



УДК 627.844

ВАЙНБЕРГ А.И., докт. техн. наук,
РЫЖИКОВ К.О., инж.,
ПАО "Укрэнергопроект"



ВАЙНБЕРГ А.И.



РЫЖИКОВ К.О.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКО-НАПОРНЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВОДОВОДОВ ГЭС И ГАЭС

Сталежелезобетонные водоводы, являющиеся эффективными и надежными конструкциями, широко используются в высоконапорных гидроузлах. Такие водоводы применены в качестве турбинных водоводов Красноярской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, Чиркейской ГЭС, Бурейской ГЭС, Загорской ГАЭС, Кайшадорской ГАЭС и др.

Согласно действующим нормам проектирования гидротехнических сооружений [1] для обоснования их надежности и безопасности и, в частности, сталежелезобетонных водоводов, должны выполняться расчеты напряженно-деформированного состояния этих конструкций.

Наряду с внутренним давлением воды важнейшим фактором, определяющим напряженно-деформированное состояние, сталежелезобетонного водовода в эксплуатационный период, являются температурные воздействия. Именно температурные воздействия вызвали значительное раскрытие трещин в сталежелезобетонных водоводах Бурейской ГЭС, что потребовало проведения ремонтных работ. На сталежелезобетонных водоводах Загорской ГАЭС также имеют место значительное раскрытие трещин, связанное с влиянием низких температур. Особое влияние оказывают температурные воздействия на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных водоводов при их работе в кольцевом направлении на внутреннее давление воды. Отметим, что в действующих нормах проектирования [2] отсутствуют указания по учету температурных воздействий при расчетах сталежелезобетонных водоводов на внутреннее давление воды. Проектирование сталежелезобетонных водоводов Каневской ГАЭС в Украине и Ленинградской ГАЭС в России (Рис. 1) требует совершенствования су-

ществующих методов расчета прочности таких конструкций.

В настоящей статье предлагается методика расчетов по определению напряженного состояния находящихся под действием внутреннего давления сталежелезобетонных водоводов с двойной кольцевой арматурой в эксплуатационный период с учетом особенностей взаимодействия всех элементов конструкции и температурных воздействий.

Особенности конструкций сталежелезобетонных водоводов. В зависимости от условий применения высоконапорные сталежелезобетонные водоводы могут иметь различные конструктивные особенности, связанные с их опиранием на основание.

Сталежелезобетонный водовод может использоваться как турбинный водовод приплотинного здания ГЭС, расположенного за бетонной плотиной. В этом случае такой водовод, располагаемый непосредственно на низовой грани плотины, устраивается неразрезным и работает преимущественно в поперечном направлении.

Устраиваемые на склонах сталежелезобетонные водоводы могут применяться в качестве станционных водоводов деривационных ГЭС и ГАЭС.

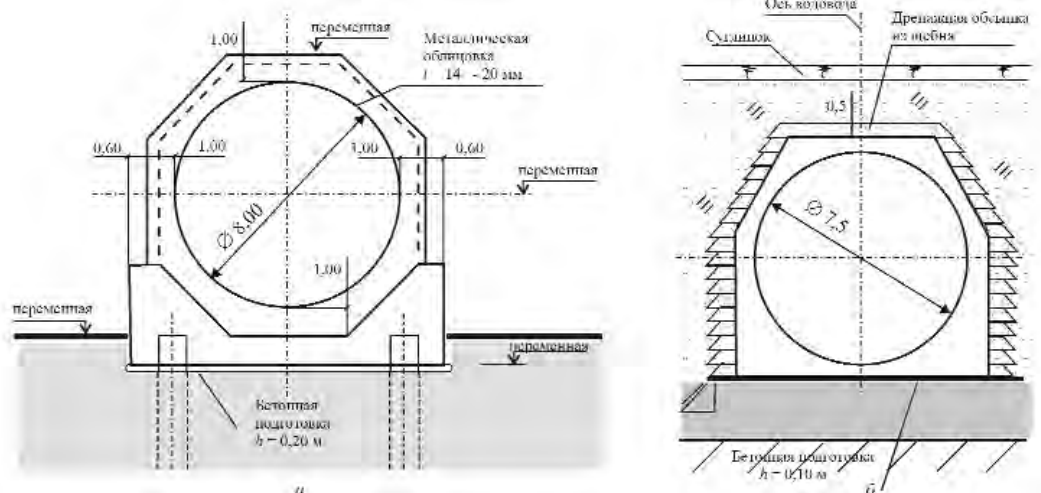


Рис. 1. Поперечные сечения сталежелезобетонных водоводов Каневской (а) и Ленинградской (б) ГАЭС



Для предотвращения возникновения опасных напряжений вследствие неравномерных осадок и температурных воздействий такие водоводы разрезаются конструктивными температурно-осадочными швами на секции. Каждая из секций водовода опирается на опоры той или иной конструкции. В конструктивных швах между секциями устраиваются компенсаторы, конструкции которых зависят от значений относительных перемещений соседних секций. Разрезанные на секции сталежелезобетонные водоводы работают как в поперечном, так и в продольном направлении.

В поперечном сечении сталежелезобетонный водовод представляет собой железобетонную оболочку, подкрепленную с внутренней стороны стальной оболочкой. Форма такой оболочки близка к кольцу с незначительными отклонениями. В пределах железобетонной оболочки размещается рабочая кольцевая арматура. Может использоваться однорядное и двухрядное армирование железобетонной оболочки кольцевой арматурой. Кроме того в железобетонной оболочке обязательно предусматривается продольная арматура, назначение которой распределение усилий между элементами кольцевой арматуры, а также восприятие продольных усилий в случае работы водовода в продольном направлении.

Особенности формирования термического режима и напряженного состояния сталежелезобетонных водоводов. Одним из важнейших факторов, определяющих напряженное состояние сталежелезобетонных водоводов, является их термический режим.

Формирование термического режима начинается в момент окончания монтажа стальных элементов водовода (арматуры и стальной оболочки). После окончания бетонирования происходит повышение температуры в пределах железобетонной оболочки вследствие гидратации цемента. При этом изменение температурного поля связано с интенсивностью тепловыделения свежесложенного бетона и с колебаниями температуры окружающего воздуха, а также температуры воздуха внутри водовода.

