

УДК 626/627

Вайнберг А. И., д.т.н., профессор (ПАО “Укргідропроєкт”,  
г. Харьков)

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ НАПОРНОГО ТУННЕЛЯ С УЧЕТОМ РАБОТЫ БЕТОНА

**Предлагается инженерный метод расчета железобетонных обделок высоконапорных туннелей ГЭС и ГАЭС на внутреннее давление воды. Метод основан на рассмотрении совместного деформирования рабочей кольцевой арматуры, бетона между трещинами и вмещающего туннель массива горных пород.**

**Ключевые слова:** напорный туннель, железобетонная обделка, рабочая кольцевая арматура.

**Введение.** При строительстве высоконапорных гидроузлов широкое применение получили напорные туннели, которые используются в качестве подводящих водоводов ГЭС и ГАЭС, элементов водосбросов и др. Поперечное сечение таких туннелей обычно принимается кругового очертания. Одним из основных видов несущих обделок напорных туннелей являются железобетонные обделки с однорядным или двухрядным расположением арматуры.

Для обоснования надежности и безопасности железобетонных обделок высоконапорных туннелей выполняются расчеты их напряженно-деформированного состояния и прочности с учетом совместной работы обделки и вмещающего туннель массива горных пород. В результате таких расчетов определяется необходимая площадь сечения рабочей кольцевой арматуры по условиям прочности обделки туннеля и ограничению ширины раскрытия трещин.

Согласно действующим нормам проектирования [7] расчеты обделок туннелей выполняются методом предельных состояний на действие постоянных и временных (длительных, кратковременных и особых) нагрузок и воздействий. При этом необходимо рассматривать наименее благоприятные сочетания нагрузок и воздействий.

Для высоконапорных туннелей определяющей нагрузкой является внутреннее давление воды  $p$ . Значение  $p$  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.  $p = p_{st} + p_p + p_{wp} + p_s$ . Статическое давление воды  $p_{st}$ , соответству-

ющее нормальному подпорному уровню воды в водохранилище, рассматривается как постоянная нагрузка, а соответствующее форсированному подпорному уровню воды в водохранилище – как особая нагрузка. Пульсационное давления  $p_p$  и давление гидравлического удара  $p_{wp}$  при нормальной эксплуатации туннеля рассматриваются как кратковременные нагрузки, а при полном сбросе нагрузки ГЭС – как особые нагрузки. Сейсмическое давление воды  $p$ , является особой нагрузкой.

При выполнении расчетов железобетонных обделок напорных туннелей на внутреннее давление воды, в соответствии с рекомендациями действующих норм проектирования [7], считается, что в обделке возникают сквозные радиальные трещины и поэтому жесткость обделки должна приниматься равной жесткости арматурного сечения. Реальную жесткость обделки, несмотря на наличие сквозных радиальных трещин, очевидно, следует принимать большей, т.к. необходимо учитывать уменьшение деформаций в арматуре на участках между трещинами. Учет большей жесткости обделки важен при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния обделки совместно с вмещающим туннель массивом горных пород.

В настоящей работе предложен инженерный метод расчета железобетонных обделок высоконапорных туннелей на внутреннее давление воды с учетом повышенной реальной жесткости обделки.

**Нормативный метод расчета железобетонных обделок высоконапорных туннелей на внутреннее давление воды.** Согласно действующим нормам проектирования [7] на начальных стадиях проектирования расчет железобетонных обделок высоконапорных туннелей на внутреннее давление воды выполняется по формуле, которая учитывает только внутреннее давление воды, постоянное в пределах сечения. При этом площадь сечения рабочей кольцевой арматуры  $A_s$  на единицу длины туннеля определяется по формуле

$$A_s = \frac{\gamma_n \cdot \gamma_c \cdot p \cdot r_i}{\gamma_c \cdot R_{st}} - \frac{K_{or} \cdot r_i}{E_s}, \quad (1)$$

где  $p$  – расчетное внутреннее давление воды;  $r_i$  – внутренний радиус обделки;  $R_{st}$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению;  $E_s$  – модуль упругости арматуры;  $K_{or}$  – приведенный коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения;  $\gamma_c$  – коэффициент сочетания нагрузок;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

Приведенный коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород  $K_{or}$  принимается в зависимости от глубины заложения туннеля  $h_{qz}$ , равной расстоянию от шельги свода

туннеля до поверхности земли. Рассматриваются туннели глубокого и мелкого заложения.

