



РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ НАПОРНОГО ТУННЕЛЯ С УЧЕТОМ РАБОТЫ БЕТОНА

Введение. Как показывает анализ мирового опыта гидротехнического строительства, напорные туннели являются наиболее широко применяемыми сооружениями, которые используются при возведении высоконапорных гидроузлов ГЭС и ГАЭС в качестве подводящих водоводов, элементов водосбросов и др. Согласно действующим нормам проектирования [8] поперечное сечение таких туннелей следует принимать кругового очертания. В общем случае вид несущей обделки напорного туннеля принимается в зависимости от расчетного напора и удельного отпора вмещающего туннель массива горных пород. При значительных напорах свыше 100 м нормы проектирования рекомендуют применять сталежелезобетонные обделки. Сталежелезобетонная обделка представляет собой один из видов комбинированной обделки с внутренней стальной оболочкой и наружным железобетонным кольцом, которое может быть с однорядным или двухрядным расположением арматуры.

На Рис. 1 для примера приведена конструкция сталежелезобетонной обделки подводящего туннеля Днестровской ГАЭС.

В соответствии с действующими нормами проектирования [2, 7, 8] для обоснования надежности и безопасности сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей выполняются расчеты их напряженно-деформированного состояния и прочности с учетом совместной работы обделки и вмещающего туннель массива горных пород в рамках решения плоской задачи. В результате таких расчетов определяется необходимая толщина стальной оболочки, площадь сечения рабочей кольцевой арматуры по условиям прочности обделки туннеля. Кроме того выполняются расчеты по определению ширины раскрытия трещин, результаты которых используются для

оценки долговечности бетона и арматуры в обделке.

Обеспечение надежности и безопасности сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей, согласно действующим нормам проектирования [2, 7, 8], должно обосновываться по результатам расчетов 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_w . Значение p_w в общем случае является суммой статического давления воды p_{st} , пульсационного давления p_p , давления гидравлического удара p_{rw} и сейсмического давления воды p_s , т. е.

$$p_w = p_{st} + p_p + p_{rw} + p_s$$

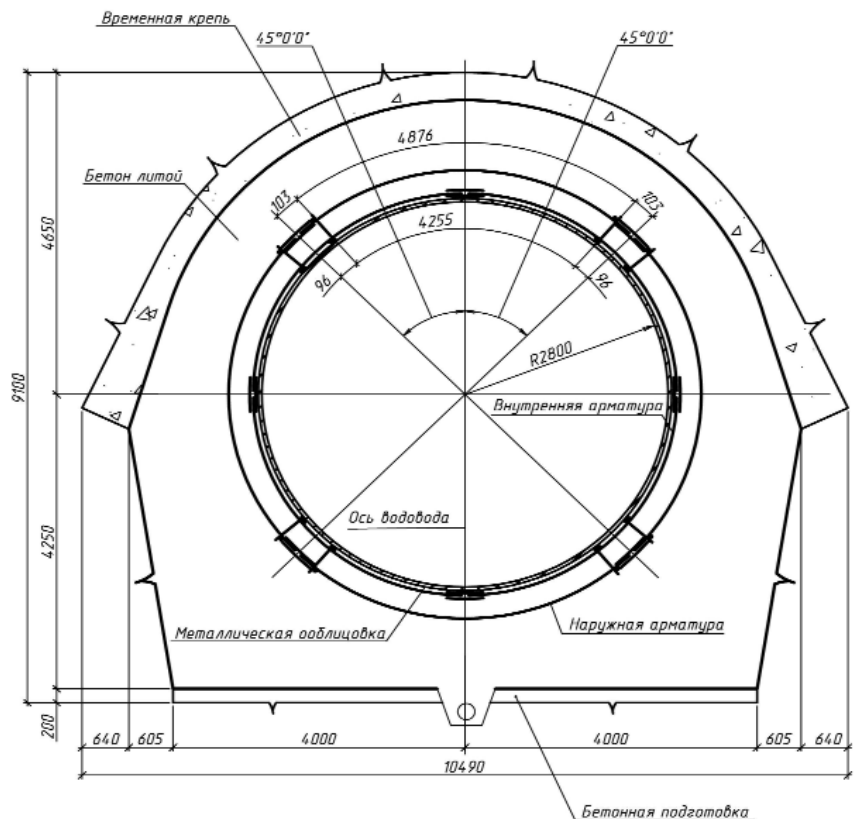


Рис. 1. Конструкция сталежелезобетонной обделки подводящего туннеля Днестровской ГАЭС



Статическое давление воды p_{st} , соответствующее 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_s является особой нагрузкой.