После прекращения тепловыделения происходит рассеяние тепла и понижение температуры в пределах железобетонной оболочки под влиянием более низкой температуры воздуха.

Термический режим водовода резко изменяется после заполнения его водой, когда температурное поле в сечении водовода в основном определяется колебаниями температуры окружающего воздуха и температуры воды внутри водовода. В результате формируется термический режим водовода, соответствующий эксплуатационному периоду.

Напряженное состояние сталежелезобетонного водовода начинает формироваться в момент окончания монтажа стальных элементов и бетонирования железобетонной оболочки. При этом можно считать, что в момент начала бетонирования напряжения в металлических элементах отсутствуют.

Изменяющийся, вследствие тепловыделения твердеющего бетона, термический режим вызывает появление температурных напряжений в бетоне и в металлических элементах водовода. В дальнейшем по мере остывания водовода происходит изменение напряжений в бетоне и металлических элементах. При этом обычно напряжения в бетоне не превышают его предела прочности на растяжение, а напряжения в арматуре и стальной оболочке редко превосходят 20–30 МПа.

Наиболее существенное изменение напряженного состояния происходит в эксплуатационный период после заполнения водовода и приложения внутреннего давления. При этом вследствие появления радиальных трещин в бетоне резко изменяется статическая схема работы конструкции. В этих условиях внутреннее давление воды воспринимается стальной оболочкой и кольцевой арматурой, а бетон между трещинами выполняет роль радиальных связей между металлическими элементами водовода. Кроме того, на напряжения в рабочей кольцевой арматуре и в стальной оболочке существенное влияние оказывают температурные воздействия, возникающие вследствие сезонных колебаний температуры внешнего воздуха и температуры воды в водоводе. Значения температурных напряжений в арматуре и стальной оболочке зависят от изменяющихся во времени температур в этих элементах водовода.

Анализ напряженного состояния сталежелезобетонных водоводов в эксплуатационный период позволяет отметить следующие особенности.

Напряжения в кольцевой арматуре для сечения с трещиной всегда оказываются значительно более высокими, чем для сечения между трещинами (Рис. 2). Это связано с развитием растягивающих напряжений в бетоне между трещинами, вследствие сцепления растянутой арматуры с бетоном. Очевидно, что значения этих напряжений не могут превышать предела прочности бетона при растяжении. Форма эпюры растягивающих напряжений в бетоне для сечения между трещинами близка к прямоугольной ввиду того, что обычно толщина железобетонного кольца водовода существенно меньше его диаметра.

Кольцевые напряжения в стальной оболочке мало изменяются по кольцевому направлению ввиду относительно небольшой площади сцепления бетона со стальной оболочкой.



Если расположенная на опорах секция водовода работает в продольном направлении, при определении ее напряженного состояния необходимо учитывать действие продольных изгибающих моментов и поперечных сил, которые вызывают напряжения в продольной арматуре, а также дополнительные напряжения в кольцевой арматуре и, в оболочке.

В настоящей работе исследуется напряженное состояние сталежелезобетонного водовода с двухрядной кольцевой арматурой в эксплуатационный период без учета работы водовода в продольном направлении.

Определение термического режима сталежелезобетонного водовода в эксплуатационный период. Термический режим сталежелезобетонного водовода в эксплуатационный период определяется сезонными колебаниями температуры окружающего воздуха и воды в водоводе. Распределение температур в сечении водовода в существенной мере зависит от формы и размеров его поперечного сечения, а также от условий распространения тепла в зоне опирания водовода. Наибольшее влияние термического режима водовода на его напряженное состояние имеет место в верхней части водовода вблизи его контакта с воздухом.

Ввиду сравнительно небольшой толщины железобетонной оболочки по сравнению с ее диаметром, пренебрегая отклонениями наружного контура бетона от окружности, для определения термического режима водовода целесообразно рассматривать одномерную стационарную задачу теплопроводности в полярных координатах. Соответствующее уравнение теплопроводности имеет вид [3 и др.]

$$\frac{dT^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0, \quad (1)$$

где T – температура в точке с координатой r .

При решении этого уравнения должны быть соблюдены следующие граничные условия.

На внутренней поверхности стальной оболочки (на контакте с водой) радиуса r_{ss} должны соблюдаться граничные условия первого рода

$$T|_{r=r_{ss}} = T_w, \quad (2)$$

где T_w – расчетная температура воды в водоводе в рассматриваемый момент времени.

На наружной поверхности водовода (на контакте с наружным воздухом) радиуса r_e должны соблюдаться граничные ус-

ловия третьего рода (конвективного теплообмена)

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_i} = \beta (T|_{r=r_i} - T_{ae}), \quad (3)$$

где λ – теплопроводность бетона, значение которой может быть принято согласно нормам проектирования [4]; T_{ae} – эквивалентная температура воздуха, которая определяется с учетом солнечной радиации (инсоляции) по методике, предложенной в работе [5]

$$T_{ae} = T_a + \frac{\epsilon_c}{\beta} S_{\max}, \quad (4)$$

T_a – температура наружного воздуха; ϵ_c – степень черноты бетонной поверхности, значение ϵ_c может быть принято равным 0.7; S_{\max} – интенсивность суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации, которая зависит от широты района расположения конструкции сооружения и от времени года, ориентации поверхности конструкции или сооружения относительно сторон света, угла наклона поверхности сооружения к горизонту, значение S_{\max} может быть принято согласно нормам проектирования [6]; β – расчетный коэффициент теплоотдачи равный

$$\beta = \beta_{con} + \beta_{rad}; \quad (5)$$

β_{con} – коэффициент теплоотдачи конвекцией, значение β_{con} может быть принято согласно нормам проектирования [4]; β_{rad} – коэффициент теплоотдачи излучением равный

$$\beta_{rad} = 3,32 (\epsilon_c + 1) \frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ C}, \quad (6)$$

Решение указанной задачи теплопроводности может быть записано в виде

$$T = T_w - \frac{T_w - T_{ae}}{\frac{\lambda}{\beta r_e} + \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right). \quad (7)$$

