

Л. Б. Буянтян

Расчет железобетонного трубопровода с внутренней металлической рубашкой на внутреннее давление, температуру и усадку

В гидротехнике напорные железобетонные трубопроводы обыкновенно применяют при напорах до 25—30 м и, как максимум, 50 м.

При больших напорах возникают затруднения, связанные с увеличением водопроницаемости бетона и существенным возрастанием толщины стенок из-за небольшой сопротивляемости бетона растяжению. Для увеличения диапазона применяемости железобетонных трубопроводов внутренняя поверхность последних бронируется металлической рубашкой из листового железа. Кроме того, такая конструкция возможна и при усилении существующих металлических трубопроводов железобетонной рубашкой.

В связи с вышеизложенным становится ясным актуальность вопроса расчета такого трубопровода на внутреннее давление, температуру и усадку. При этом необходимо рассмотреть два возможных случая работы бетона:

1. до появления трещин в бетоне, когда все сечение трубы работает совместно;
2. после появления трещин в бетоне, когда последний уже не работает на растяжение и растягивающие усилия полностью воспринимаются металлической броней и арматурой.

В обоих случаях вывод расчетных формул дается на основе рассмотрения упругих деформаций отдельных составных частей трубопровода.

1. Бетон работает на сжатие и растяжение

Пусть дано кольцо, состоящее из внутренней металлической рубашки радиуса a и толщиной δ_1 , первого бетонного кольца с внутренним и наружным радиусами a и b , первого ряда арматуры с радиусом центра тяжести сечения арматуры b и приведенной толщиной $\delta_2 = \frac{f_1}{1}$, второго бетонного кольца с радиусами внутренней и наружной поверхностей b и c , второго ряда арматуры с радиусом центра тяжести арматуры c и приведенной толщиной $\delta_3 = \frac{f_2}{1}$.

Для того, чтобы не усложнять расчетные формулы, мы условно считаем второй ряд арматуры расположенным на поверхности трубы.

Пусть далее в таком многослойном кольце имеется внутреннее гидростатическое давление p , а температура внутренней и наружной поверхностями кольца будут T_1 и T_2 .

Ввиду симметричности деформаций на контактных поверхностях колец возникнут только нормальные усилия p_1, p_2, p_3 и p_4 (см. рис. 1.).

Закон изменения температуры по толщине кольца принимаем линейным, т. е. температура в любой точке кольца с радиусом r будет равна:

$$T_r = t_1 + k(r - a), \quad (11)$$

где $t_1 = T_1 - T_0$ — приращение температуры внутренней поверхности трубы от температуры замыкания,

$$k = \frac{T_2 - T_1}{c - a} \quad \text{— перепад}$$

Рис. 1. Усилия p_1, p_2, p_3 и p_4 указаны для железа; для бетона будут иметь обратное направление.

температуры на единицу толщины всего кольца.

При желании можно принять другой закон изменения температуры по толщине кольца, что не изменит в принципе ход расчета.

Необходимые уравнения для определения p_1, p_2, p_3 и p_4 получим из условия совместности деформаций, от температуры и усилий p_i , отдельных колец в точках их контакта.*

Обозначим деформации радиуса металлических колец через $u_r^{(p)}$ — от усилий p_i и $u_r^{(t)}$ — от температуры, $u_{\delta_1 r}^{(p)}$ и $u_{\delta_1 r}^{(t)}$ — первого бетонного кольца от давления и температуры и то же $u_{\delta_2 r}^{(p)}$, $u_{\delta_2 r}^{(t)}$ для второго бетонного кольца. Получим 4 уравнения совместности деформаций:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} + u_a^{(t)} &= u_{\delta_1 a}^{(p)} + u_{\delta_1 a}^{(t)} \\ u_b^{(p)} + u_b^{(t)} &= u_{\delta_1 b}^{(p)} + u_{\delta_1 b}^{(t)} \\ u_b^{(p)} + u_b^{(t)} &= u_{\delta_2 b}^{(p)} + u_{\delta_2 b}^{(t)} \\ u_c^{(p)} + u_c^{(t)} &= u_{\delta_2 c}^{(p)} + u_{\delta_2 c}^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

* Здесь и в последующем рассматривается плоская задача.

Перейдем теперь к определению деформаций.

Приближенное решение задачи Ляме, основанное на теории цилиндрической оболочки и данное акад. Б. Г. Галеркиным [1], приводит к следующим формулам для определения нормальных напряжений в толстом кольце:

$$\sigma_r^{(p)} = \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{r \ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \quad \text{и} \quad \sigma_r^{(p)} = - \frac{p_n a_{n-1}}{r} = \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{r \ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \ln \frac{r}{a_{n-1}} \quad (1.3)$$

и радиального перемещения:

$$u^{(p)} = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{\ln \frac{a_n}{a_{n-1}}}, \quad (1.4)$$

где $\ln$ — натуральный логарифм, E и ν модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона материала.

Эти приближенные формулы дают достаточную для целей практики точность [1] и значительно упрощают расчетные формулы в случае многослойного кольца.

Нормальные напряжения и деформация радиуса кольца от воздействия температуры для толстого кольца определяются по формулам [2]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta^{(t)} &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\left(1 + \frac{a_{n-1}^2}{r^2} \right) (T_{cp} - T_{rcp}) + 2(T_{rcp} - T_r) \right] \\ \sigma_r^{(t)} &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left(1 - \frac{a_{n-1}^2}{r^2} \right) (T_{cp} - T_{rcp}) \\ u^{(t)} &= (1+\nu) \alpha r \left[T_{rcp} - \frac{1-2\nu + \frac{a_{n-1}^2}{r^2}}{1-\nu} \cdot \frac{T_{cp} - T_{rcp}}{2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где} \quad T_{cp} &= \frac{2}{a_n^2 - a_{n-1}^2} \int_{a_{n-1}}^{a_n} T_r r dr \\ T_{rcp} &= \frac{2}{r^2 - a_{n-1}^2} \int_{a_{n-1}}^r T_r r dr \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

* В аналогичной формуле в статье (2) Мелещенко и Можевитазова допущена ошибка.

Принимая во внимание (1.1), (1.6) может быть представлено в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{cp} &= t_1 - \kappa a + \frac{2\kappa}{3} \cdot \frac{a_n^3 - a_{n-1}^3}{a_n^2 - a_{n-1}^2} \\ T_{rcp} &= t_1 - \kappa a + \frac{2\kappa}{3} \cdot \frac{r^3 - a_{n-1}^3}{r^2 - a_{n-1}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Применяя формулы (1.4) и (1.5) для первого и второго бетонных колец и учитывая (1.7), получим:

а) для первого бетонного кольца

$$u_{\sigma_1 a}^{(p)} = u_{\sigma_1 b}^{(p)} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_6} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{a}{b}} \quad (1.8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{\sigma_1 a}^{(t)} &= (1 + \nu_1) \alpha_1 a \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ u_{\sigma_1 b}^{(t)} &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+a} - a \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

б) для второго бетонного кольца

$$u_{\sigma_2 b}^{(p)} = u_{\sigma_2 c}^{(p)} = \frac{1 - \nu_2^2}{E_6} \cdot \frac{p_2 b - p_4 c}{\ln \frac{c}{b}} \quad (1.10)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{\sigma_2 b}^{(t)} &= (1 + \nu_2) \alpha_2 b \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ u_{\sigma_2 c}^{(t)} &= (1 + \nu_2) \alpha_2 c \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

где $t_2 = T_2 - T_0$ — изменение температуры наружной поверхности от температуры замыкания T_0 .

Для металлической оболочки и арматуры применим формулы для тонких цилиндрических оболочек. Тогда деформации от усилий p_i выражаются так:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} &= \frac{(p - p_1) a^2}{E \delta_1} \\ u_b^{(p)} &= \frac{(p_1 - p_2) b^2}{E \delta_2} \\ u_c^{(p)} &= \frac{p_2 c^2}{E \delta_3} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Для определения деформаций от температуры применим третью формулу (1.5) считая, что $T_{ср} = T_{гср}$ и что температура по толщине постоянна. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(1)} &= (1+\nu) \alpha a t, \\ u_b^{(1)} &= (1+\nu) \alpha b [t_1 + k(b-a)] \\ u_c^{(1)} &= (1+\nu) \alpha c t_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Подставляя (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) и (1.13) в уравнения совместности деформаций (1.2), получим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} (p-p_1) \frac{a^2}{\delta_1} + D_1 &= D_2 + n \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ (p_2 - p_1) \frac{b^2}{\delta_2} + D_3 &= D_4 + n \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ (p_2 - p_3) \frac{b^2}{\delta_2} + D_5 &= D_6 + n \frac{p_2 b - p_3 c}{\ln \frac{c}{b}} \\ p_4 \frac{c^2}{\delta_3} + D_7 &= D_8 + n \frac{p_2 b - p_3 c}{\ln \frac{c}{b}} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Здесь принято:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= (1+\nu) \alpha a E t_1 \\ D_2 &= (1+\nu_1) \alpha_1 a E \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ D_3 &= (1+\nu) \alpha b E [t_1 + k(b-a)] \\ D_4 &= (1+\nu_1) \alpha_1 b E \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ D_5 &= (1+\nu_1) \alpha_1 b E \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ D_6 &= (1+\nu) \alpha c E t_2 \\ D_7 &= (1+\nu_1) \alpha_1 c E \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ n &= \frac{(1-\nu_1^2) E}{E_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Решая систему (1.14), получим:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{B_1}{A_1} p + \frac{1}{A_1} \left[(D_1 - D_2) \ln \frac{c}{a} + (D_4 - D_5) \ln \frac{c}{b} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\delta_2 n}{b} (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) - \frac{\delta_3 n}{c} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6) \right] \\ p_2 &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1 b} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \\ p_2 - p_3 &= \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} (p - p_1) + \frac{\delta_2}{b^2} (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) \\ p_4 &= \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} (p - p_1) + \frac{\delta_3}{c^2} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6), \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= n a \left[1 + \frac{a}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\delta_3}{c} + \frac{\ln \frac{c}{a}}{n} \right) \right] \\ p_1 &= \frac{n a^2}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\delta_3}{c} + \frac{\ln \frac{c}{a}}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

Формулы (1.16) дают возможность определить усилия на контактах отдельных колец при действии внутреннего давления и температуры.