Считается, что туннель имеет глубокое заложение при соблюдении условия

$$h_{qz} \geq \frac{K_o \cdot r_i \cdot \gamma_c \cdot R_{st}}{r_e \cdot \rho \cdot g \cdot E_s \cdot \gamma_n \cdot \gamma_{lc}}, \quad (2)$$

где  $r_e$  – наружный радиус обделки;  $\rho$  – плотность грунта;  $g$  – ускорение свободного падения;  $K_o$  – коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород, определяемый по формуле

$$K_o = \frac{E_q}{1 + \nu}; \quad (3)$$

$E_q$  и  $\nu$  – соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона вмещающего туннель массива горных пород.

Если условие (2) не выполняется, считается, что туннель имеет мелкое заложение.

Для туннелей глубокого заложения значение приведенного коэффициента удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород принимается равным  $K_{or} = K_o$ , а для туннеля мелкого заложения определяется по формуле

$$K_{or} \geq \frac{h_{qz} \cdot r_e \cdot \rho \cdot g \cdot E_s \cdot \gamma_n \cdot \gamma_{lc}}{r_i \cdot \gamma_c \cdot R_{st}}. \quad (4)$$

Формула (1) получена из рассмотрения условия совместности деформаций арматуры и вмещающего туннель массива горных пород.

**Основные предпосылки и исходные данные, необходимые для выполнения расчетов прочности железобетонных обделок высоконапорных туннелей с учетом работы растянутого бетона между трещинами.** Предлагаемая методика расчетов железобетонной обделки высоконапорного туннеля на действие внутреннего давления воды основана на следующих предпосылках.

1. Поперечное сечение рассматриваемой обделки схематизируется в виде железобетонного кольца с кольцевой арматурой.

2. При рассмотрении напряженно-деформированного состояния рассматривается плоская задача с центральной симметрией.

3. Учитывается, что в железобетонном кольце под действием внутреннего давления воды образуются радиальные трещины. При этом взаимодействие арматуры и вмещающего туннель массива горных пород осуществляется через участки бетона между трещинами.

4. Считается, что деформации кольцевой арматуры являются упругими.

5. Учитывается совместность деформаций кольцевой арматуры и контура выработки. При этом считается, что радиальные перемещения контура выработки равны средним перемещениям кольцевой арматуры.

6. При определении средних деформаций в кольцевой арматуре используется коэффициент  $\psi_s$ , учитывающий работу растянутого бетона на участках между трещинами.

Расчеты выполняются на заданное внутреннее давление воды  $p$ .

Рассматриваемое поперечное сечение железобетонной обделки характеризуется следующими геометрическими размерами. Внутренний радиус железобетонной обделки  $r_i$ , наружный радиус –  $r_e$ . Вблизи внутренней поверхности обделки располагается рабочая кольцевая арматура, площадь сечения которой на 1 м длины туннеля составляет  $A_s$ , радиус окружности, на которой располагается ось кольцевой арматуры  $r_s$ .

Считаются известными физико-механические свойства арматурной стали (расчетное сопротивление растяжению  $R_{st}$  и модуль упругости  $E_s$ ), а также нормативное сопротивление бетона растяжению  $R_{bm}$ . Кроме того, считается известным значение приведенного коэффициента удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород  $K_{or}$ . Методика определения значения  $K_{or}$  приведена выше.

**Напряженно-деформированное состояние железобетонной обделки напорного туннеля.** Рассматривается напряженно-деформированное состояние железобетонной обделки напорного туннеля с однорядным расположением арматуры вблизи внутренней поверхности обделки. При этом считается, что на эту внутреннюю поверхность радиусом  $r_i$  действует давление воды  $p$ , а на наружную поверхность – упругий отпор вмещающего туннель массива горных пород  $q$  (рис. 1).