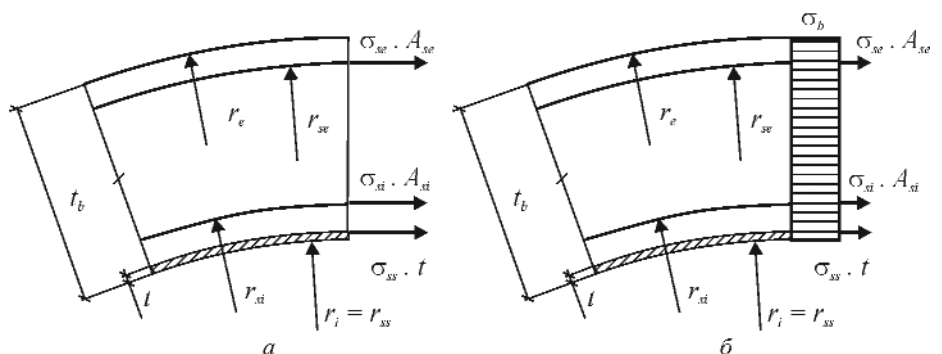


Рис. 2. Усилия в радиальных сечениях сталежелезобетонного водовода а – сечение с трещиной; б – сечение между трещинами

Рис. 4. Схема поперечного сечения сталежелезобетонного водовода с двухрядным армированием



9. Как и при рассмотрении работы обычных железобетонных конструкций учитывается совместная работа кольцевой арматуры и бетона между трещинами.

Рассматриваемое поперечное сечение водовода (железобетонное кольцо, подкрепленное стальной оболочкой) характеризуется следующими геометрическими размерами. Внутренний радиус водовода r_i , наружный радиус водовода r_e , толщина стальной оболочки t , радиус срединной поверхности оболочки r_{ss} , значение которого без большой погрешности может быть принято равным внутреннему радиусу водовода, т.е. $r_{ss} = r_i$. Вблизи стальной оболочки располагается внутренняя кольцевая арматура, имеющая площадь сечения на 1 м длины водовода, равную A_{si} , радиус окружности, на которой располагается ось этой арматуры r_{si} . Вблизи наружной поверхности кольца располагается наружная кольцевая арматура, имеющая площадь сечения на 1 м длины водовода, равную A_{se} , радиус окружности, на которой располагается ось этой арматуры r_{se} .

Считаются известными физико-механические характеристики стали арматуры: модуль упругости E_s , коэффициент Пуассона ν_s , коэффициент линейного температурного расширения α_s . Эти характеристики должны приниматься для арматуры.

Что касается стальной оболочки, то ее физико-механические характеристики (приведенные значения модуля упругости E_{ss} , коэффициента Пуассона ν_{ss} и коэффициента линейного температурного расширения α_{ss}) принимаются в зависимости от условий работы.

При наличии компенсаторов водовод может свободно перемещаться в продольном направлении и деформирование стальной оболочки может рассматриваться в условиях плоского напряженного состояния. В этом случае

$$E_{ss} = E_s, \quad \nu_{ss} = \nu_s, \quad \alpha_{ss} = \alpha_s. \quad (9)$$

В случае жесткого защемления водовода в основании при отсутствии продольных перемещений стальная оболочка, в отличие от арматуры, находится в условиях плоской деформации и для ее материала используются приведенные значения модуля упругости E_{ss} , коэффициента Пуассона ν_{ss} и коэффициента линейного температурного расширения α_{ss} , которые могут быть найдены по формулам [7 и др.]

$$E_{ss} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2}, \quad \nu_{ss} = \frac{\nu_s}{1-\nu_s^2}, \quad \alpha_{ss} = (1+\nu_s)\alpha_s. \quad (10)$$

Считается, что на сталежелезобетонный водовод действует давление воды p , приложенное к внутренней поверхности стальной оболочки. Давление p является суммой статического давления p_{st} , пульсационного давления p_p и давления гидравлического удара p_{wh} , т. е. $p = p_{st} + p_p + p_{wh}$.

Учитываются температурные воздействия в виде расчетных перепадов температур для стальной оболочки ΔT_{ss} , внутренней ΔT_{si} и наружной ΔT_{se} кольцевой арматуры. При этом рассматриваются значения перепадов температур отдельно для зимнего ($\Delta T_{ss,w}$, $\Delta T_{si,w}$, $\Delta T_{se,w}$) и летнего ($\Delta T_{ss,s}$, $\Delta T_{si,s}$, $\Delta T_{se,s}$) периодов. Следует отметить, что в зимний период $\Delta T_{ss,w} > \Delta T_{si,w} > \Delta T_{se,w}$, а в летний период $\Delta T_{ss,s} < \Delta T_{si,s} < \Delta T_{se,s}$.

Основные уравнения для определения напряжений в элементах сталежелезобетонного водовода. В результате действия внутреннего давления воды и температурных перепадов в элементах сталежелезобетонного водовода возникают следующие напряжения:

- во всех радиальных сечениях стальной оболочки нормальные кольцевые напряжения σ_{ss} , которые в соответствии с принятой предпосылкой 4 считаются постоянными по кольцевому направлению, т.е. одинаковыми для сечений с трещинами и сечений между трещинами;

- для радиальных сечений водовода с трещинами нормальные напряжения во внутренней σ_{si} и наружной σ_{se} кольцевой арматуре (Рис. 2, а);

- для радиальных сечений водовода между трещинами нормальные напряжения во внутренней σ'_{si} и наружной σ'_{se} кольцевой арматуре, а также растягивающие напряжения в бетоне σ_b , эпюра которых, как уже указывалось выше, может быть принята прямоугольной (Рис. 2, б).

Значения всех указанных напряжений σ_{ss} , σ_{si} , σ_{se} , σ'_{si} , σ'_{se} , σ_b подлежат определению. Запишем уравнение равновесия для любого радиального сечения водовода с трещиной (Рис. 2 а)

$$\sigma_{ss} t + \sigma_{si} A_{si} + \sigma_{se} A_{se} = p r_{ss}. \quad (11)$$

Уравнение равновесия для радиального сечения между трещинами имеет вид (Рис. 2 б)

$$\sigma_{ss} t + \sigma'_{si} A_{si} + \sigma'_{se} A_{se} + \sigma_b t_b = p r_{ss}, \quad (12)$$

где t_b – толщина железобетонного кольца, значение которой, пренебрегая толщиной стальной оболочки, равно

$$t_b = r_e - r_{ss}. \quad (13)$$

Перейдем к определению деформаций в металлических элементах водовода.