При выполнении расчетов сталежелезобетонных обделок напорных туннелей на внутреннее давление воды, в соответствии с рекомендациями действующих норм проектирования [8], считается, что в железобетонном кольце обделки возникают сквозные радиальные трещины и поэтому жесткость обделки должна приниматься равной жесткости металлического сечения (стальной оболочки и арматуры). 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 сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей на внутреннее давление воды с учетом повышенной реальной жесткости обделки.

Нормативный метод расчета сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей на внутреннее давление воды. Согласно действующим нормам проектирования [8] 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

$$A_s = \frac{\gamma_n \gamma_{lc} p_w r_i}{\gamma_c R_{st}} - \frac{A_{ss} R_y}{R_{st}} - \frac{K_{or} r_i}{E_s}, \quad (1)$$

где p_w — расчетное внутреннее давление воды; r_i — внутренний радиус обделки; R_{st} — расчетное сопротивление арматуры растяжению; A_{ss} — площадь сечения стальной оболочки на единицу длины туннеля, равная толщине этой оболочки, т. е.

$A_{ss} = t$; R_y — расчетное сопротивление стальной оболочки растяжению; E_s — модуль упругости арматуры; K_{or} — приведенный коэффициент удельного упругого отпора вмещающего туннель массива горных пород; γ_n — коэффициент надежности по назначению сооружения; γ_{lc} — коэффициент сочетания нагрузок; γ_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

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

где r_e — наружный радиус обделки; ρ — 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 ν — 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

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

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 сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей с учетом работы растянутого бетона между трещинами. Предлагаемая методика расчетов сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля на действие внутреннего



давления воды основана на следующих предположениях.

1. Поперечное сечение рассматриваемой обделки схематизируется в виде стальной оболочки, подкрепленной железобетонным кольцом с кольцевой арматурой.

2. При рассмотрении напряженно-деформированного состояния решается плоская задача с центральной симметрией (плоская деформация для стальной оболочки).

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

4. Считается, что деформации стальной оболочки и кольцевой арматуры являются упругими.

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

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

Расчеты выполняются на заданное внутреннее давление воды p_w .

Рассматриваемое поперечное сечение сталежелезобетонной обделки характеризуется следующими геометрическими размерами. Внутренний радиус обделки r_i , наружный радиус — r_e . На внутренней поверхности располагается стальная оболочка, площадь сечения которой на единицу длины туннеля составляет A_{ss} . В пределах железобетонного кольца обделки располагается рабочая кольцевая арматура, площадь сечения которой на 1 м длины туннеля составляет A_s , радиус окружности, на которой располагается ось этой кольцевой арматуры r_s .

Считаются известными физико-механические свойства стали оболочки (расчетное сопротивление растяжению R_y , модуль упругости E_s и коэффициент Пуассона ν_s), расчетное сопротивление растяжению арматуры R_{st} , а также нормативное сопротивление бетона растяжению R_{btm} . 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 металлических элементов сталежелезобетонной обделки напорного туннеля. Рассматривается напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной обделки напорного туннеля с однорядным расположением арматуры. При этом считается, что на внутреннюю поверхность обделки туннеля радиусом r_i действует давление воды p_w , а на наружную поверхность радиусом r_e — упругий отпор вмещающего туннель массива горных пород q_r (Рис. 2).

Под действием внутреннего давления воды в туннеле p_w в сечении арматуры с трещиной возникает растягивающее напряжение σ_s , а в сечении стальной оболочки — растягивающее напряжение σ_{ss} .