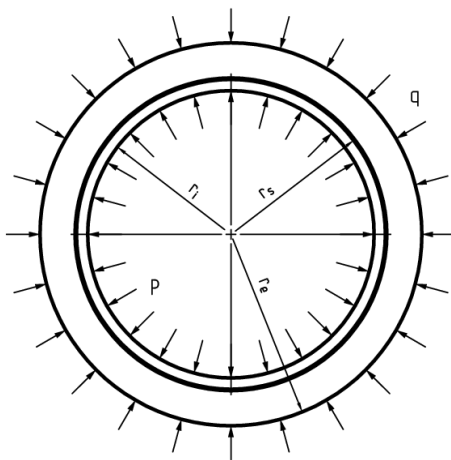


Рис. 1. Схема нагрузок на обделку напорного туннеля

Уравнение равновесия для сечения с трещиной железобетонной обделки напорного туннеля находящегося под действием внутреннего давления  $p$  можно записать в следующем виде

$$\sigma_s \cdot A_s + q \cdot r_e = p \cdot r_i, \quad (5)$$

где  $\sigma_s$  – напряжения в арматуре для сечения с трещиной.

Средние деформации кольцевой арматуры  $\varepsilon_s$  могут быть определены по формуле [2]

$$\varepsilon_s = \frac{\psi_s \cdot \sigma_s}{E_s}. \quad (6)$$

Коэффициент  $\psi_s$ , учитывающий работу растянутого бетона на участках между трещинами, можно найти, рассмотрев распределение напряжений в кольцевой арматуре на этих участках (рис. 2) [2]. Максимальное значение напряжений в арматуре  $\sigma_s$  имеет место в сечении с трещиной, а минимальное  $\sigma'_s$  – в сечении между трещинами.

Растягивающие напряжения в бетоне между трещинами  $\sigma_{bt}$  могут быть приняты постоянными по высоте сечения и равными средней прочности бетона при растяжении  $R_{btm}$  [3, 4]

$$R_{btm} = R_{btm} \cdot (1 + C_v \cdot Z_0), \quad (7)$$

где  $R_{btm}$  – нормативное сопротивление бетона растяжению, определяемое при односторонней доверительной вероятности  $\alpha = 0.95$ ;  $C_v =$

0.135 – коэффициент вариации прочности бетона;  $Z_0 = 1.645$  – нормированное значение распределенной по нормальному закону случайной величины, соответствующее  $\alpha = 0.95$ .

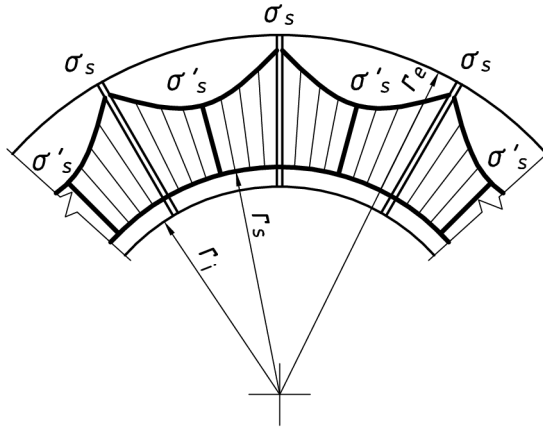


Рис. 2. Эпюра напряжений в кольцевой арматуре железобетонной обделки высоконапорного туннеля

Для сечения между трещинами уравнение равновесия имеет вид

$$\sigma'_s \cdot A_s + R_{bim} \cdot t_b + q \cdot r_e = p \cdot r_i, \quad (8)$$

где  $t_b$  – толщина железобетонного кольца, равная  $t_b = r_e - r_i$ .