Относительные линейные кольцевые деформации в стальной оболочке ϵ_{ss} могут быть найдены по формуле

$$\epsilon_{ss} = \frac{\sigma_{ss}}{E_{ss}} + \alpha_{ss} \Delta T_{ss} \quad (14)$$

Средние значения относительных линейных деформаций во внутренней ϵ_{si} и наружной ϵ_{se} кольцевой арматуре могут быть определены из следующих соображений.

Как это принято в теории железобетона [8 и др.], вид эпюр напряжений в арматуре может быть принят в соответствии с Рис. 5.

Изменение напряжений, возникающих в рабочей арматуре между трещинами, целесообразно принять в соответствии с законом квадратной параболы. В этом случае выражения для определения средних значений линейных относительных деформаций во внутренней ϵ_{si} и наружной ϵ_{se} кольцевой арматуре можно записать в виде

$$\epsilon_{si} = \frac{\sigma_{si} + 2\sigma'_{si}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{si}, \quad (15)$$

$$\epsilon_{se} = \frac{\sigma_{se} + 2\sigma'_{se}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{se}. \quad (16)$$

Полученным относительным деформациям соответствуют радиальные перемещения стальной оболочки u_{ss} и средние радиальные перемещения внутренней u_{si} и наружной u_{se} кольцевой арматуры

$$u_{ss} = \epsilon_{ss} r_{ss} = \left(\frac{\sigma_{ss}}{E_{ss}} + \alpha_{ss} \Delta T_{ss} \right) r_{ss}, \quad (17)$$

$$u_{si} = \epsilon_{si} r_{si} = \left(\frac{\sigma_{si} + 2\sigma'_{si}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{si} \right) r_{si}, \quad (18)$$

$$u_{se} = \epsilon_{se} r_{se} = \left(\frac{\sigma_{se} + 2\sigma'_{se}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{se} \right) r_{se}. \quad (19)$$

Для найденных радиальных перемещений,

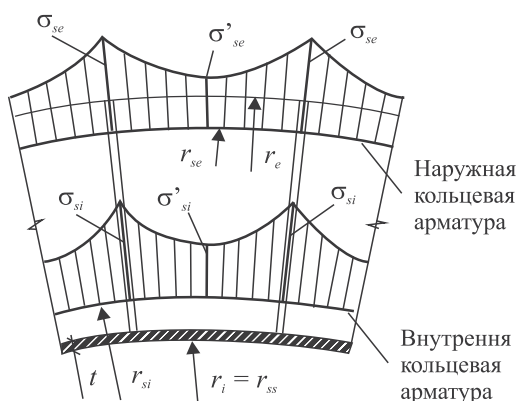


Рис. 5. Эпюры напряжений в кольцевой арматуре сталежелезобетонного водовода

пренебрегая сжимающими деформациями в участках бетона между трещинами, может быть записано уравнение совместности деформаций в виде

$$u_{ss} = u_{si} = u_{se}. \quad (20)$$

В соответствии с этим уравнением можно записать

$$\left(\frac{\sigma_{ss}}{E_{ss}} + \alpha_{ss} \Delta T_{ss} \right) r_{ss} = \left(\frac{\sigma_{si} + 2\sigma'_{si}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{si} \right) r_{si}, \quad (21)$$

$$\left(\frac{\sigma_{ss}}{E_{ss}} + \alpha_{ss} \Delta T_{ss} \right) r_{ss} = \left(\frac{\sigma_{se} + 2\sigma'_{se}}{3E_s} + \alpha_s \Delta T_{se} \right) r_{se}. \quad (22)$$

Для оценки соотношения напряжений в кольцевой арматуре для сечения между трещинами σ'_{si} , σ'_{se} и для сечения с трещиной σ_{si} , σ_{se} естественно принять гипотезу, в соответствии с которой уменьшение усилия во внутренней (или наружной) арматуре для сечения с трещинами пропорционально усилию в этой арматуре для сечения между трещинами. Это позволяет для внутренней арматуры записать

$$(\sigma_{si} - \sigma'_{si}) A_{si} = \frac{\sigma_{si} A_{si}}{\sigma_{si} A_{si} + \sigma_{se} A_{se}} \sigma_b t_b.$$

Отсюда следует выражение для определения напряжений во внутренней арматуре σ'_{si} для сечения между трещинами

$$\sigma'_{si} = \sigma_{si} \left(1 - \frac{\sigma_b t_b}{\sigma_{si} A_{si} + \sigma_{se} A_{se}} \right),$$

или, учитывая (11), можно записать

$$\sigma'_{si} = \sigma_{si} \left(1 - \frac{\sigma_b t_b}{p r_{ss} - \sigma_{ss} t} \right). \quad (23)$$

Аналогично может быть получено выражение для определения напряжений в наружной арматуре σ'_{se} для сечения между трещинами

$$\sigma'_{se} = \sigma_{se} \left(1 - \frac{\sigma_b t_b}{p r_{ss} - \sigma_{ss} t} \right). \quad (24)$$

Подставляя выражения (23), (24) в уравнение равновесия (12) с учетом (11), нетрудно убедиться, что он тождественно удовлетворяется.