а) *Усилия только от внутреннего гидростатического давления.*

Если положить в формулах (1.16) $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_6 = D_7 = 0$, мы получим формулы для усилий в контактах колец только от внутреннего гидростатического давления:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_1}{A_1} p \\ p_2^{(p)} &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n b \delta_1} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 \\ (p_2 - p_3)^{(p)} &= \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} (p - p_1) \\ p_4^{(p)} &= \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} (p - p_1) \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

б) *Усилия только от температуры.*

При равенстве нулю гидростатического давления формулы (1.16) дадут распределение усилий по контактам от температуры:

$$\left. \begin{aligned}
 p_1^{(t)} &= \frac{1}{A_1} \left[(D_1 - D_2) \ln \frac{c}{a} + (D_4 - D_5) \ln \frac{c}{b} - \frac{\delta_2 n}{b} (D_1 + D_4 - \right. \\
 &\quad \left. - D_2 - D_5) - \frac{\delta_3 n}{c} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6) \right] \\
 p_2^{(t)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \\
 (p_3 - p_2)^{(t)} &= - \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_2}{b^2} (D_1 + D_4 - D_2 - D_5) \\
 p_4^{(t)} &= - \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_3}{c^2} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6)
 \end{aligned} \right\} (1.19)$$

б) *Усилия только от усадки.*

Рассматривая явление усадки как условное равномерное понижение температуры бетона на t_y^0 мы из формул (1.19) можем получить расчетные формулы для определения усилий в контактах, положив

$$\left. \begin{aligned}
 D_1 &= D_2 = D_5 = k = 0 \\
 D_3 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 a E t_y \\
 D_4 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b E t_y \\
 D_6 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b E t_y \\
 D_7 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 c E t_y
 \end{aligned} \right\} (1.20)$$

Тогда (1.19) примут вид:

$$\left. \begin{aligned}
 p_1^{(y)} &= - \frac{(1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y}{A_1} \left[a \ln \frac{c}{a} + \frac{n \delta_2}{b} (b - a) + \frac{n \delta_3}{c} (c - a) \right] \\
 p_2^{(y)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{\delta_1 n} \right) p_1 + \frac{(1 + \nu_1) \ln \frac{b}{a}}{n b} \alpha_1 a E t_y \\
 (p_3 - p_2)^{(y)} &= - \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_2 (1 + \nu_1) (b - a)}{b^2} \alpha_1 E t_y \\
 p_4^{(y)} &= - \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_3 (1 + \nu_1) (c - a)}{c^2} \alpha_1 E t_y
 \end{aligned} \right\} (1.21)$$

После определения усилий напряжения определяются по формулам:

а) *Во внутренней металлической рубашке*

$$\sigma_0^{(p)} = \frac{p - p_1}{\delta_1} a; \quad (1.22)$$

все остальные напряжения практически пренебрежимы.

б) В первом ряду арматуры:

$$\sigma_{\theta}^{(p)} = \frac{p_1 - p_2}{\delta_2} b \quad (1.23)$$

в) Во втором ряду арматуры:

$$\sigma_{\theta}^{(p)} = \frac{p_4 c}{\delta_2} \quad (1.24)$$

г) В первом бетонном кольце:

1) От гидростатического давления

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)} = \frac{p_1 a - p_2 b}{r \ln \frac{b}{a}} \quad (1.25)$$

Для крайних точек при $r=a$ и $r=b$ формула (1.25) дает

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)}(a) = \frac{p_1 a - p_2 b}{a \ln \frac{b}{a}}; \quad \sigma_{\theta, r}^{(p)}(b) = \frac{p_1 a - p_2 b}{b \ln \frac{b}{a}} \quad (1.26)$$

Нормальные напряжения $\sigma_r^{(p)}$ могут быть определены по формуле (1.3).

2) От неравномерного распределения температуры.

Для крайних точек

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=a \quad \sigma_{\theta, r}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \\ r=b \quad \sigma_{\theta, r}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2a^2}{a+b} - b \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

для крайних точек кольца

$$\sigma_{\theta, r}^{(t)}(a) = \sigma_{\theta, r}^{(t)}(b) = 0;$$

для промежуточных точек $\sigma_{\theta, r}^{(t)}(r)$ могут быть определены по второй из формул (1.5).

3) От усадки или равномерного распределения температуры.

Как это следует из формул (1.5) при равномерном изменении температуры кольца

$$\sigma_{\theta}^{(y)} = \sigma_r^{(y)} = 0$$

д) Во втором бетонном кольце

1) От равномерно распределенного давления

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)} = \frac{p_3 b - p_4 c}{r \ln \frac{c}{b}} \quad (1.28)$$

напряжения в крайних точках

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=b \quad \sigma_{\theta\theta}^{(p)} &= \frac{p_3 b - p_4 c}{b \ln \frac{c}{b}} \\ r=c \quad \sigma_{\theta\theta}^{(p)} &= \frac{p_3 b - p_4 c}{c \ln \frac{c}{b}} \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

2) От неравномерного распределения температуры для крайних точек

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=b \quad \sigma_{\theta\theta}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2c^2}{b+c} - b \right) \\ r=c \quad \sigma_{\theta\theta}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

Таким образом, по формулам (1.18), (1.19), (1.21) определяются усилия от соответствующих расчетных нагрузок и затем по формулам (1.22), (1.23), (1.24), (1.26), (1.27), (1.28), (1.29) и (1.30) определяются соответствующие напряжения. Наибольшие напряжения в отдельных точках определяются как сумма отдельных компонентов.

II. Бетон на растяжение не работает

В этом расчетном случае полагаем нормальные напряжения

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} = 0 \quad (2.31)$$

при всех воздействиях нагрузок — внутреннего гидростатического давления, неравномерной температуры и усадки бетона.

Положим, что в трубопроводе имеется гидростатическое давление p , а температура металлических составляющих кольца, отсчитываемая от температуры замыкания, при линейном изменении температуры по толщине кольца на основании формулы (1.1) есть:

$$\left. \begin{aligned} t_a &= t_1 \\ t_b &= t_1 + k(b-a) \\ t_c &= t_1 + k(c-a) = t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Принимая те же обозначения для деформаций, что и в 1 расчетном случае, получим два уравнения совместности деформаций:

$$\left. \begin{aligned} u_{\theta\theta}^{(t)} - u_{\theta\theta}^{(p)} &= u_b^{(t)} + u_b^{(p)} - u_a^{(t)} - u_a^{(p)} \\ u_{\theta\theta}^{(t)} - u_{\theta\theta}^{(p)} &= u_c^{(t)} + u_c^{(p)} - u_b^{(t)} - u_b^{(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Здесь $u_{\theta\theta}^{(t)}$, $u_{\theta\theta}^{(p)}$, $u_{\theta\theta}^{(t)}$ и $u_{\theta\theta}^{(p)}$ не зависят от радиуса, а зависят только от толщины бетонных колец.

Уравнения (2.33) недостаточны для определения четырех неизвестных. Остальные два уравнения получим из рассмотрения уравнений равновесия любого сектора бетонных цилиндров с центральным углом θ (см. рис. 2).

$$\left. \begin{aligned} p_1 a \theta &= p_2 b \theta = \sigma_{\theta, r}^{(p)} r \theta \\ p_3 b \theta &= p_4 c \theta = \sigma_{\theta, r}^{(p)} r \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} p_1 a &= p_2 b = r \sigma_{\theta, r}^{(p)} \\ p_3 b &= p_4 c = r \sigma_{\theta, r}^{(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Деформации металлической оболочки и арматуры определяются по формулам (1.12) и (1.13) т. е.:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} &= \frac{(p_1 - p_2) a^2}{E \delta_1}; & u_a^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha t_1 \\ u_b^{(p)} &= \frac{(p_2 - p_3) b^2}{E \delta_2}; & u_b^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha b [t_1 + k(b - a)] \\ u_c^{(p)} &= \frac{p_4 c^2}{E \delta_3}; & u_c^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Радиальное сжатие бетонного кольца, вызванное силами p_1 и p_2 , может быть определено из уравнения:

$$\frac{du_{\theta, r}^{(p)}}{dr} = \frac{\sigma_{\theta, r}^{(p)}}{E_0} \quad (2.37)$$

Подставляя из (2.35) значение $\sigma_{\theta, r}^{(p)}$ в (2.37) и интегрируя в пределах от a до b , получим

$$u_{\theta, r}^{(p)} = \frac{a p_1}{E_0} \ln \frac{b}{a} \quad (2.38)$$

Аналогично для $u_{\theta, r}^{(p)}$ будем иметь:

$$u_{\theta, r}^{(p)} = \frac{b p_3}{E_0} \ln \frac{c}{b} \quad (2.39)$$

Изменение толщины

бетонного кольца от неравномерного нагрева может быть определено из уравнения;

$$u_{\theta, r}^{(t)} = (1 + \nu_1) \alpha_1 \int_a^b [t_1 + k(r - a)] dr = (1 + \nu_1) (b - a) \alpha_1 \frac{t_a + t_b}{2} \quad (2.40)$$

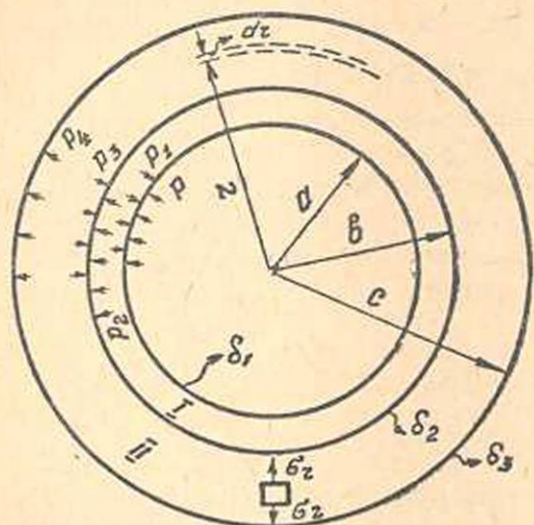


Рис. 2. Усилия p_1 , p_2 , p_3 и p_4 указаны для металла. Усилия для бетона будут иметь обратные знаки.

Аналогично для второго бетонного кольца получим:

$$u_{\delta_2}^{(1)} = (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 \frac{t_c + t_b}{2} \quad (2.41)$$

Подставляя значения деформаций в уравнения (2.33) и учитывая (2.35), получим:

$$\left. \begin{aligned} (1+\nu_1)(b-a) \alpha_1 \frac{t_a + t_b}{2} - \frac{ap_1}{E\delta} \ln \frac{b}{a} = \\ - (1+\nu) \alpha b t_b + \frac{(p_1 a - p_4 c) b}{E\delta_2} - (1+\nu) \alpha a t_a - \frac{(p - p_1) a^2}{E\delta_1} \\ (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 \frac{t_c + t_b}{2} - \frac{cp_4}{E\delta} \ln \frac{c}{b} = \\ = (1+\nu) \alpha c t_c + \frac{p_4 c^2}{E\delta_2} - (1+\nu) \alpha b t_b - \frac{p_1 a - p_4 c}{E\delta_2} b \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Решая систему (2.42), получим:

$$p_1 = \frac{B_2 a \delta_2^2}{\delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p + \frac{B_2 \delta_2^2 k_1 + b \delta_2 k_2}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \quad (2.43)$$

$$p_4 = \frac{a^2 b \delta_2}{c \delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p + \frac{A_2 \delta_2^2 k_2 + b \delta_2 k_1}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \quad (2.44)$$

Имея p_1 и p_4 , усилия p_2 и p_3 могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= \frac{ap_1}{b} \\ p_3 &= \frac{cp_4}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

В формулах (2.43) и (2.44) приняты обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} + n \ln \frac{b}{a}; \quad B_2 = \frac{b}{\delta_1} + \frac{c}{\delta_2} + n \ln \frac{c}{b}; \quad n = \frac{E}{E_0} \\ k_1 &= (1+\nu_1)(b-a) \alpha_1 E \frac{t_a - t_b}{2} + (1+\nu) \alpha E a t_a - (1+\nu) \alpha E b t_b \\ k_2 &= (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 E \frac{t_b + t_c}{2} + (1+\nu) \alpha E b t_b - (1+\nu) \alpha E c t_c \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

формулы (2.43), (2.44) и (2.45) дают возможность определения усилий в контактах колец от воздействия внутреннего давления и неравномерного распределения температуры по толщине кольца.