Из уравнений (5) и (8) получим выражение для определения минимального напряжения в арматуре  $\sigma'_s$

$$\sigma'_s = \sigma_s - \frac{R_{bim} \cdot t_b}{A_s}. \quad (9)$$

Приняв эпюру распределения напряжений в арматуре между трещинами по квадратной параболе (рис. 2), средние напряжения в арматуре  $\sigma_{sm}$  могут быть найдены из выражения

$$\sigma_{sm} = \sigma_s - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{bim} \cdot t_b}{A_s}. \quad (10)$$

Тогда значение коэффициента  $\psi_s$  может быть определено по формуле

$$\psi_s = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{b\text{тм}} \cdot t_b}{A_s \cdot \sigma_s}. \quad (11)$$

Подставляя это выражение в (6), средние деформации кольцевой арматуры  $\varepsilon_s$  могут быть найдены следующим образом

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{b\text{тм}} \cdot t_b}{A_s \cdot \sigma_s} \right). \quad (12)$$

Полученным деформациям соответствуют средние радиальные перемещения арматуры  $u_s$ , равные

$$u_s = \varepsilon_s \cdot r_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{b\text{тм}} \cdot t_b}{A_s \cdot \sigma_s} \right) \cdot r_s. \quad (13)$$

Упругий отпор вмещающего туннель массива горных пород  $q$  может быть найден из следующих соображений. Пренебрегая радиальными деформациями бетона в силу их малости можно считать, что радиальные перемещения контура выработки равны средние радиальным перемещениям арматуры  $u_s$ . Тогда значение упругого отпора  $q$  равно

$$q = K_{or} \cdot \frac{u_s}{r_e}. \quad (14)$$

Учитывая (13), (14) и  $t_b = r_e - r_i$ , уравнение (5) может быть записано следующим образом

$$\sigma_s \cdot A_s + \sigma_s \cdot \frac{K_{or} \cdot r_s}{E_s} \cdot \left[ 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{b\text{тм}} \cdot (r_e - r_i)}{A_s \cdot \sigma_s} \right] = p \cdot r_i,$$

или в виде

$$\begin{aligned} \sigma_s \cdot E_s \cdot A_s^2 + (\sigma_s \cdot K_{or} \cdot r_s - p \cdot r_i \cdot E_s) \cdot A_s - \\ - \frac{2}{3} \cdot K_{or} \cdot R_{b\text{тм}} \cdot r_s \cdot (r_e - r_i) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Отсюда можно получить выражение для определения напряжений в арматуре для сечения с трещиной  $\sigma_s$

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_s \cdot A_s + K_{or} \cdot r_s} \cdot \left[ p \cdot r_i + \frac{2}{3} \cdot \frac{K_{or} \cdot r_s \cdot R_{b\text{тм}} \cdot (r_e - r_i)}{E_s \cdot A_s} \right]. \quad (16)$$

**Расчетная формула для определения площади сечения рабочей кольцевой арматуры в сечении железобетонной обделки напорно-**

**го туннеля.** Значения предельных расчетных напряжений  $\sigma_{su}$  согласно действующим нормам проектирования [1, 5 –7] могут быть определены по формулам

$$\sigma_{su} = R_s \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_{lc}}. \quad (17)$$

Для неизвестного значения площади сечения рабочей кольцевой арматуры  $A_s$  уравнение (15), принимая  $\sigma_s = \sigma_{su}$  в соответствии с (17), может быть переписано в виде

$$R_s \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_{lc}} \cdot E_s \cdot A_s^2 + \left( R_s \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_{lc}} \cdot K_{or} \cdot r_s - p \cdot r_i \cdot E_s \right) \cdot A_s - \frac{2}{3} \cdot K_{or} \cdot R_{bim} \cdot r_s \cdot (r_e - r_i) = 0. \quad (18)$$

Решая полученное квадратное уравнение (18), можно определить требуемую по условию прочности площадь сечения рабочей кольцевой арматуры  $A_s$

$$A_s = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot p \cdot r_i}{\gamma_c \cdot R_s} - \frac{K_{or} \cdot r_s}{E_s} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot p \cdot r_i}{\gamma_c \cdot R_s} - \frac{K_{or} \cdot r_s}{E_s} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot R_{bim} \cdot r_s \cdot (r_e - r_i)}{\gamma_c \cdot R_s}}. \quad (19)$$

При сравнительно большом значении приведенного коэффициента упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород  $K_{or}$  в случае, если

$$\frac{\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot p \cdot r_i}{\gamma_c \cdot R_s} < \frac{K_{or} \cdot r_s}{E_s},$$

значение площади сечения рабочей кольцевой арматуры следует принимать равной нулю, т.е.  $A_s = 0$ .