Таким образом, если известно значение напряжения в бетоне для сечения между трещинами σ_b , могут быть определены напряжения в металлических элементах водовода σ_{ss} , σ_{si} , σ_{se} , σ'_{si} , σ'_{se} . Для этого необходимо решить систему уравнений, включающую уравнение равновесия (11), два уравнения совместности деформаций (21), (22) и два уравнения связи напряжений в арматуре для сечения между трещинами с напряжениями



ми в арматуре для сечения с трещиной (23), (24). В результате решения этой системы уравнений получены следующие выражения для определения напряжений в стальной оболочке σ_{ss} , а также напряжений во внутренней σ_{si} и в наружной σ_{se} кольцевой арматуре для сечения с трещиной

$$\sigma_{ss} = \frac{1}{t_r} \left[(p + p_T) r_{ss} - \frac{2}{3} \sigma_b t_b \right], \quad (25)$$

$$\sigma_{si} = \left[\frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{si}} (\sigma_{ss} + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss}) - \alpha_s E_s \Delta T_{si} \right] A_1, \quad (26)$$

$$\sigma_{se} = \left[\frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{se}} (\sigma_{ss} + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss}) - \alpha_s E_s \Delta T_{se} \right] A_1, \quad (27)$$

В этих выражениях t_r – приведенная толщина стальной оболочки, определяемая с учетом параметров кольцевой арматуры по формуле

$$t_r = t + \frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{se} r_{si}} (A_{se} r_{si} + A_{si} r_{se}); \quad (28)$$

p_T – приведенное внутреннее давление воды, соответствующее температурным воздействиям, значение которого определяется из выражения

$$p_T = \frac{\alpha_s E_s}{r_{ss}} (\Delta T_{se} A_{se} + \Delta T_{si} A_{si}) - \frac{\alpha_{ss} E_s \Delta T_{ss}}{r_{se} r_{si}} (A_{se} r_{si} + A_{si} r_{se}); \quad (29)$$

A_1 – параметр, равный

$$A_1 = \frac{p r_{ss} - \sigma_{ss} t_{ss}}{p r_{ss} - \sigma_{ss} t_{ss} - \frac{2}{3} \sigma_b t_b}. \quad (30)$$

По известным напряжениям во внутренней σ_{si} и в наружной σ_{se} кольцевой арматуре для сечения с трещиной могут быть найдены напряжения во внутренней σ_{si} и в наружной σ_{se} кольцевой арматуре для сечения между трещинами по формулам (23), (24).

Определение напряжений в бетоне для сечения между трещинами. Как показано выше для определения напряжений в стальных элементах водоводов необходимо знать значения напряжений в бетоне для сечения между трещинами σ_b . При определении этих напряжений необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1) Значения напряжений в бетоне для сечения между трещинами σ_b для наименее благоприятного расчетного случая не должно превышать прочности бетона при растяжении. При этом по условию прочности кольцевой арматуры с некоторым запасом следует учитывать среднюю проч-

ность бетона при растяжении R_{btm} , значение которой может быть найдено по формуле [9 и др.]

$$R_{btm} = R_{btm}(1 + C_v Z_0), \quad (31)$$

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 $\alpha = 0,95$.

Следует отметить, что во многих случаях нормальной эксплуатации сталежелезобетонных водоводов значения напряжений σ_b могут быть меньше значения R_{btm} .

2) При $\sigma_b < R_{btm}$ в сечении между трещинами относительные растягивающие деформации в арматуре ε'_s не могут быть меньше относительных растягивающих деформаций в бетоне ε_b , т.е. в предельном случае имеет место условие $\varepsilon'_s = \varepsilon_b$.

Такое условие для внутренней кольцевой арматуры может быть записано в виде

$$\frac{\sigma'_{si}}{E_s} + \alpha_s \Delta T_{si} = \frac{\sigma_b}{E_b} + \alpha_b \Delta T_{si}.$$

Подставив в это условие выражение для определения σ'_{si} (23) с учетом (25) и (26) после несложных, но громоздких преобразований, можно получить квадратное уравнение

$$a_i \sigma_b^2 - b_i \sigma_b + c_i = 0, \quad (32)$$

где

$$a_i = \frac{2}{3} t_b \left[\frac{E_s}{E_b} \left(1 - \frac{t}{t_r} \right) + \frac{E_s r_{ss} t_b}{E_{ss} r_{si} t_r} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_r} \right) \right], \quad (33)$$

$$b_i = \left(\frac{E_s}{E_b} + \frac{2}{3} \frac{E_s r_{ss} t_b}{E_{ss} r_{si} t_r} \right) \left[p - \frac{t}{t_r} (p + p_T) \right] r_{ss} - \frac{t_b}{3} \left[\alpha_s + 2 \alpha_b \left(1 - \frac{t}{t_r} \right) \right] E_s \Delta T_{si} +$$

$$+ t_b \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_r} \right) \frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{si}} \left[\frac{r_{ss}}{t_r} (p + p_T) + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss} \right], \quad (34)$$

$$c_i = \left[\frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{si}} \left[\frac{r_{ss}}{t_r} (p + p_T) + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss} \right] - \alpha_b E_s \Delta T_{si} \right] \times \left[p - \frac{t}{t_r} (p + p_T) \right] r_{ss}. \quad (35)$$

Меньший корень уравнения (32) представляет собой выражение для определения напряжений σ_b .



$$\sigma_b = \frac{b_i - \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i} \quad (36)$$

Аналогично может быть получено выражение для определения напряжений σ_b для наружной кольцевой арматуры

$$\sigma_b = \frac{b_e - \sqrt{b_e^2 - 4a_e c_e}}{2a_e} \quad (37)$$

где

$$a_e = \frac{2}{3} t_b \left[\frac{E_s}{E_b} \left(1 - \frac{t}{t_r} \right) + \frac{E_{ss} r_{ss} t_b}{E_{ss} r_{se} t_r} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_r} \right) \right], \quad (38)$$

$$b_e = \left(\frac{E_s}{E_b} + \frac{2}{3} \frac{E_s r_{ss} t_b}{E_{ss} r_{se} t_r} \right) \left[p - \frac{t}{t_r} (p + p_T) \right] r_{ss} - \frac{t_b}{3} \left[\alpha_s + 2\alpha_b \left(1 - \frac{t}{t_r} \right) \right] E_s \Delta T_{se} + t_b \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_r} \right) \frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{se}} \left[\frac{r_{ss}}{t_r} (p + p_T) + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss} \right], \quad (39)$$

$$c_e = \left[\frac{E_s r_{ss}}{E_{ss} r_{se}} \left[\frac{r_{ss}}{t_r} (p + p_T) + \alpha_{ss} E_{ss} \Delta T_{ss} \right] - \alpha_b E_s \Delta T_{se} \right] \times \left[p - \frac{t}{t_r} (p + p_T) \right] r_{ss}, \quad (40)$$

Расчетное значение напряжений в бетоне для сечения между трещинами σ_b принимается меньшим из вычисленных значений по формулам (36) и (37). Если это значение σ_b превышает среднюю прочность бетона при растяжении R_{btm} , значение которой может быть найдено по формуле (31), окончательно в расчет следует принять $\sigma_b = R_{btm}$.