а) *Усилия только от гидростатического давления:*

Подставляя в формулы (2.43) и (2.44) $k_1 = k_2 = 0$, получим формулы для усилий только от внутреннего гидростатического давления:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_2 a \delta_2^2}{\delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p \\ p_4^{(p)} &= \frac{a^2 b \delta_2}{c \delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p \\ p_2^{(p)} &= \frac{a p_1^{(p)}}{b}; \quad p_3^{(p)} = \frac{c p_4^{(p)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

Проверка полученных результатов может быть произведена по формуле

$$p_1 a + (p_2 - p_3) b + p_4 c = p a. \quad (2.48)$$

б) *Усилия только от воздействия температуры.*

Принимая равным нулю гидростатическое давление p в формулах (2.43), и (2.44) получим распределение усилий на контактные поверхности от неравномерного изменения температуры по толщине колец:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{B_2 \delta_2^2 k_1 + b \delta_2 k_2}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \\ p_4^{(t)} &= \frac{A_2 \delta_2^2 k_2 + b \delta_2 k_1}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \\ p_2^{(t)} &= \frac{a p_1^{(t)}}{b}; \quad p_3^{(t)} = \frac{c p_4^{(t)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Проверка производится по формуле (2.48) при $p = 0$.

в) *Усилия только от усадки.*

Как и в первом случае, рассматривая усадку как условное равномерное понижение температуры бетона на t_y^0 , мы из формул (2.49) получим формулы для определения усилий в контактах:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= \frac{B_2 \delta_2^2 (b-a) + b \delta_2 (c-b)}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \cdot (1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y \\ p_4^{(y)} &= \frac{b \delta_2 (b-a) - A_2 \delta_2^2 (c-b)}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \cdot (1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y \\ p_2^{(y)} &= \frac{a p_1^{(y)}}{b}; \quad p_3^{(y)} = \frac{c p_4^{(y)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Здесь E — модуль упругости металла, ν_1 и α_1 — коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения бетона.

Напряжения в металле определяются по формулам (1.22)–(1.24). Напряжения в бетоне по формулам (2.34).

III. Метод расчета предлагаемого нами способа усиления напорных трубопроводов

Конструкция усиления представляется в следующем виде: на существующий металлический трубопровод, без прекращения его эксплуатации, надевается металлический кожух с зазором 4–5 см. Кожух состоит из двух половинок, которые после обхвата существующего трубопровода свариваются продольным швом (или склепываются). Кожух усиления, приваривается к кольцам жесткости промежуточных опор трубопровода. В последующем, после окончания монтажа, эксплуатация трубопровода прекращается и в пространство между двумя трубами нагнетается цементный раствор под давлением. Время остановки станции, таким образом, сведется к минимуму, необходимому для заполнения зазора раствором и его твердения.

Иные способы усиления трубопровода, как то: установка натяжных металлических бандажей или усиление железобетоном, помимо того, что они не дают полной гарантии в соответствующем усилении трубопровода, потребуют длительной остановки станции для производства работ.

Количество потребного металла по предлагаемому нами способу усиления, при одинаковых допускаемых напряжениях, так же не превзойдет количества металла, применяемого при других способах усиления, а будет меньше, ввиду возможности предварительного вакуирования металла.

При усилении способом натяжных бандажей, для полного прилегания бандаж к трубе во всех точках, потребуются упругие прокладки из свинца или латуни.

Усиление железобетоном, кроме металла, потребует значительного количества бетона.

Помимо указанных преимуществ предлагаемый способ усиления трубопровода дает возможность передачи на вторую рубашку любой доли внутреннего давления трубопровода регулированием давления, нагнетаемого в зазор раствора.

Пусть имеются две концентрические трубы диаметром a и b толщиной соответственно δ_1 и δ_2 (см. рис. 3). Далее положим, что в трубопроводе имеется давление p_b и в зазор между трубами нагнетается раствор под давлением p_n , равное $p_n = p_b$. Тогда рубашка трубопровода будет в не напряженном состоянии и деформация ее будет равна нулю.

Деформация радиуса наружной трубы при этом будет

$$u_n = \frac{p_n b^2}{\delta_2 E} \quad (3.50)$$

После твердения раствора и снятия внутреннего гидростатического давления в зазоре гидростатического распределения напряжений уже не может быть. Поэтому на контактных поверхностях такого трехслойного кольца возникнут новые усилия, равные p_1 между первой рубашкой трубопровода и раствором и p_2 между раствором и второй рубашкой.

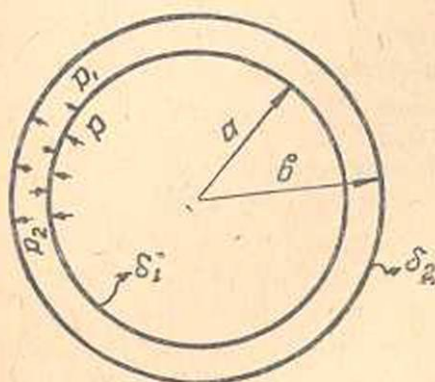


Рис. 3.

Раствор в зазоре между трубами находится в иных условиях, чем растворы, твердеющие на воздухе или в воде. Поэтому предугадать—будет ли происходить явление усадки или разбухания—не представляется возможным.

В дальнейшем принимается усадка, как дающая некоторый запас в расчетах.

В этом случае также рассмотрим два случая работы затвердевшего раствора.

Случай А: раствор работает на растяжение и сжатие.

Случай В: раствор работает только на сжатие.

Рассмотрим каждый случай в отдельности:

Случай А: раствор работает на растяжение и сжатие.

Используя формулы (1.4) и (1.12), напишем уравнения совместности деформаций на контактных поверхностях в предположении, что трубопровод опорожнен; тогда:

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1 a_2}{\delta_1 E} &= \frac{1-\nu_1^2}{E_0} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ \frac{p_2 b^2}{\delta_2 E} + \frac{1-\nu_1^2}{E_0} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} &= \frac{p_n b^2}{E \delta_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

Решая уравнение (3.51), получим распределение первоначального давления нагнетания:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(u)} &= \frac{b^2}{a \delta_2 \left(\frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{A_2 B_2 \ln \frac{b}{a}}{n} \right)} p_n \\ p_2^{(u)} &= \frac{a \ln \frac{b}{a}}{b n} A_2 p_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

$$\text{Здесь: } n = \frac{(1 - \nu_1^2) E}{E_0}; \quad A_2 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{a}{\delta_1}; \quad B_2 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{b}{\delta_2}. \quad (3.53)$$

Расчет на внутреннее давление, температуру и усадку производится по формулам (1.18), (1.19) и (1.20), которые для данного случая принимают вид:

1) от гидростатического давления

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_1}{A_1} p \\ p_2^{(p)} &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n b \delta_1} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{здесь: } A_1 &= n a \left[1 + \frac{a}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\ln \frac{b}{a}}{n} \right) \right] \\ B_1 &= \frac{n a^2}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\ln \frac{b}{a}}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

2) от температуры

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{1}{A_1} \left(\ln \frac{b}{a} - \frac{\delta_2 n}{b} \right) (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) \\ p_2^{(t)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

где D_1, D_2, D_3 и D_4 определяются по формулам (1.15)

3) усилия от усадки

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= - \frac{(1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y}{A_1} \left[a \ln \frac{b}{a} + \frac{n \delta_2}{b} (b - a) \right] \\ p_2^{(y)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 + \frac{(1 + \nu_1) \ln \frac{b}{a}}{n b} \alpha_1 a E t_y \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

После определения усилий p_1 и p_2 от всех видов нагрузок напряжения определяются по формулам (1.22) — (1.27).

Случай В: раствор дал трещины

Используя формулы (2.34), (2.38) и (1.12), напишем уравнение совместности деформаций

$$\frac{p_1 a^2}{\delta_1 E} + \frac{p_1 ab}{\delta_2 E} + \frac{a p_1}{E_0} \ln \frac{b}{a} = \frac{p_n b^2}{\delta_2 E}, \quad (3.58)$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(n)} &= \frac{b^2}{a \delta_2 A_2} p_n \\ p_2^{(n)} &= \frac{a p_1^{(n)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

$$\text{здесь: } A_2 = \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} + n \ln \frac{b}{a} \text{ и } n = \frac{E}{E_0} \quad (3.60)$$

Расчет на внутреннее давление, температуру и усадку производится по формулам:

1) от внутреннего давления

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{a}{\delta_1 A_2} p \\ p_2^{(p)} &= \frac{a p_1^{(p)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.61)$$

2) усилия от температуры

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{k_1}{a A_2} \\ p_2^{(t)} &= \frac{a p_1^{(t)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.62)$$

где, как и раньше:

$$k_1 = (1 + \nu_1) \alpha_1 E (b - a) \frac{t_a + t_b}{2} + (1 + \nu) \alpha E a t_a - (1 + \nu) \alpha E b t_b$$

3) усилия от усадки

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= \frac{(1 + \nu_1) (b - a) \alpha_1 E t_y}{a A_2} \\ p_2^{(y)} &= \frac{a p_1^{(y)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

Напряжения определяются по формулам (1.22) — (1.24) и (2.34). Поясним вышесказанное несколькими примерами.

Пример. Дана металлическая труба радиуса $a = 75$ см с толщиной стенки $\delta_1 = 1,5$ см, испытывающая гидростатическое давление $p = 15,0$ к/см². Требуется произвести усиление трубопровода.

Рассмотрим три из возможных способов усиления:

Вариант I. Усиление производится второй металлической рубашкой радиуса $b = 80$ см и толщиной стенки $\delta_2 = 0,6$ см, с последующим нагнетанием в зазор цементного раствора под давлением $p_n = 5,0$ к/см².

Вариант II. Усиление производится натяжными бандажами. Приведенная толщина принимается равной толщине второй трубы по первому варианту, т. е. $\delta_2 = 0,6$ см.

Вариант III. Усиление производится железобетоном толщиной 10 см. Приведенная толщина арматуры принимается равной толщине II трубы по первому варианту $\delta_2 = 0,6$ см и радиус центра арматуры $b = 80$ см.