Рассмотрим напряжения и деформации в кольцевой арматуре и стальной оболочке.

Средние линейные относительные деформации кольцевой арматуры ϵ_s могут быть определены по формуле [3]

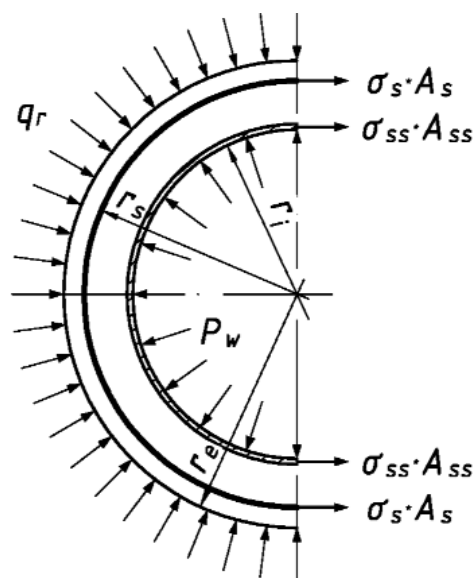


Рис. 2. Схема нагрузок на сталежелезобетонную обделку высоконапорного туннеля

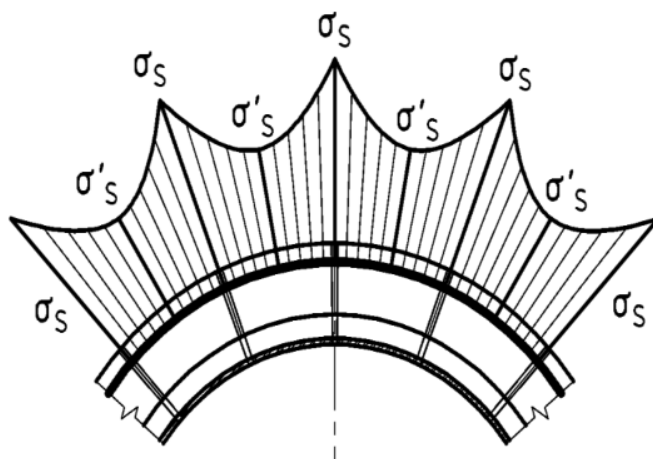


Рис. 3. Эпюра напряжений в кольцевой арматуре сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля



$$\varepsilon_s = \frac{\psi_s \sigma_s}{E_s}, \quad (5)$$

Входящий в эту формулу коэффициент ψ_s учитывает работу растянутого бетона на участках между трещинами. Его значение можно найти, рассмотрев распределение напряжений в кольцевой арматуре на этих участках (Рис. 3) [3 и др.] из следующих соображений.

Максимальное значение напряжений в арматуре σ_s имеет место в сечении с трещиной, а минимальное σ'_s – в сечении между трещинами.

В бетонном сечении между трещинами возникают растягивающие напряжения σ_{bt} , эпюра которых может быть принята прямоугольной, т.е. напряжения σ_{bt} постоянны по высоте этого сечения и равны средней прочности бетона при растяжении R_{btm} [1, 5]

$$R_{btm} = R_{btv} (1 + C_v Z_0), \quad (6)$$

где R_{btv} – 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 $\alpha = 0.95$.

Очевидно, можно записать

$$\sigma'_s A_s = \sigma_s A_s - R_{btm} (r_e - r_i).$$

Отсюда следует

$$\sigma'_s = \sigma_s - \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s}. \quad (7)$$

Приняв эпюру распределения напряжений в арматуре между трещинами по квадратной параболе (Рис. 3), средние напряжения в арматуре σ_{sm} могут быть найдены из выражения

$$\sigma_{sm} = \sigma_s - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s}. \quad (8)$$

Тогда значение коэффициента ψ_s равно

$$\psi_s = \frac{\sigma_{sm}}{\sigma_s} = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s \sigma_s}. \quad (9)$$

Подставляя полученное выражение для ψ_s в (5), найдем

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s \sigma_s} \right]. \quad (10)$$

Средним линейным относительным деформациям ε_s соответствуют радиальные перемещения кольцевой арматуры u_r , равные

$$u_r = \varepsilon_s r_s = \frac{r_s}{E_s} \left[\sigma_s - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s} \right].$$

Отсюда можно записать выражение для определения напряжения в арматуре σ_s в сечении с трещиной

$$\sigma_s = \frac{E_s u_r}{r_s} + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{btm} (r_e - r_i)}{A_s}. \quad (11)$$

Перейдем теперь к определению напряжений σ_{ss} .