Если не учитывать работу растянутого бетона, т.е. принять  $R_{bim} = 0$ , а также принять  $r_s = r_i$ , выражение (19) совпадает с нормативной формулой (1).

Сравнение формул (1) и (19) показывает, что учет работы растянутого бетона между трещинами приводит к увеличению требуемой площади сечения рабочей кольцевой арматуры  $A_s$  для обеспечения прочности железобетонных обделок высоконапорных туннелей.

При двухрядном расположении арматуры в обделке туннеля согласно нормам проектирования [7] основную часть расчетной арматуры (60 – 70 %) следует располагать у внутренней поверхности обделки. При этом значение  $r_s$  необходимо принимать соответствующим центру тяжести сечений внутренней и наружной арматуры.

Отметим, что полученная по условию прочности площадь сечения кольцевой арматуры  $A_s$  по формуле (19) должна быть проверена по условию ограничения ширины раскрытия трещин. При этом следует использовать значение напряжения в кольцевой арматуре  $\sigma_s$ , определяемое по формуле (16).

Проведенный анализ показал, что при выполнении расчетов прочности железобетонных обделок высоконапорных туннелей необходимо использовать расчетные схемы, с большей жесткостью обделки, которая должна определяться с учетом работы растянутого бетона между трещинами.

### **Выводы**

1. Установлено, что растянутый бетон между трещинами оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонной обделки высоконапорного туннеля кругового очертания.

2. Показано, что при выполнении расчетов прочности железобетонных обделок высоконапорных туннелей необходимо использовать расчетные схемы, с большей жесткостью обделки, которая должна определяться с учетом работы растянутого бетона между трещинами.

3. Получена формула для определения на предварительных этапах проектирования площади сечения рабочей кольцевой арматуры в железобетонных обделках высоконапорных туннелей при расчетах на внутреннее давление воды.

1. П-780-83/Гидропроект. Пособие по проектированию сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений. – М. : Гидропроект, 1984. – 91 с.
2. Мурашев В. И., Сигалов Э. Е., Бойков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс. Под ред. Пастернака П. Л. Учебник для вузов. – М. : Госстройиздат, 1962. – 560 с.
3. Проектирование железобетонных конструкций: Справоч. Пособие / А. Б. Гольшев, В. Я. Бачинский, В. П. Полищук и др.; Под ред. А. Б. Гольшева. – К. : Будівельник, 1985. – 496 с.
4. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. – Харьков : Издательство “Гяжпромавтоматика”, 2008. – 304 с.
5. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения / Госстрой России. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 27 с.
6. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений /

Минэнерго СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 32 с. 7. СНиП 2.06.09-84 Туннели гидротехнические / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 19 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Рябенко А. А. (НУВХП)

---

**Vainberg O. I., Doctor of Engineering, Professor (PJSC  
“Ukrhydroproject”, Kharkiv)**

### **STRENGTH ANALYSIS OF THE POWER TUNNEL REINFORCED CONCRETE ENCASEMENT WITH A GLANCE TO CONCRETE BEHAVIOUR**

The engineering method of calculation of reinforced concrete lining of high-pressure tunnels of hydroelectric power plants and pumped storage power plants on the action of internal pressure of water is offered. The method is based on consideration of coupled deformation of bearing ring reinforcement, concrete between cracks and the massif of rocks containing the tunnel.

**Keywords: pressure tunnel, reinforced concrete lining, bearing ring reinforcement**

---

**Вайнберг О. І., д.т.н., професор (ПАТ “Укргідропроєкт”,  
м. Харків)**

### **РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ОБРОБЛЕННЯ НАПІРНОГО ТУНЕЛЯ З ВРАХУВАННЯМ РОБОТИ БЕТОНУ**

Пропонується інженерний метод розрахунку залізобетонних оброблень високонапірних тунелів ГЕС і ГАЕС на внутрішній тиск води. Метод заснований на розгляді спільної деформації робочої кільцевої арматури, бетону між тріщинами і масиву гірських порід, що вміщує тунель.

**Ключові слова: напірний тунель, залізобетонне оброблення, робоча кільцева арматура.**

---