Последовательность расчетов по определению напряжений в элементах сталежелезобетонного водовода. Для выполнения этих расчетов необходимо следующие исходные данные.

1. Геометрические данные: внутренний радиус водовода r_i ; наружный радиус водовода r_e ; толщина стальной оболочки t ; радиус срединной поверхности оболочки $r_{ss} = r_i$; площадь сечения внутренней кольцевой арматуры на 1 м длины водовода A_{si} и радиус окружности, на которой располагается ось этой арматуры r_{si} ; площадь сечения наружной кольцевой арматуры на 1 м длины водовода A_{se} и радиус окружности, на которой располагается ось этой арматуры r_{se} . Эти данные следует принимать по проекту водовода.

2. Физико-механические характеристики стали: модуль упругости E_s , коэффициент Пуассона

ν_s , коэффициент линейного температурного расширения α_s . Эти данные следует принимать в соответствии с нормами проектирования [10].

3. Физико-механические характеристики бетона: модуль упругости E_b ; коэффициент линейного температурного расширения α_b ; нормативное сопротивление растяжению R_b . Эти данные следует принимать в соответствии с нормами проектирования [4].

4. Данные для расчетов термического режима: теплопроводность бетона λ ; расчетная температура наружного воздуха T_a ; расчетная температура воды в водоводе T_w ; интенсивность суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации S_{max} ; степень черноты бетонной поверхности ϵ_c ; коэффициент теплоотдачи конвекцией β_{con} ; температура замыкания конструкции T_0 . Значения этих величин следует принимать по данным метеорологических наблюдений и расчетов термического режима водохранилища с учетом требований норм проектирования [6].

5. Внутреннее давление воды на оси водовода p , определяемое в зависимости от уровня воды в водохранилище с учетом гидравлического удара и пульсации давления, принимается по проекту водовода.

Расчеты по определению напряжений в элементах сталежелезобетонного водовода целесообразно выполнять в такой последовательности.

1. Определяются значения расчетных температур стальных элементов водовода T_{ss} , T_{si} , T_{se} по формуле (7).

2. Находятся расчетные перепады температур для стальных элементов водовода ΔT_{ss} , ΔT_{si} , ΔT_{se} согласно формулам (8).

3. Принимается расчетное значение модуля упругости стальной оболочки E_{ss} в зависимости от условий ее работы. В случае плоского напряженного состояния $E_{ss} = E_s$, а в случае плоской деформации – по первой из формул (10).

4. Вычисляются значения напряжений в бетоне для сечения между трещинами σ_b , используя выражения (36) и (37). Принимается в расчет меньшее из полученных значений, но не большее чем значение R_{btm} , определяемое по формуле (31).

5. Определяются значения кольцевых напряжений в стальной оболочке σ_{ss} по формуле (25), а также напряжений во внутренней σ_{si} и в наружной σ_{se} кольцевой арматуре согласно формулам (26) и (27) для сечения с трещиной.



6. Находятся значения напряжений во внутренней σ_{si} и в наружной σ_{se} кольцевой арматуре для сечения между трещинами по формулам (23), (24).

Расчеты по изложенному алгоритму являются достаточно сложными и трудоемкими. Поэтому на основе предложенной методики в ПАО "Укрэлектропроект" разработана компьютерная программа расчета напряженного состояния высоконапорных сталежелезобетонных водоводов ГЭС и ГАЭС с двойной арматурой в эксплуатационный период на внутреннее давление воды с учетом температурных воздействий.

Расчеты напряженного состояния сталежелезобетонного водовода Бурейской ГЭС. С целью апробации предложенной методики выполнены расчеты напряженного состояния для сечения III – III водовода № 3 Бурейской ГЭС. Для этого водовода имеются наиболее полные данные обширных натурных наблюдений, проведенных ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева под руководством канд. техн. наук. В.Н. Дурчевой. Схема размещения водовода на низовой грани плотины и положение сечения III – III показаны на Рис. 6.

Рассматриваемый сталежелезобетонный водовод внутренним диаметром 8,5 м образован железобетонной оболочкой толщиной 1,5 м, подкрепленной стальной оболочкой толщиной 30 мм из стали марки 25Г2С. Бетон железобетонной оболочки класса В15, внутренняя и наружная кольцевая арматура диаметром 36 мм класса АIII из стали марки 09Г2С.