Вариант I. Рассмотрим сперва случай, когда раствор работает на сжатие и растяжение.

По формулам (3.53) имеем:

$$n = \frac{(1 - \nu_1^2) E}{E_0} = \frac{\left(1 - \frac{1}{6^2}\right) \times 2,1 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 10,2$$

$$A_3 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{a}{\delta_1} = \frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{75}{1,5} = 106$$

$$B_3 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{b}{\delta_2} = \frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{80}{0,6} = 22,5$$

Далее по (3.52) получаем распределение давления нагнетания между трубами после твердения раствора:

$$p_1^{(n)} \frac{b^2}{a \delta_2 \left(\frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{A_3 B_3 \ln \frac{b}{a}}{n} \right)} p_n =$$

$$\frac{80^2}{75 \times 0,6 \left(\frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{106 \times 22,5 \ln \frac{80}{75}}{10,2} \right)} p_n = 1,02 p_n = 5,1 \text{ к/см}^2$$

$$p_2^{(n)} = \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n b} A_3 p_1^{(n)} = \frac{75 \times \ln \frac{80}{75}}{10,2 \times 80} \times 106 \times 1,02 p_n = 0,65 p_n = 3,25 \text{ к/см}^2$$

Определим напряжение в бетонном кольце:

$$\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{p_1^{(n)} a - p_2^{(n)} b}{r \ln \frac{b}{a}} = \frac{1,02 \times 75 - 0,65 \times 80}{r \ln \frac{80}{75}} p_n = 377 \times \frac{p_n}{r}$$

Максимальные напряжения будут на внутренней поверхности кольца при $r = a$; тогда:

$$\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{377}{75} p_n = 5,02 p_n = 25,1 \text{ кг/см}^2$$

при $r = b$: $\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{377}{80} p_n = 4,72 p_n = 23,6 \text{ кг/см}^2$.

При столь больших растягивающих напряжениях в растворе появление радиальных трещин неизбежно. Поэтому в дальнейшем расчеты производим на случай, когда раствор воспринимает только сжимающие напряжения.

1) В случае наличия трещин распределение давления нагнетания по формулам (3.60) и (3.59) будет:

$$n = \frac{E}{E_6} = \frac{2,1 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 10,5$$

$$A_2 = \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} n \ln \frac{b}{a} = \frac{75}{1,5} + \frac{80}{0,6} + 10,5 \ln \frac{80}{75} = 184,2$$

$$p_1^{(n)} = \frac{b^2}{a \delta_2 A_2} p_n = \frac{80^2}{75 \times 0,6 \times 184,2} \times 5 = 3,86 \text{ кг/см}^2$$

$$p_2^{(n)} = \frac{a p_1^{(n)}}{b} = \frac{75 \times 3,86}{80} = 3,62 \text{ кг/см}^2$$

2) Распределение усилий от внутреннего давления по формуле (3.61)

$$p_1^{(p)} = \frac{a}{\delta_1 A_2} p = \frac{75}{0,6 \times 184,2} \times 15 = 4,06 \text{ кг/см}^2$$

$$p_2^{(p)} = \frac{a p_1^{(p)}}{b} = \frac{75 \times 4,06}{80} = 3,83 \text{ кг/см}^2$$

3) Распределение усилий от температуры.

Температуру внутренней поверхности трубы при отсчете от температуры замыкания принимаем $t_a = +10^\circ$, то же наружной поверхности — $t_b = +15^\circ$. Тогда:

$$\begin{aligned} k_1 &= (1 + \nu_1) (b-a) \alpha_1 E \frac{t_a + t_b}{2} + (1 + \nu) \alpha E a t_a - (1 + \nu) \alpha E b t_b = \\ &= \left(1 + \frac{1}{6}\right) (80-75) \times 1 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \frac{10+15}{2} + \\ &+ (1+0,3) \times 1,2 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \times 75 \times 10 - (1+0,3) \times 1,2 \times 10^{-5} \times 2,1 \times \\ &\times 10^6 \times 80 \times 15 = -13170 \end{aligned}$$

По формулам (3.62)

$$p_1^{(t)} = \frac{k_1}{aA_2} = - \frac{13170}{75 \times 184,2} = -0,95 \text{ к/см}^2$$

$$p_2^{(t)} = \frac{a p_1^{(t)}}{b} = - \frac{75 \times 0,95}{80} = -0,84 \text{ к/см}^2$$

При понижении температуры $t_a = -10^\circ$, $t_b = -15^\circ$; при этом

$$p_1^{(t)} = +0,95 \text{ к/см}^2 \text{ и } p_2^{(t)} = +0,84 \text{ к/см}^2$$

4) Распределение усилий от усадки.

Принимаем, что усадка соответствует понижению температуры раствора на $t_y = -20^\circ$. Тогда по (3.63) получим:

$$p_1^{(y)} = \frac{(1+\nu_1)(b-a)zEt_y}{aA_2} = -$$

$$= - \frac{\left(1 + \frac{1}{6}\right)(80-75) \times 1 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \times 20}{75 \times 184,2} = -0,18 \text{ к/см}^2.$$

$$p_2^{(y)} = \frac{a p_1^{(y)}}{b} = - \frac{75 \times 0,18}{80} = -0,17$$

Максимальные суммарные усилия от всех расчетных случаев будут:

$$\Sigma p_{1\max} = 3,86 + 4,08 + 0,95 - 0,18 = 8,71 \text{ к/см}^2$$

$$\Sigma p_{2\max} = 3,62 + 3,83 + 0,84 - 0,17 = 8,07 \text{ к/см}^2$$

Минимальные суммарные усилия будут при повышении температуры трубы:

$$\Sigma p_{1\min} = 3,86 + 4,08 - 0,95 - 0,18 = 6,81 \text{ к/см}^2$$

$$\Sigma p_{2\min} = 3,62 + 3,83 - 0,84 - 0,17 = 6,4 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в теле рубашки трубопровода будут:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{P - \Sigma p_{1\min}}{\delta_1} a = \frac{15 - 6,81}{1,5} \times 75 = 409 \text{ к/см}^2$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{P - \Sigma p_{1\max}}{\delta_1} a = \frac{15 - 8,71}{1,5} \times 75 = 316 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в защитном кожухе:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{\Sigma p_{2\min}}{\delta_2} b = \frac{6,4 \times 80}{0,6} = 854 \text{ к/см}^2$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{\Sigma P_{2\max}}{\delta_2} b = \frac{8,07 \times 80}{0,6} = 1075 \text{ к/см}^2.$$

Таким образом, по первому варианту минимальное уменьшение напряжения в теле трубы составляет в процентах от первоначального:

$$K_{I\min} = \frac{750 - 409}{750} \times 100 = 45,5\%.$$

Вариант II. При усилении бандажами первоначальные напряжения в трубе от натяжения бандажей не учитываем, ввиду их неопределенности. Считаем, что натяжением бандажей достигается только плотное соприкосновение бандажей с трубой.

Напряжение в трубопроводе, усиленном бандажами, определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{pa}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{15 \times 75}{1,5 + 0,6} = 535 \text{ к/см}^2.$$

Уменьшение первоначальных напряжений в процентах составляет всего:

$$K_{II} = \frac{750 - 535}{750} \times 100 = 28,7\%.$$

При таком же усилении, что и в первом варианте, потребовалось бы увеличить приведенную толщину бандажей до

$$\delta_2 = \frac{15 \times 75}{409} - 1,5 = 1,3 \text{ см},$$

т. е. больше чем вдвое против первого варианта.

Вариант III. В этом случае принятые размеры железобетонной рубашки позволяют воспользоваться результатами расчета по первому варианту.

Суммарные усилия p_1 и p_2 будут слагаться из пунктов 2, 3, и 4 (см. расчеты по I варианту).

Максимальные усилия будут:

$$\Sigma p_{1\max} = 4,08 + 0,95 - 0,18 = 4,85 \text{ к/см}^2,$$

$$\Sigma p_{2\max} = 3,83 + 0,84 - 0,17 = 4,45 \text{ к/см}^2.$$

Минимальные усилия составляют:

$$\Sigma p_{1\min} = 4,08 - 0,95 - 0,18 = 2,95 \text{ к/см}^2,$$

$$\Sigma p_{2\min} = 3,83 + 0,84 - 0,17 = 2,78 \text{ к/см}^2.$$

Напряжения в теле рубашки трубопровода:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{15 - 2,95}{1,5} \times 75 = 603 \text{ к/см}^2,$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{15 - 4,85}{1,5} \times 75 = 507 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в арматуре:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{2,78 \times 80}{0,6} = 304 \text{ к/см}^2,$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{4,45 \times 80}{0,6} = 598 \text{ к/см}^2.$$

Уменьшение первоначальных напряжений в трубе в процентах от первоначального составляет:

$$K_{III \min} \frac{750 - 603}{750} \times 100 = 19,6\%.$$

Приведенный пример убедительно показывает несравненное преимущество предлагаемого нами способа усиления трубопровода перед другими.

Институт Строительных материалов и Сооружений
Академии Наук Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Федоров.—Расчет облицовок напорных гидротехнических тоннелей на внутреннее давление. Изв. НИИГ, т. XXV, 1939.
2. Н. Т. Мелешенко и А. Л. Можевитинов.—Расчет напряжений в круговой арке при воздействии гидростатической нагрузки и температуры. Изв. НИИГ, XXII, 1938.

Լ. Ռ. Բաղդարյան

ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՆԵՐՔԻՆ ՇԱՊԻԿՈՎ ԵՐԿԱՔԱՐԵՏՈՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՆԵՐՔԻՆ ՃՆՇՄԱՆ, ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԿԾԿՄԱՆ ՆԿԱՏՄԱՍԲ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ներկա աշխատությունը նվիրված է երկաթարետոն պաշտպանիչ շապիկով մետաղական խողովակաշարի՝ ներքին հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմության և կծկման հաշվարկին:

Առաջին մասում արվում է երկշար արմատուրով երկաթարետոն շապիկի հաշվարկի բանաձևերի արտածումը, երբ բետոնն աշխատում է սեղման և ձգման դեմ:

Երկրորդ մասում բերվում է հաշվարկային բանաձևերի արտածումը նույն դեպքի համար այն տարբերությամբ, որ բնութեն աշխատում է միմիայն սեղմման դեմ:

Երրորդ մասում նկարագրվում է գոյություն ունեցող մետաղական խողովակաշարերի մեր առաջաբեկած ուժեղացման կոնստրուկցիան ավելի մեծ տրամագծի մետաղական շապիկի միջոցով, ընդ որում միջխողովակային տարածության մեջ շաղախ է մղվում: Բերվում է նաև այդ կոնստրուկցիայի հաշվարկը: Կոնստրուկցիան հնարավորություն է տալիս հիմնական աշխատանքները կատարել առանց հիդրոկայանը կանգնեցնելու և նվազագույնի հասցնելու հիդրոկայանի աշխատանքի ընդհատումը, որն անհրաժեշտ է միջխողովակային տարածությունը շաղախով լցնելու և շաղախի ամրացման համար:

Վերջում բերվում է խողովակաշարի ուժեղացման օրինակ՝ 3 վարիանտով—մետաղական շապիկով, ձգիչ բանդաժներով և երկնթաբեռոն շապիկով: Օրինակը համոզիչ կերպով ցույց է տալիս ուժեղացման առաջարկվող եղանակի առավելությունները:

Л. Б. Бунятян

Расчет железобетонного трубопровода с внутренней металлической рубашкой на внутреннее давление, температуру и усадку

В гидротехнике напорные железобетонные трубопроводы обыкновенно применяют при напорах до 25—30 м и, как максимум, 50 м.

