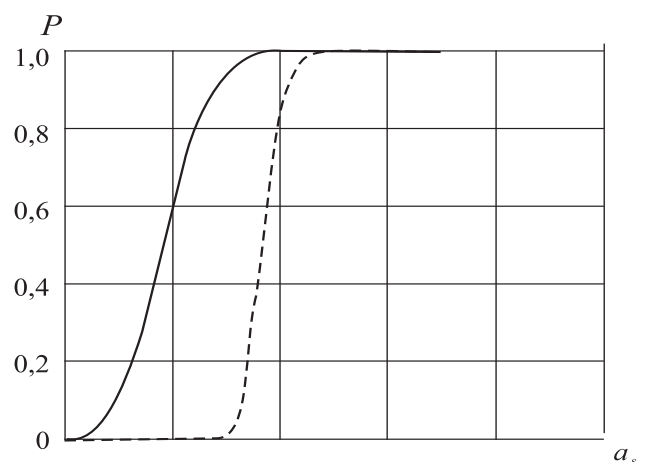


Рис. 2. Функция распределения сейсмического ускорения



11. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{Z_w} отметки уровня воды в водохранилище Z_w .

12. По значению P_{Z_w} определяется квантиль — значение отметки уровня воды в водохранилище Z_w .

13. Задаются равномерно распределенной в интервале от 0 до 1 случайной вероятностью P_{a_s} сейсмического ускорения a_s .

14. По значению P_{a_s} определяется квантиль — значение сейсмического ускорения a_s .

15. Находится случайное значение статического давления воды p_{st} по формуле (2).

16. Вычисляется случайное значение сейсмического давления воды p_s по формуле (3).

17. Определяется случайное значение внутреннего давления воды в туннеле p_w по формуле $p_w = p_{st} + p_p + p_{wp} + p_s$.

18. Находится случайное значение напряжения в арматуре σ_s по первой из формул (5).

19. Проверяется выполнение условия $\sigma_s \leq R_s$.

20. Вычисляется случайное значение напряжения в стальной оболочке σ_{ss} по второй из формул (4).

21. Проверяется выполнение условия $\sigma_{ss} \leq R_{ss}$.

После выполнения всех N испытаний вычисляется вероятность потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля в течение расчетного срока службы P_T как отношение числа испытаний n_1 , при которых $\sigma_s \leq R_s$ и/или $\sigma_{ss} \leq R_{ss}$, к числу всех испытаний N .

Ежегодная вероятность потери прочности сталежелезобетонной обделки туннеля P определяется по формуле $P = 1 - (1 - P_T)^{1/T}$.

Следует отметить, что ввиду малости значений P_T , число статистических испытаний должно быть сравнительно большим с тем, чтобы обеспечить достаточную достоверность получаемых значений [3].

В соответствии с изложенным в ПАО "Укрэнергопроект" нами разработана программа для персональных компьютеров, позволяющая выполнять расчеты потери прочности сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллендир Е.Н., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Том 1. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Веденеева, 2003. — 554 с.

2. Беллендир Е.Н., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Том 2. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Веденеева, 2004. — 524 с.

3. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. — Харьков: Изд-во Тяжпромавтоматика, 2008. — 304 с.

4. Вайнберг А.И. Оценка вероятности обрушения стены туннельной выработки методом статистической параболлизации. Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування, Частина 5. Збірник наукових праць. Випуск 5 (18). — Рівне. — 2002. С. 24 — 32.

5. Вайнберг А.И. Расчет прочности сталежелезобетонной обделки напорного туннеля с учетом работы бетона. // Гідроенергетика України. — 2013. — № 1. — С. 27 — 32.

6. Векслер Ф.Б., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. — СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. — 592 с.

7. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. — К.: ДП "Укрархбудінформ", 2010. — 37 с.

8. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей // Всесоюз. проек.-изыскат. и н.-и. ин-т "Гидропроект" им. С.Я. Жука. — М.: Стройиздат, 1982. — 287 с.

9. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. — 27 с.

10. СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические. / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 19 с.

11. СНиП III-44-77. Правила производства и приемки работ. Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. — М.: Стройиздат, 1977. — 32 с.