Согласно 5-ой предпосылке, принятой в настоящей работе, считается, что радиальные перемещения стальной оболочки равны средним радиальным перемещениям кольцевой арматуры u_r . Соответствующие этим перемещениям линейные кольцевые относительные деформации стальной оболочки ε_{ss} , очевидно, равны

$$\varepsilon_{ss} = u_r / r_i. \quad (12)$$

Деформациям ε_{ss} соответствуют нормальные кольцевые напряжения в стальной оболочке σ_{ss} , которые, согласно закону Гука, равны

$$\sigma_{ss} = E_{ss} \varepsilon_{ss}, \quad (13)$$

где E_{ss} – приведенный модуль упругости материала оболочки, учитывающий ее работу в условиях плоской деформации. Значение E_{ss} может быть найдено по формуле

$$E_{ss} = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}. \quad (14)$$

На основании (12)–(14) можно записать формулу для определения нормальных кольцевых напряжений в стальной оболочке σ_{ss}

$$\sigma_{ss} = \frac{E_s u_r}{(1 - \nu_s^2) r_i}. \quad (15)$$

Упругий отпор q_r может быть найден по формуле

$$q_r = \frac{K_{or} u_r}{r_e}. \quad (16)$$

Таким образом, получены выражения (11), (15), (16) для определения кольцевых напряжений в арматуре σ_s и в стальной оболочке σ_{ss} , а также упругого отпора q_r в зависимости от средних радиальных перемещений u_r кольцевой арматуры, равных радиальным перемещениям стальной оболочки и контура выработки.

Значение радиальных перемещений u_r может быть найдено следующим образом.



Уравнение равновесия для сечения с трещиной железобетонной обделки напорного туннеля находящегося под действием внутреннего давления p_w можно представить в виде (Рис. 3)

$$\sigma_s A_s + \sigma_{ss} A_{ss} + q_r r_e = p_w r_i \quad (17)$$

Подставив в это уравнение выражения для σ_s , σ_{ss} , q_r в соответствии с (11), (15), (16), можно записать

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

Отсюда получим выражение для определения значения радиальных перемещений u_r

$$u_r = \frac{p_w r_i - \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i)}{E_s \left[\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]} \quad (18)$$

Подставив это выражение в формулы (11), (15), после несложных преобразований получим окончательные формулы для определения кольцевых напряжений в арматуре σ_s и в стальной оболочке σ_{ss}

$$\sigma_s = \frac{p_w r_i A_s + \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i) \left[\frac{A_{ss} r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or} r_s}{E_s} \right]}{A_s \left[\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]} \quad (19)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{(1 - \nu_s^2) r_i} \frac{p_w r_i - \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i)}{\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s}} \quad (20)$$

Расчетные формулы для определения площади сечения рабочей кольцевой арматуры в сечении сталежелезобетонной обделки напорного туннеля. При проектировании сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей обычно задаются толщиной стальной оболочки по условиям необходимой жесткости при производстве работ, транспортировании и возведении всей конструкции [4]. Кроме того, иногда толщину стальной оболочки назначают достаточно большой для того, чтобы создать железобетонное кольцо, приемлемое по условию размещения арматуры и производству работ. Поэтому расчеты сталежелезобетонных обделок высоконапорных туннелей сводятся к определению требуемой площади сечения

кольцевой арматуры при заданной толщине стальной оболочки.

При выполнении расчетов сталежелезобетонных обделок необходимо иметь в виду, что кольцевые напряжения в арматуре σ_s не должны превышать ее сопротивления растяжению R_{st} [6], а кольцевые напряжения в стальной оболочке σ_{ss} не должны превышать сопротивления растяжению этой оболочки R_y [4, 8]. Поэтому ниже отдельно рассматриваются условия прочности арматуры и стальной оболочки.