При больших напорах возникают затруднения, связанные с увеличением водопроницаемости бетона и существенным возрастанием толщины стенок из-за небольшой сопротивляемости бетона растяжению. Для увеличения диапазона применяемости железобетонных трубопроводов внутренняя поверхность последних бронируется металлической рубашкой из листового железа. Кроме того, такая конструкция возможна и при усилении существующих металлических трубопроводов железобетонной рубашкой.

В связи с вышеизложенным становится ясным актуальность вопроса расчета такого трубопровода на внутреннее давление, температуру и усадку. При этом необходимо рассмотреть два возможных случая работы бетона:

1. до появления трещин в бетоне, когда все сечение трубы работает совместно;
2. после появления трещин в бетоне, когда последний уже не работает на растяжение и растягивающие усилия полностью воспринимаются металлической броней и арматурой.

В обоих случаях вывод расчетных формул дается на основе рассмотрения упругих деформаций отдельных составных частей трубопровода.

1. Бетон работает на сжатие и растяжение

Пусть дано кольцо, состоящее из внутренней металлической рубашки радиуса a и толщиной δ_1 , первого бетонного кольца с внутренним и наружным радиусами a и b , первого ряда арматуры с радиусом центра тяжести сечения арматуры b и приведенной толщиной $\delta_2 = \frac{f_1}{1}$, второго бетонного кольца с радиусами внутренней и наружной поверхностей b и c , второго ряда арматуры с радиусом центра тяжести арматуры c и приведенной толщиной $\delta_3 = \frac{f_2}{1}$.

Для того, чтобы не усложнять расчетные формулы, мы условно считаем второй ряд арматуры расположенным на поверхности трубы.

Пусть далее в таком многослойном кольце имеется внутреннее гидростатическое давление p , а температура внутренней и наружной поверхностями кольца будут T_1 и T_2 .

Ввиду симметричности деформаций на контактных поверхностях колец возникнут только нормальные усилия p_1, p_2, p_3 и p_4 (см. рис. 1.).

Закон изменения температуры по толщине кольца принимаем линейным, т. е. температура в любой точке кольца с радиусом r будет равна:

$$T_r = t_1 + k(r - a), \quad (11)$$

где $t_1 = T_1 - T_0$ — приращение температуры внутренней поверхности трубы от температуры замыкания,

$$k = \frac{T_2 - T_1}{c - a} \quad \text{— перепад}$$

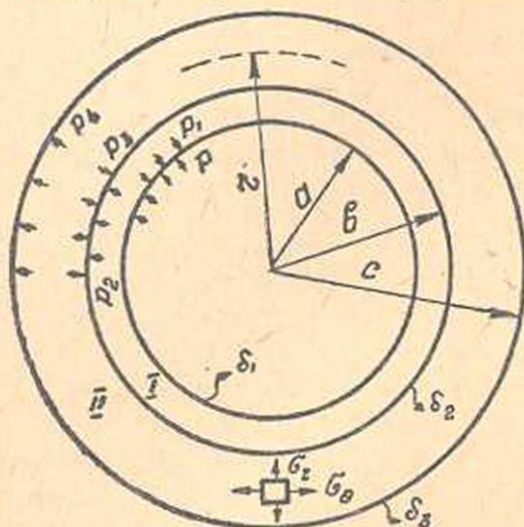


Рис. 1. Усилия p_1, p_2, p_3 и p_4 указаны для железа; для бетона будут иметь обратное направление.

температуры на единицу толщины всего кольца.

При желании можно принять другой закон изменения температуры по толщине кольца, что не изменит в принципе ход расчета.

Необходимые уравнения для определения p_1, p_2, p_3 и p_4 получим из условия совместности деформаций, от температуры и усилий p_i , отдельных колец в точках их контакта.*

Обозначим деформации радиуса металлических колец через $u_r^{(p)}$ — от усилий p_i и $u_r^{(t)}$ — от температуры, $u_{\delta_1 r}^{(p)}$ и $u_{\delta_1 r}^{(t)}$ — первого бетонного кольца от давления и температуры и то же $u_{\delta_2 r}^{(p)}$, $u_{\delta_2 r}^{(t)}$ для второго бетонного кольца. Получим 4 уравнения совместности деформаций:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} + u_a^{(t)} &= u_{\delta_1 a}^{(p)} + u_{\delta_1 a}^{(t)} \\ u_b^{(p)} + u_b^{(t)} &= u_{\delta_1 b}^{(p)} + u_{\delta_1 b}^{(t)} \\ u_b^{(p)} + u_b^{(t)} &= u_{\delta_2 b}^{(p)} + u_{\delta_2 b}^{(t)} \\ u_c^{(p)} + u_c^{(t)} &= u_{\delta_2 c}^{(p)} + u_{\delta_2 c}^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

* Здесь и в последующем рассматривается плоская задача.

Перейдем теперь к определению деформаций.

Приближенное решение задачи Ляме, основанное на теории цилиндрической оболочки и данное акад. Б. Г. Галеркиным [1], приводит к следующим формулам для определения нормальных напряжений в толстом кольце:

$$\sigma_r^{(p)} = \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{r \ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \quad \text{и} \quad \sigma_r^{(p)} = - \frac{p_n a_{n-1}}{r} = \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{r \ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \ln \frac{r}{a_{n-1}} \quad (1.3)$$

и радиального перемещения:

$$u^{(p)} = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{p_n a_{n-1} - p_n' a_n}{\ln \frac{a_n}{a_{n-1}}}, \quad (1.4)$$

где $\ln$ — натуральный логарифм, E и ν модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона материала.

Эти приближенные формулы дают достаточную для целей практики точность [1] и значительно упрощают расчетные формулы в случае многослойного кольца.

Нормальные напряжения и деформация радиуса кольца от воздействия температуры для толстого кольца определяются по формулам [2]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta^{(t)} &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\left(1 + \frac{a_{n-1}^2}{r^2} \right) (T_{cp} - T_{rcp}) + 2(T_{rcp} - T_r) \right] \\ \sigma_r^{(t)} &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left(1 - \frac{a_{n-1}^2}{r^2} \right) (T_{cp} - T_{rcp}) \\ u^{(t)} &= (1+\nu) \alpha r \left[T_{rcp} - \frac{1-2\nu + \frac{a_{n-1}^2}{r^2}}{1-\nu} \cdot \frac{T_{cp} - T_{rcp}}{2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где} \quad T_{cp} &= \frac{2}{a_n^2 - a_{n-1}^2} \int_{a_{n-1}}^{a_n} T_r r dr \\ T_{rcp} &= \frac{2}{r^2 - a_{n-1}^2} \int_{a_{n-1}}^r T_r r dr \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

* В аналогичной формуле в статье (2) Мелещенко и Можевитазова допущена ошибка.

Принимая во внимание (1.1), (1.6) может быть представлено в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{cp} &= t_1 - \kappa a + \frac{2\kappa}{3} \cdot \frac{a_n^3 - a_{n-1}^3}{a_n^2 - a_{n-1}^2} \\ T_{rcp} &= t_1 - \kappa a + \frac{2\kappa}{3} \cdot \frac{r^3 - a_{n-1}^3}{r^2 - a_{n-1}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Применяя формулы (1.4) и (1.5) для первого и второго бетонных колец и учитывая (1.7), получим:

а) для первого бетонного кольца

$$u_{\sigma_1 a}^{(p)} = u_{\sigma_1 b}^{(p)} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_6} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{a}{b}} \quad (1.8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{\sigma_1 a}^{(t)} &= (1 + \nu_1) \alpha_1 a \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ u_{\sigma_1 b}^{(t)} &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+a} - a \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

б) для второго бетонного кольца

$$u_{\sigma_2 b}^{(p)} = u_{\sigma_2 c}^{(p)} = \frac{1 - \nu_2^2}{E_6} \cdot \frac{p_2 b - p_4 c}{\ln \frac{c}{b}} \quad (1.10)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{\sigma_2 b}^{(t)} &= (1 + \nu_2) \alpha_2 b \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ u_{\sigma_2 c}^{(t)} &= (1 + \nu_2) \alpha_2 c \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

где $t_2 = T_2 - T_0$ — изменение температуры наружной поверхности от температуры замыкания T_0 .

Для металлической оболочки и арматуры применим формулы для тонких цилиндрических оболочек. Тогда деформации от усилий p_i выражаются так:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} &= \frac{(p - p_1) a^2}{E \delta_1} \\ u_b^{(p)} &= \frac{(p_1 - p_2) b^2}{E \delta_2} \\ u_c^{(p)} &= \frac{p_2 c^2}{E \delta_3} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Для определения деформаций от температуры применим третью формулу (1.5) считая, что $T_{ср} = T_{гср}$ и что температура по толщине постоянна. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(1)} &= (1+\nu) \alpha a t, \\ u_b^{(1)} &= (1+\nu) \alpha b [t_1 + k(b-a)] \\ u_c^{(1)} &= (1+\nu) \alpha c t_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Подставляя (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) и (1.13) в уравнения совместности деформаций (1.2), получим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} (p-p_1) \frac{a^2}{\delta_1} + D_1 &= D_2 + n \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ (p_2 - p_1) \frac{b^2}{\delta_2} + D_3 &= D_4 + n \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ (p_2 - p_3) \frac{b^2}{\delta_2} + D_5 &= D_6 + n \frac{p_2 b - p_3 c}{\ln \frac{c}{b}} \\ p_4 \frac{c^2}{\delta_3} + D_7 &= D_8 + n \frac{p_2 b - p_3 c}{\ln \frac{c}{b}} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Здесь принято:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= (1+\nu) \alpha a E t_1 \\ D_2 &= (1+\nu_1) \alpha_1 a E \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ D_3 &= (1+\nu) \alpha b E [t_1 + k(b-a)] \\ D_4 &= (1+\nu_1) \alpha_1 b E \left[t_1 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \right] \\ D_5 &= (1+\nu_1) \alpha_1 b E \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ D_6 &= (1+\nu) \alpha c E t_2 \\ D_7 &= (1+\nu_1) \alpha_1 c E \left[t_2 + \frac{k}{3} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \right] \\ n &= \frac{(1-\nu_1^2) E}{E_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Решая систему (1.14), получим:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{B_1}{A_1} p + \frac{1}{A_1} \left[(D_1 - D_2) \ln \frac{c}{a} + (D_4 - D_5) \ln \frac{c}{b} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\delta_2 n}{b} (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) - \frac{\delta_3 n}{c} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6) \right] \\ p_2 &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1 b} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \\ p_2 - p_3 &= \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} (p - p_1) + \frac{\delta_2}{b^2} (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) \\ p_4 &= \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} (p - p_1) + \frac{\delta_3}{c^2} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6), \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= n a \left[1 + \frac{a}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\delta_3}{c} + \frac{\ln \frac{c}{a}}{n} \right) \right] \\ p_1 &= \frac{n a^2}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\delta_3}{c} + \frac{\ln \frac{c}{a}}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

Формулы (1.16) дают возможность определить усилия на контактах отдельных колец при действии внутреннего давления и температуры.