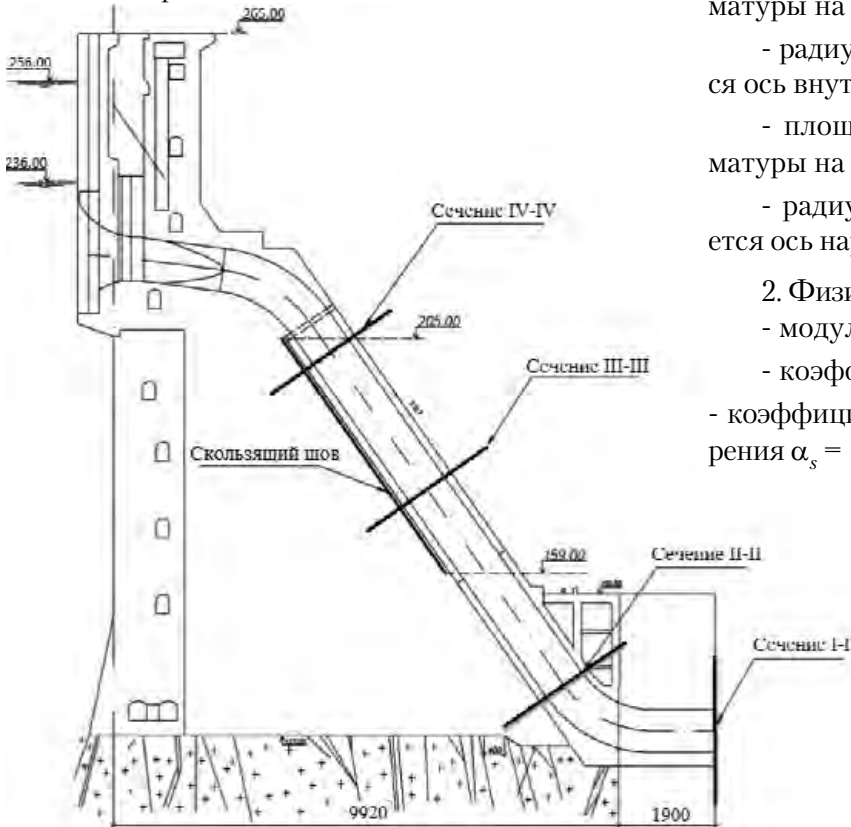


Рис. 6. Схема расположения контролируемых сечений водовода Бурейской ГЭС

Для предотвращения появления значительных продольных напряжений предусмотрен компенсатор, а между водоводом и низовой гранью плотины – скользящий шов, выполненный из рубероида на битумной прокладке. Таким образом, можно рассматривать плоское напряженное состояние водовода.

Контроль состояния водовода осуществляется с помощью контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленной в контрольных сечениях. На металлической оболочке установлены накладные тензометры (ПЛДС-150Н, ТБ-200Н), в арматуре – арматурные динамометры (ПСАС-28, ПСАС-40). Приборы были установлены в кольцевом и продольном направлении. Температура измерялась в верхней области контролируемых сечений. На Рис. 7 приведено размещение КИА в сечении III – III водовода № 3.

Для оценки термического режима и напряженного состояния водовода № 3 Бурейской ГЭС по предложенной методике были выполнены расчеты для сечения III – III. При этом использовались следующие исходные данные.

1. Геометрические данные:

- внутренний радиус водовода, принимаемый равным радиусу срединной поверхности оболочки, $r_{ss} = r_i = 4,25$ м;
- наружный радиус водовода $r_e = 5,75$ м;
- толщина стальной оболочки $t = 30$ мм;
- площадь сечения внутренней кольцевой арматуры на 1 м длины водовода $A_{si} = 101,79$ см²/м;
- радиус окружности, на которой располагается ось внутренней кольцевой арматуры $r_{si} = 4,5$ м;
- площадь сечения наружной кольцевой арматуры на 1 м длины водовода $A_{se} = 101,79$ см²/м;
- радиус окружности, на которой располагается ось наружной кольцевой арматуры $r_{se} = 5,5$ м.

2. Физико-механические характеристики стали:

- модуль упругости $E_s = 2,06 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu_s = 0,3$;
- коэффициент линейного температурного расширения $\alpha_s = 1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

3. Физико-механические характеристики бетона:

- модуль упругости $E_b = 2,3 \cdot 10^4$ МПа;
- коэффициент линейного температурного расширения $\alpha_b = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/°С;
- нормативное сопротивление растяжению $R_b = 1,15$ МПа.

4. Данные для расчетов термического режима:

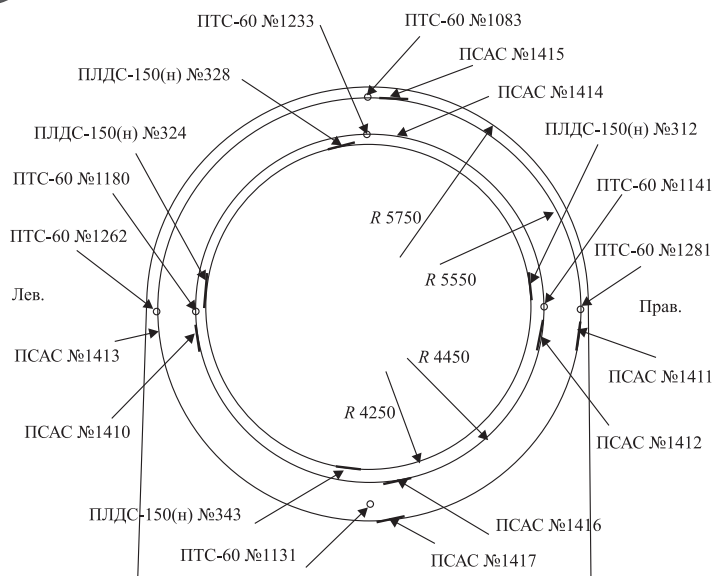


Рис. 7. Размещение КИА в сечении 3-3 водовода №3. Вид со стороны верхнего бьефа

- теплопроводность бетона $\lambda = 2.67 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$;
- расчетная температура наружного воздуха T_a принята в соответствии с данными наблюдений;
- расчетная температура воды в водоводе T_w принята в соответствии с данными наблюдений;
- интенсивность суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации S_{max} принята переменной в зависимости от времени года;
- степень черноты бетонной поверхности $\epsilon_c = 0,7$;
- коэффициент теплоотдачи конвекцией $\beta_{\text{кон}} = 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$;
- температура замыкания конструкции $T_0 = 20^\circ\text{С}$.

5. Внутреннее давление воды на оси водовода p , определяемое в зависимости от уровня воды в водохранилище.

Расчеты выполнялись для периода с 07.09. 2009 по 26.10.2010.

Результаты расчетов термического режима водовода за этот период представлены на Рис. 8. Там же приведены данные натуральных наблюдений для термометров, установленных в верхней части сечения, слева и справа. Как видно из этого рисунка имеет место удовлетворительное совпадение расчетных температур и показаний установленных термометров. Максимальная разница температур, определенных расчетом, и наблюдаемых температур не превышает 5°С . Более низкие температуры имеют место с правой стороны сечения, что связано с расположением водовода относительно стран света — правая сторона водовода освещается меньше.

Результаты расчетов кольцевых напряжений в стальной оболочке приведены на Рис. 9. Там же

приведены данные натуральных наблюдений. Сравнение этих результатов показывает, что имеет место удовлетворительное совпадение расчетных и натуральных данных. Максимальная разница напряжений, определенных расчетом, и напряжений измеренных тензодатчиками не превышает 10 МПа .