Для оценки прочности сталежелезобетонных обделок по условию прочности арматуры воспользуемся выражением (19), в котором заменим величину σ_s на величину R_{st} . Кроме того, введем нормативные коэффициенты $\gamma_n, \gamma_{lc}, \gamma_c$

$$R_{st} = \frac{\gamma_n \gamma_{lc} p_w r_i A_s + \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i) \left[\frac{A_{ss} r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or} r_s}{E_s} \right]}{A_s \left[\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1 - \nu_s^2) r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]}$$

Это уравнение может быть приведено к виду

$$A_s^2 - p A_s - q = 0 \quad (21)$$

Здесь

$$p = \frac{\gamma_n \gamma_{lc} p_w r_i}{\gamma_c R_{st}} - \frac{A_{ss} r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} - \frac{K_{or} r_s}{E_s} \quad (22)$$

$$q = \frac{2}{3} \frac{R_{btm}}{R_{st}} R_{btm} (r_e - r_i) \left[\frac{A_{ss} r_s}{(1 - \nu_s^2) r_i} - \frac{K_{or} r_s}{E_s} \right] \quad (23)$$

Решая квадратное уравнение (21) можно определить требуемую по условию прочности рабочей кольцевой арматуры площадь ее сечения A_s

$$A_s = \frac{p}{2} + \sqrt{\frac{p^2}{4} + q} \quad (24)$$

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

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

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

Для оценки прочности сталежелезобетонных обделок по условию прочности стальной оболочки воспользуемся выражением (20), в котором заменим величину σ_{ss} на величину R_y . Кроме того, введем нормативные коэффициенты $\gamma_n, \gamma_{lc}, \gamma_c$



$$R_y = \frac{1}{(1-v_s^2)r_i} \frac{\frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} p_w r_i - \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i)}{\frac{A_s}{r_s} + \frac{A_{ss}}{(1-v_s^2)r_i} + \frac{K_{or}}{E_s}}$$

Из этого уравнения можно определить площадь сечения рабочей кольцевой арматуры A_s по условию прочности стальной оболочки

$$A_s = \frac{r_s}{(1-v_s^2)r_i R_y} \left[\frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} p_w r_i - \frac{2}{3} R_{btm} (r_e - r_i) \right] - r_s \left[\frac{A_{ss}}{(1-v_s^2)r_i} + \frac{K_{or}}{E_s} \right]. \quad (25)$$

Окончательно принимается большее из двух значений, определенных по формулам (24) и (25).

При двухрядном расположении арматуры в обделке туннеля согласно нормам проектирования [8] 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 условиям прочности площадь сечения кольцевой арматуры A_s должна быть проверена по условию ограничения ширины раскрытия трещин. При этом следует использовать значение напряжения в кольцевой арматуре σ_s , определяемое по формуле (19).

Проведенный анализ показал, что при выполнении расчетов прочности сталежелезобетонных 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 сталежелезобетонной обделки высоконапорного туннеля кругового очертания.

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

3. Получены формулы для определения на предварительных этапах проектирования площади сечения рабочей кольцевой арматуры в сталежелезобетонных обделках высоконапорных туннелей при расчетах на внутреннее давление воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вайнберг А.И.* Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. — Харьков: Издательство "Тяжпромавтоматика", 2008. — 304 с.
2. *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 "Укразбудінформ", 2010. — 37 с.
3. *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.
4. *П-780-83/Гидропроект.* Пособие по проектированию сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений. — М.: Гидропроект, 1984. — 91 с.
5. *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.
6. *СНиП 2.06.08-87.* Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений / Минэнерго СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. — 32 с.
7. *СНиП 33-01-2003.* Гидротехнические сооружения. Основные положения / Госстрой России. — М.: ФГУП ЦПП, 2004. — 27 с.
8. *СНиП 2.06.09-84* Туннели гидротехнические / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 19 с.