а) *Усилия только от внутреннего гидростатического давления.*

Если положить в формулах (1.16) $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_6 = D_7 = 0$, мы получим формулы для усилий в контактах колец только от внутреннего гидростатического давления:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_1}{A_1} p \\ p_2^{(p)} &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n b \delta_1} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 \\ (p_2 - p_3)^{(p)} &= \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} (p - p_1) \\ p_4^{(p)} &= \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} (p - p_1) \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

б) *Усилия только от температуры.*

При равенстве нулю гидростатического давления формулы (1.16) дадут распределение усилий по контактам от температуры:

$$\left. \begin{aligned}
 p_1^{(t)} &= \frac{1}{A_1} \left[(D_1 - D_2) \ln \frac{c}{a} + (D_4 - D_5) \ln \frac{c}{b} - \frac{\delta_2 n}{b} (D_1 + D_4 - \right. \\
 &\quad \left. - D_2 - D_5) - \frac{\delta_3 n}{c} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6) \right] \\
 p_2^{(t)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \\
 (p_3 - p_2)^{(t)} &= - \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_2}{b^2} (D_1 + D_4 - D_2 - D_5) \\
 p_4^{(t)} &= - \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_3}{c^2} (D_1 + D_4 + D_7 - D_2 - D_5 - D_6)
 \end{aligned} \right\} (1.19)$$

б) *Усилия только от усадки.*

Рассматривая явление усадки как условное равномерное понижение температуры бетона на t_y^0 мы из формул (1.19) можем получить расчетные формулы для определения усилий в контактах, положив

$$\left. \begin{aligned}
 D_1 &= D_2 = D_5 = k = 0 \\
 D_3 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 a E t_y \\
 D_4 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b E t_y \\
 D_6 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 b E t_y \\
 D_7 &= (1 + \nu_1) \alpha_1 c E t_y
 \end{aligned} \right\} (1.20)$$

Тогда (1.19) примут вид:

$$\left. \begin{aligned}
 p_1^{(y)} &= - \frac{(1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y}{A_1} \left[a \ln \frac{c}{a} + \frac{n \delta_2}{b} (b - a) + \frac{n \delta_3}{c} (c - a) \right] \\
 p_2^{(y)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{\delta_1 n} \right) p_1 + \frac{(1 + \nu_1) \ln \frac{b}{a}}{n b} \alpha_1 a E t_y \\
 (p_3 - p_2)^{(y)} &= - \frac{a^2 \delta_2}{b^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_2 (1 + \nu_1) (b - a)}{b^2} \alpha_1 E t_y \\
 p_4^{(y)} &= - \frac{a^2 \delta_3}{c^2 \delta_1} p_1 + \frac{\delta_3 (1 + \nu_1) (c - a)}{c^2} \alpha_1 E t_y
 \end{aligned} \right\} (1.21)$$

После определения усилий напряжения определяются по формулам:

а) *Во внутренней металлической рубашке*

$$\sigma_0^{(p)} = \frac{p - p_1}{\delta_1} a; \quad (1.22)$$

все остальные напряжения практически пренебрежимы.

б) В первом ряду арматуры:

$$\sigma_{\theta}^{(p)} = \frac{p_1 - p_2}{\delta_2} b \quad (1.23)$$

в) Во втором ряду арматуры:

$$\sigma_{\theta}^{(p)} = \frac{p_4 c}{\delta_2} \quad (1.24)$$

г) В первом бетонном кольце:

1) От гидростатического давления

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)} = \frac{p_1 a - p_2 b}{r \ln \frac{b}{a}} \quad (1.25)$$

Для крайних точек при $r=a$ и $r=b$ формула (1.25) дает

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)}(a) = \frac{p_1 a - p_2 b}{a \ln \frac{b}{a}}; \quad \sigma_{\theta, r}^{(p)}(b) = \frac{p_1 a - p_2 b}{b \ln \frac{b}{a}} \quad (1.26)$$

Нормальные напряжения $\sigma_r^{(p)}$ могут быть определены по формуле (1.3).

2) От неравномерного распределения температуры.

Для крайних точек

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=a \quad \sigma_{\theta, r}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2b^2}{a+b} - a \right) \\ r=b \quad \sigma_{\theta, r}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2a^2}{a+b} - b \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

для крайних точек кольца

$$\sigma_{\theta, r}^{(t)}(a) = \sigma_{\theta, r}^{(t)}(b) = 0;$$

для промежуточных точек $\sigma_{\theta, r}^{(t)}(r)$ могут быть определены по второй из формул (1.5).

3) От усадки или равномерного распределения температуры.

Как это следует из формул (1.5) при равномерном изменении температуры кольца

$$\sigma_{\theta}^{(y)} = \sigma_r^{(y)} = 0$$

д) Во втором бетонном кольце

1) От равномерно распределенного давления

$$\sigma_{\theta, r}^{(p)} = \frac{p_3 b - p_4 c}{r \ln \frac{c}{b}} \quad (1.28)$$

напряжения в крайних точках

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=b \quad \sigma_{\theta\theta}^{(p)} &= \frac{p_3 b - p_4 c}{b \ln \frac{c}{b}} \\ r=c \quad \sigma_{\theta\theta}^{(p)} &= \frac{p_3 b - p_4 c}{c \ln \frac{c}{b}} \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

2) От неравномерного распределения температуры для крайних точек

$$\left. \begin{aligned} \text{при } r=b \quad \sigma_{\theta\theta}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2c^2}{b+c} - b \right) \\ r=c \quad \sigma_{\theta\theta}^{(t)} &= \frac{\alpha_1 E_0 k}{1-\nu_1} \left(\frac{2b^2}{b+c} - c \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

Таким образом, по формулам (1.18), (1.19), (1.21) определяются усилия от соответствующих расчетных нагрузок и затем по формулам (1.22), (1.23), (1.24), (1.26), (1.27), (1.28), (1.29) и (1.30) определяются соответствующие напряжения. Наибольшие напряжения в отдельных точках определяются как сумма отдельных компонентов.

II. Бетон на растяжение не работает

В этом расчетном случае полагаем нормальные напряжения

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} = 0 \quad (2.31)$$

при всех воздействиях нагрузок — внутреннего гидростатического давления, неравномерной температуры и усадки бетона.

Положим, что в трубопроводе имеется гидростатическое давление p , а температура металлических составляющих кольца, отсчитываемая от температуры замыкания, при линейном изменении температуры по толщине кольца на основании формулы (1.1) есть:

$$\left. \begin{aligned} t_a &= t_1 \\ t_b &= t_1 + k(b-a) \\ t_c &= t_1 + k(c-a) = t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Принимая те же обозначения для деформаций, что и в 1 расчетном случае, получим два уравнения совместности деформаций:

$$\left. \begin{aligned} u_{\theta\theta}^{(t)} - u_{\theta\theta}^{(p)} &= u_b^{(t)} + u_b^{(p)} - u_a^{(t)} - u_a^{(p)} \\ u_{\theta\theta}^{(t)} - u_{\theta\theta}^{(p)} &= u_c^{(t)} + u_c^{(p)} - u_b^{(t)} - u_b^{(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Здесь $u_{\theta\theta}^{(t)}$, $u_{\theta\theta}^{(p)}$, $u_{\theta\theta}^{(t)}$ и $u_{\theta\theta}^{(p)}$ не зависят от радиуса, а зависят только от толщины бетонных колец.

Уравнения (2.33) недостаточны для определения четырех неизвестных. Остальные два уравнения получим из рассмотрения уравнений равновесия любого сектора бетонных цилиндров с центральным углом θ (см. рис. 2).

$$\left. \begin{aligned} p_1 a \theta &= p_2 b \theta = \sigma_{\theta, r}^{(p)} r \theta \\ p_3 b \theta &= p_4 c \theta = \sigma_{\theta, r}^{(p)} r \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} p_1 a &= p_2 b = r \sigma_{\theta, r}^{(p)} \\ p_3 b &= p_4 c = r \sigma_{\theta, r}^{(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Деформации металлической оболочки и арматуры определяются по формулам (1.12) и (1.13) т. е.:

$$\left. \begin{aligned} u_a^{(p)} &= \frac{(p_1 - p_2) a^2}{E \delta_1}; & u_a^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha t_1 \\ u_b^{(p)} &= \frac{(p_2 - p_3) b^2}{E \delta_2}; & u_b^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha b [t_1 + k(b - a)] \\ u_c^{(p)} &= \frac{p_4 c^2}{E \delta_3}; & u_c^{(t)} &= (1 + \nu) \alpha t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Радиальное сжатие бетонного кольца, вызванное силами p_1 и p_2 , может быть определено из уравнения:

$$\frac{du_{\theta, r}^{(p)}}{dr} = \frac{\sigma_{\theta, r}^{(p)}}{E_0} \quad (2.37)$$

Подставляя из (2.35) значение $\sigma_{\theta, r}^{(p)}$ в (2.37) и интегрируя в пределах от a до b , получим

$$u_{\theta, r}^{(p)} = \frac{a p_1}{E_0} \ln \frac{b}{a} \quad (2.38)$$

Аналогично для $u_{\theta, r}^{(p)}$ будем иметь:

$$u_{\theta, r}^{(p)} = \frac{b p_3}{E_0} \ln \frac{c}{b} \quad (2.39)$$

Изменение толщины

бетонного кольца от неравномерного нагрева может быть определено из уравнения;

$$u_{\theta, r}^{(t)} = (1 + \nu_1) \alpha_1 \int_a^b [t_1 + k(r - a)] dr = (1 + \nu_1) (b - a) \alpha_1 \frac{t_a + t_b}{2} \quad (2.40)$$

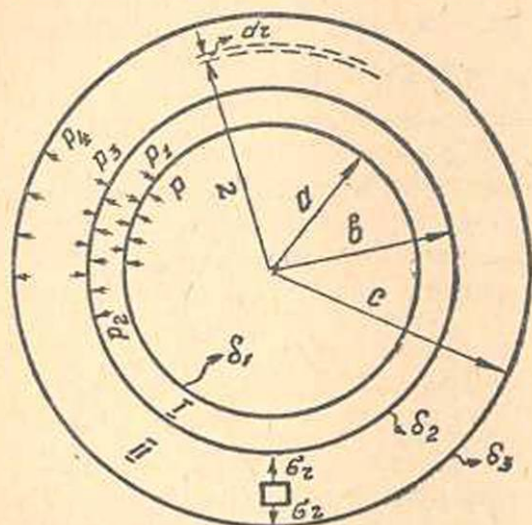


Рис. 2. Усилия p_1 , p_2 , p_3 и p_4 указаны для металла. Усилия для бетона будут иметь обратные знаки.