Результаты расчетов напряжений для сечений с трещинами σ'_{si} , σ'_{se} и для сечений между трещинами σ'_{si} , σ'_{se} во внутренней и наружной кольцевой арматуре показаны на Рис. 10 и 11. Там же приведены полученные в результате натуральных наблюдений результаты измерений напряжений арматурными динамометрами во внутренней и наружной кольцевой арматуре. Как видно, имеет место удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных напряжений.

Выполненные расчеты водовода Бурейской ГЭС, а также систематических расчетов других водоводов, работающих в различных условиях, позволили выявить ряд особенностей напряженного состояния высоконапорных сталежелезобетонных водоводов с двойной арматурой.

Установлено, что значения кольцевых напряжений в стальной оболочке, возникающих под действием внутреннего давления воды и температурных воздействий, практически во всех случаях ниже, чем значения напряжений в кольцевой арматуре.

На характер распределения и на значения напряжений в металлических элементах водовода значительное влияние оказывают температурные воздействия. При этом максимальные значения напряжений в стальной оболочке и во внутренней арматуре имеют место в летний период, а в зимний период максимальные значения напряжений в наружной арматуре — в зимний период.

Действующие нормы проектирования [2] не учитывают эти существенные особенности напряженного состояния сталежелезобетонных водоводов, что не во всех случаях позволяет обеспечить надежность и безопасность таких конструкций.

Выводы и рекомендации

1. Предложена методика расчета термического режима высоконапорных сталежелезобетонных водоводов в эксплуатационный период.

2. Разработана методика расчета напряженного состояния высоконапорных сталежелезобетонных водоводов с двойной кольцевой арматурой при действии внутреннего давления воды с учетом температурных воздействий в эксплуатационный период.



3. На основе разработанной методики составлена компьютерная программа, позволяющая автоматизировать расчеты термического режима и напряженного состояния высоконапорных сталежелезобетонных водоводов с двойной кольцевой арматурой.

4. Установлено, что значения кольцевых напряжений в стальной оболочке, возникающих под действием внутреннего давления воды и температурных воздействий, практически во всех случаях ниже, чем значения напряжений в кольцевой арматуре.

5. Выяснено, что на характер распределения и на значения напряжений в металлических элементах водовода значительное влияние оказывают температурные воздействия. При этом максимальные значения напряжений в стальной оболочке и во внутренней арматуре имеют место в летний период, а максимальные значения напряжений в наружной арматуре — в зимний период.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Мінрегіонбуд України. — К.: ДП "Укрархбудінформ", 2010. — 37 с.
2. П-780-83 / Гидропроект. Пособие по проектированию сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений. — М.: Гидропроект, 1984. — 91 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. — 392 с.
4. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Минэнерго СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 32 с.
5. Плятт Ш.Н. Расчеты температурных полей бетонных гидросооружений. — М.: Энергия, 1974. — 408 с.
6. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. — К.: Сталь, 2006. — 60 с.
7. Дятловицкий Л.И., Вайнберг А.И. Формирование напряжений в гравитационных плотинах. — К.: Наукова думка, 1975. — 264 с.
8. 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.
9. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. — Харьков: Издательство "Тяжпромавтоматика", 2008. — 304 с.
10. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. — К.: Укрархбудінформ, 2011. — 202 с.

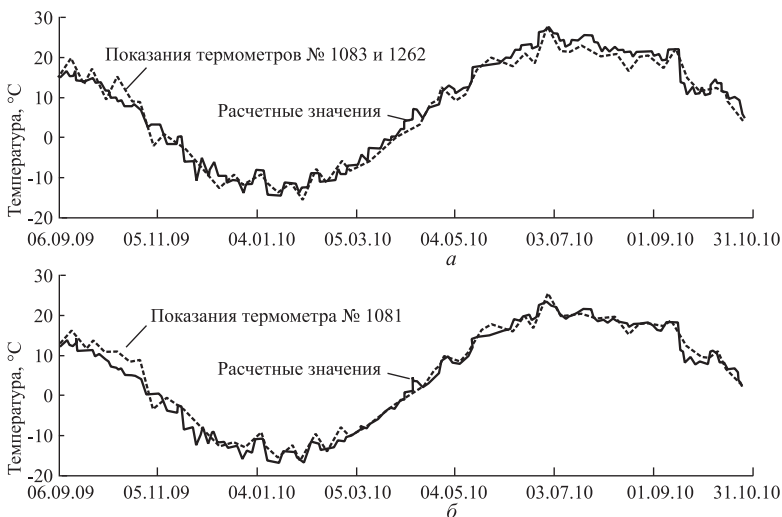


Рис. 8. Температуры в наружной арматуре *a* — с более теплой стороны и сверху, *б* — с более холодной стороны.



Рис. 9. Кольцевые напряжения в стальной оболочке

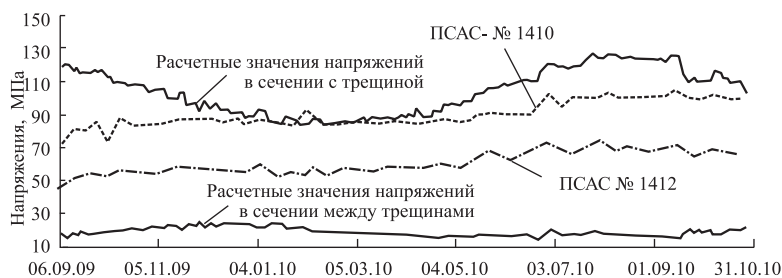


Рис. 10. Напряжения во внутренней арматуре

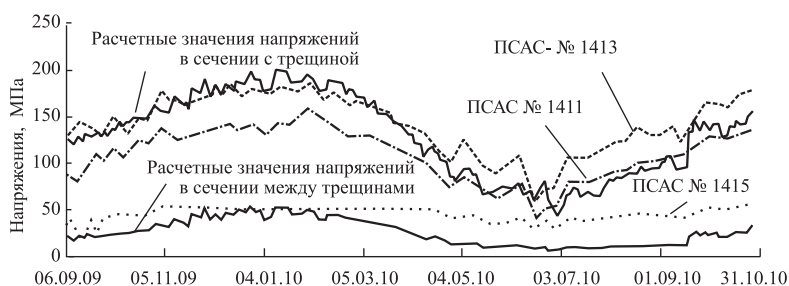


Рис. 11. Напряжения в наружной арматуре