Аналогично для второго бетонного кольца получим:

$$u_{\delta_2}^{(1)} = (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 \frac{t_c + t_b}{2} \quad (2.41)$$

Подставляя значения деформаций в уравнения (2.33) и учитывая (2.35), получим:

$$\left. \begin{aligned} (1+\nu_1)(b-a) \alpha_1 \frac{t_a + t_b}{2} - \frac{ap_1}{E\delta} \ln \frac{b}{a} = \\ - (1+\nu) \alpha b t_b + \frac{(p_1 a - p_4 c) b}{E\delta_2} - (1+\nu) \alpha a t_a - \frac{(p - p_1) a^2}{E\delta_1} \\ (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 \frac{t_c + t_b}{2} - \frac{cp_4}{E\delta} \ln \frac{c}{b} = \\ = (1+\nu) \alpha c t_c + \frac{p_4 c^2}{E\delta_2} - (1+\nu) \alpha b t_b - \frac{p_1 a - p_4 c}{E\delta_2} b \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Решая систему (2.42), получим:

$$p_1 = \frac{B_2 a \delta_2^2}{\delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p + \frac{B_2 \delta_2^2 k_1 + b \delta_2 k_2}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \quad (2.43)$$

$$p_4 = \frac{a^2 b \delta_2}{c \delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p + \frac{A_2 \delta_2^2 k_2 + b \delta_2 k_1}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \quad (2.44)$$

Имея p_1 и p_4 , усилия p_2 и p_3 могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= \frac{ap_1}{b} \\ p_3 &= \frac{cp_4}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

В формулах (2.43) и (2.44) приняты обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} + n \ln \frac{b}{a}; \quad B_2 = \frac{b}{\delta_1} + \frac{c}{\delta_2} + n \ln \frac{c}{b}; \quad n = \frac{E}{E_0} \\ k_1 &= (1+\nu_1)(b-a) \alpha_1 E \frac{t_a - t_b}{2} + (1+\nu) \alpha E a t_a - (1+\nu) \alpha E b t_b \\ k_2 &= (1+\nu_1)(c-b) \alpha_1 E \frac{t_b + t_c}{2} + (1+\nu) \alpha E b t_b - (1+\nu) \alpha E c t_c \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

формулы (2.43), (2.44) и (2.45) дают возможность определения усилий в контактах колец от воздействия внутреннего давления и неравномерного распределения температуры по толщине кольца.

а) *Усилия только от гидростатического давления:*

Подставляя в формулы (2.43) и (2.44) $k_1 = k_2 = 0$, получим формулы для усилий только от внутреннего гидростатического давления:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_2 a \delta_2^2}{\delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p \\ p_4^{(p)} &= \frac{a^2 b \delta_2}{c \delta_1 (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} p \\ p_2^{(p)} &= \frac{a p_1^{(p)}}{b}; \quad p_3^{(p)} = \frac{c p_4^{(p)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

Проверка полученных результатов может быть произведена по формуле

$$p_1 a + (p_2 - p_3) b + p_4 c = p a. \quad (2.48)$$

б) *Усилия только от воздействия температуры.*

Принимая равным нулю гидростатическое давление p в формулах (2.43), и (2.44) получим распределение усилий на контактные поверхности от неравномерного изменения температуры по толщине колец:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{B_2 \delta_2^2 k_1 + b \delta_2 k_2}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \\ p_4^{(t)} &= \frac{A_2 \delta_2^2 k_2 + b \delta_2 k_1}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \\ p_2^{(t)} &= \frac{a p_1^{(t)}}{b}; \quad p_3^{(t)} = \frac{c p_4^{(t)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Проверка производится по формуле (2.48) при $p = 0$.

в) *Усилия только от усадки.*

Как и в первом случае, рассматривая усадку как условное равномерное понижение температуры бетона на t_y^0 , мы из формул (2.49) получим формулы для определения усилий в контактах:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= \frac{B_2 \delta_2^2 (b-a) + b \delta_2 (c-b)}{a (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \cdot (1+\nu_1) \alpha_1 E t_y \\ p_4^{(y)} &= \frac{b \delta_2 (b-a) - A_2 \delta_2^2 (c-b)}{c (A_2 B_2 \delta_2^2 - b^2)} \cdot (1+\nu_1) \alpha_1 E t_y \\ p_2^{(y)} &= \frac{a p_1^{(y)}}{b}; \quad p_3^{(y)} = \frac{c p_4^{(y)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Здесь E — модуль упругости металла, ν_1 и α_1 — коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения бетона.

Напряжения в металле определяются по формулам (1.22)–(1.24). Напряжения в бетоне по формулам (2.34).

III. Метод расчета предлагаемого нами способа усиления напорных трубопроводов

Конструкция усиления представляется в следующем виде: на существующий металлический трубопровод, без прекращения его эксплуатации, надевается металлический кожух с зазором 4–5 см. Кожух состоит из двух половинок, которые после обхвата существующего трубопровода свариваются продольным швом (или склепываются). Кожух усиления, приваривается к кольцам жесткости промежуточных опор трубопровода. В последующем, после окончания монтажа, эксплуатация трубопровода прекращается и в пространство между двумя трубами нагнетается цементный раствор под давлением. Время остановки станции, таким образом, сведется к минимуму, необходимому для заполнения зазора раствором и его твердения.

Иные способы усиления трубопровода, как то: установка натяжных металлических бандажей или усиление железобетоном, помимо того, что они не дают полной гарантии в соответствующем усилении трубопровода, потребуют длительной остановки станции для производства работ.

Количество потребного металла по предлагаемому нами способу усиления, при одинаковых допускаемых напряжениях, так же не превзойдет количества металла, применяемого при других способах усиления, а будет меньше, ввиду возможности предварительного вакуирования металла.

При усилении способом натяжных бандажей, для полного прилегания бандаж к трубе во всех точках, потребуются упругие прокладки из свинца или латуни.

Усиление железобетоном, кроме металла, потребует значительного количества бетона.

Помимо указанных преимуществ предлагаемый способ усиления трубопровода дает возможность передачи на вторую рубашку любой доли внутреннего давления трубопровода регулированием давления, нагнетаемого в зазор раствора.

Пусть имеются две концентрические трубы диаметром a и b толщиной соответственно δ_1 и δ_2 (см. рис. 3). Далее положим, что в трубопроводе имеется давление p_b и в зазор между трубами нагнетается раствор под давлением p_n , равное $p_n = p_b$. Тогда рубашка трубопровода будет в не напряженном состоянии и деформация ее будет равна нулю.

Деформация радиуса наружной трубы при этом будет

$$u_n = \frac{p_n b^2}{\delta_2 E} \quad (3.50)$$

После твердения раствора и снятия внутреннего гидростатического давления в зазоре гидростатического распределения напряжений уже не может быть. Поэтому на контактных поверхностях такого трехслойного кольца возникнут новые усилия, равные p_1 между первой рубашкой трубопровода и раствором и p_2 между раствором и второй рубашкой.

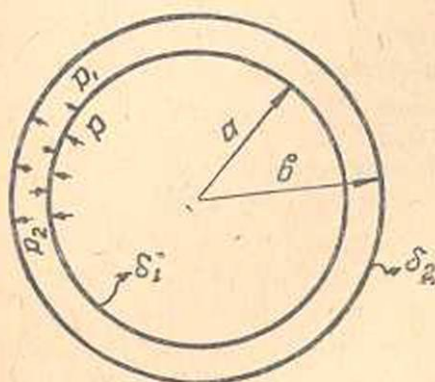


Рис. 3.

Раствор в зазоре между трубами находится в иных условиях, чем растворы, твердеющие на воздухе или в воде. Поэтому предугадать—будет ли происходить явление усадки или разбухания—не представляется возможным.

В дальнейшем принимается усадка, как дающая некоторый запас в расчетах.

В этом случае также рассмотрим два случая работы затвердевшего раствора.

Случай А: раствор работает на растяжение и сжатие.

Случай В: раствор работает только на сжатие.

Рассмотрим каждый случай в отдельности:

Случай А: раствор работает на растяжение и сжатие.

Используя формулы (1.4) и (1.12), напишем уравнения совместности деформаций на контактных поверхностях в предположении, что трубопровод опорожнен; тогда:

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1 a_2}{\delta_1 E} &= \frac{1-\nu_1^2}{E_0} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} \\ \frac{p_2 b^2}{\delta_2 E} + \frac{1-\nu_1^2}{E_0} \cdot \frac{p_1 a - p_2 b}{\ln \frac{b}{a}} &= \frac{p_n b^2}{E \delta_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

Решая уравнение (3.51), получим распределение первоначального давления нагнетания:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(u)} &= \frac{b^2}{a \delta_2 \left(\frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{A_2 B_2 \ln \frac{b}{a}}{n} \right)} p_n \\ p_2^{(u)} &= \frac{a \ln \frac{b}{a}}{b n} A_2 p_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

$$\text{Здесь: } n = \frac{(1 - \nu_1^2) E}{E_0}; \quad A_2 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{a}{\delta_1}; \quad B_2 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{b}{\delta_2}. \quad (3.53)$$

Расчет на внутреннее давление, температуру и усадку производится по формулам (1.18), (1.19) и (1.20), которые для данного случая принимают вид:

1) от гидростатического давления

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{B_1}{A_1} p \\ p_2^{(p)} &= - \frac{a^2 \ln \frac{b}{a}}{n b \delta_1} p + \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{здесь: } A_1 &= n a \left[1 + \frac{a}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\ln \frac{b}{a}}{n} \right) \right] \\ B_1 &= \frac{n a^2}{\delta_1} \left(\frac{\delta_2}{b} + \frac{\ln \frac{b}{a}}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

2) от температуры

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{1}{A_1} \left(\ln \frac{b}{a} - \frac{\delta_2 n}{b} \right) (D_1 + D_4 - D_2 - D_3) \\ p_2^{(t)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 - (D_1 - D_2) \frac{\ln \frac{b}{a}}{n b} \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

где D_1, D_2, D_3 и D_4 определяются по формулам (1.15)

3) усилия от усадки

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= - \frac{(1 + \nu_1) \alpha_1 E t_y}{A_1} \left[a \ln \frac{b}{a} + \frac{n \delta_2}{b} (b - a) \right] \\ p_2^{(y)} &= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n \delta_1} \right) p_1 + \frac{(1 + \nu_1) \ln \frac{b}{a}}{n b} \alpha_1 a E t_y \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

После определения усилий p_1 и p_2 от всех видов нагрузок напряжения определяются по формулам (1.22) — (1.27).

Случай В: раствор дал трещины

Используя формулы (2.34), (2.38) и (1.12), напишем уравнение совместности деформаций

$$\frac{p_1 a^2}{\delta_1 E} + \frac{p_1 ab}{\delta_2 E} + \frac{a p_1}{E_0} \ln \frac{b}{a} = \frac{p_n b^2}{\delta_2 E}, \quad (3.58)$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(n)} &= \frac{b^2}{a \delta_2 A_2} p_n \\ p_2^{(n)} &= \frac{a p_1^{(n)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

$$\text{здесь: } A_2 = \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} + n \ln \frac{b}{a} \text{ и } n = \frac{E}{E_0} \quad (3.60)$$

Расчет на внутреннее давление, температуру и усадку производится по формулам:

1) от внутреннего давления

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(p)} &= \frac{a}{\delta_1 A_2} p \\ p_2^{(p)} &= \frac{a p_1^{(p)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.61)$$

2) усилия от температуры

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(t)} &= \frac{k_1}{a A_2} \\ p_2^{(t)} &= \frac{a p_1^{(t)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.62)$$

где, как и раньше:

$$k_1 = (1 + \nu_1) \alpha_1 E (b - a) \frac{t_a + t_b}{2} + (1 + \nu) \alpha E a t_a - (1 + \nu) \alpha E b t_b$$

3) усилия от усадки

$$\left. \begin{aligned} p_1^{(y)} &= \frac{(1 + \nu_1) (b - a) \alpha_1 E t_y}{a A_2} \\ p_2^{(y)} &= \frac{a p_1^{(y)}}{b} \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

Напряжения определяются по формулам (1.22) — (1.24) и (2.34). Поясним вышесказанное несколькими примерами.

Пример. Дана металлическая труба радиуса $a = 75$ см с толщиной стенки $\delta_1 = 1,5$ см, испытывающая гидростатическое давление $p = 15,0$ к/см². Требуется произвести усиление трубопровода.

Рассмотрим три из возможных способов усиления:

Вариант I. Усиление производится второй металлической рубашкой радиуса $b = 80$ см и толщиной стенки $\delta_2 = 0,6$ см, с последующим нагнетанием в зазор цементного раствора под давлением $p_n = 5,0$ к/см².

Вариант II. Усиление производится натяжными бандажами. Приведенная толщина принимается равной толщине второй трубы по первому варианту, т. е. $\delta_2 = 0,6$ см.

Вариант III. Усиление производится железобетоном толщиной 10 см. Приведенная толщина арматуры принимается равной толщине II трубы по первому варианту $\delta_2 = 0,6$ см и радиус центра арматуры $b = 80$ см.

Вариант I. Рассмотрим сперва случай, когда раствор работает на сжатие и растяжение.

По формулам (3.53) имеем:

$$n = \frac{(1 - \nu_1^2) E}{E_0} = \frac{\left(1 - \frac{1}{6^2}\right) \times 2,1 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 10,2$$

$$A_3 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{a}{\delta_1} = \frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{75}{1,5} = 106$$

$$B_3 = \frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{b}{\delta_2} = \frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{80}{0,6} = 22,5$$

Далее по (3.52) получаем распределение давления нагнетания между трубами после твердения раствора:

$$p_1^{(n)} \frac{b^2}{a \delta_2 \left(\frac{n}{\ln \frac{b}{a}} - \frac{A_3 B_3 \ln \frac{b}{a}}{n} \right)} p_n =$$

$$\frac{80^2}{75 \times 0,6 \left(\frac{10,2}{\ln \frac{80}{75}} - \frac{106 \times 22,5 \ln \frac{80}{75}}{10,2} \right)} p_n = 1,02 p_n = 5,1 \text{ к/см}^2$$

$$p_2^{(n)} = \frac{a \ln \frac{b}{a}}{n b} A_3 p_1^{(n)} = \frac{75 \times \ln \frac{80}{75}}{10,2 \times 80} \times 106 \times 1,02 p_n = 0,65 p_n = 3,25 \text{ к/см}^2$$

Определим напряжение в бетонном кольце:

$$\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{p_1^{(n)} a - p_2^{(n)} b}{r \ln \frac{b}{a}} = \frac{1,02 \times 75 - 0,65 \times 80}{r \ln \frac{80}{75}} p_n = 377 \times \frac{p_n}{r}$$

Максимальные напряжения будут на внутренней поверхности кольца при $r = a$; тогда:

$$\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{377}{75} p_n = 5,02 p_n = 25,1 \text{ кг/см}^2$$

при $r = b$: $\sigma_{\theta}^{(n)} = \frac{377}{80} p_n = 4,72 p_n = 23,6 \text{ кг/см}^2$.

При столь больших растягивающих напряжениях в растворе появление радиальных трещин неизбежно. Поэтому в дальнейшем расчеты производим на случай, когда раствор воспринимает только сжимающие напряжения.

1) В случае наличия трещин распределение давления нагнетания по формулам (3.60) и (3.59) будет:

$$n = \frac{E}{E_0} = \frac{2,1 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 10,5$$

$$A_2 = \frac{a}{\delta_1} + \frac{b}{\delta_2} n \ln \frac{b}{a} = \frac{75}{1,5} + \frac{80}{0,6} + 10,5 \ln \frac{80}{75} = 184,2$$

$$p_1^{(n)} = \frac{b^2}{a \delta_2 A_2} p_n = \frac{80^2}{75 \times 0,6 \times 184,2} \times 5 = 3,86 \text{ кг/см}^2$$

$$p_2^{(n)} = \frac{a p_1^{(n)}}{b} = \frac{75 \times 3,86}{80} = 3,62 \text{ кг/см}^2$$

2) Распределение усилий от внутреннего давления по формуле (3.61)

$$p_1^{(p)} = \frac{a}{\delta_1 A_2} p = \frac{75}{0,6 \times 184,2} \times 15 = 4,06 \text{ кг/см}^2$$

$$p_2^{(p)} = \frac{a p_1^{(p)}}{b} = \frac{75 \times 4,06}{80} = 3,83 \text{ кг/см}^2$$

3) Распределение усилий от температуры.

Температуру внутренней поверхности трубы при отсчете от температуры замыкания принимаем $t_a = +10^\circ$, то же наружной поверхности — $t_b = +15^\circ$. Тогда:

$$\begin{aligned} k_1 &= (1 + \nu_1) (b-a) \alpha_1 E \frac{t_a + t_b}{2} + (1 + \nu) \alpha E a t_a - (1 + \nu) \alpha E b t_b = \\ &= \left(1 + \frac{1}{6} \right) (80-75) \times 1 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \frac{10+15}{2} + \\ &+ (1+0,3) \times 1,2 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \times 75 \times 10 - (1+0,3) \times 1,2 \times 10^{-5} \times 2,1 \times \\ &\times 10^6 \times 80 \times 15 = -13170 \end{aligned}$$

По формулам (3.62)

$$p_1^{(t)} = \frac{k_1}{aA_2} = - \frac{13170}{75 \times 184,2} = -0,95 \text{ к/см}^2$$

$$p_2^{(t)} = \frac{a p_1^{(t)}}{b} = - \frac{75 \times 0,95}{80} = -0,84 \text{ к/см}^2$$

При понижении температуры $t_a = -10^\circ$, $t_b = -15^\circ$; при этом

$$p_1^{(t)} = +0,95 \text{ к/см}^2 \text{ и } p_2^{(t)} = +0,84 \text{ к/см}^2$$

4) Распределение усилий от усадки.

Принимаем, что усадка соответствует понижению температуры раствора на $t_y = -20^\circ$. Тогда по (3.63) получим:

$$p_1^{(y)} = \frac{(1+\nu_1)(b-a)zEt_y}{aA_2} = -$$

$$= - \frac{\left(1 + \frac{1}{6}\right)(80-75) \times 1 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^6 \times 20}{75 \times 184,2} = -0,18 \text{ к/см}^2.$$

$$p_2^{(y)} = \frac{a p_1^{(y)}}{b} = - \frac{75 \times 0,18}{80} = -0,17$$

Максимальные суммарные усилия от всех расчетных случаев будут:

$$\Sigma p_{1\max} = 3,86 + 4,08 + 0,95 - 0,18 = 8,71 \text{ к/см}^2$$

$$\Sigma p_{2\max} = 3,62 + 3,83 + 0,84 - 0,17 = 8,07 \text{ к/см}^2$$

Минимальные суммарные усилия будут при повышении температуры трубы:

$$\Sigma p_{1\min} = 3,86 + 4,08 - 0,95 - 0,18 = 6,81 \text{ к/см}^2$$

$$\Sigma p_{2\min} = 3,62 + 3,83 - 0,84 - 0,17 = 6,4 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в теле рубашки трубопровода будут:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{P - \Sigma p_{1\min}}{\delta_1} a = \frac{15 - 6,81}{1,5} \times 75 = 409 \text{ к/см}^2$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{P - \Sigma p_{1\max}}{\delta_1} a = \frac{15 - 8,71}{1,5} \times 75 = 316 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в защитном кожухе:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{\Sigma p_{2\min}}{\delta_2} b = \frac{6,4 \times 80}{0,6} = 854 \text{ к/см}^2$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{\Sigma P_{2\max}}{\delta_2} b = \frac{8,07 \times 80}{0,6} = 1075 \text{ к/см}^2.$$

Таким образом, по первому варианту минимальное уменьшение напряжения в теле трубы составляет в процентах от первоначального:

$$K_{I\min} = \frac{750 - 409}{750} \times 100 = 45,5\%.$$

Вариант II. При усилении бандажами первоначальные напряжения в трубе от натяжения бандажей не учитываем, ввиду их неопределенности. Считаем, что натяжением бандажей достигается только плотное соприкосновение бандажей с трубой.

Напряжение в трубопроводе, усиленном бандажами, определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{p a}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{15 \times 75}{1,5 + 0,6} = 535 \text{ к/см}^2.$$

Уменьшение первоначальных напряжений в процентах составляет всего:

$$K_{II} = \frac{750 - 535}{750} \times 100 = 28,7\%.$$

При таком же усилении, что и в первом варианте, потребовалось бы увеличить приведенную толщину бандажей до

$$\delta_2 = \frac{15 \times 75}{409} - 1,5 = 1,3 \text{ см},$$

т. е. больше чем вдвое против первого варианта.

Вариант III. В этом случае принятые размеры железобетонной рубашки позволяют воспользоваться результатами расчета по первому варианту.

Суммарные усилия p_1 и p_2 будут складываться из пунктов 2, 3, и 4 (см. расчеты по I варианту).

Максимальные усилия будут:

$$\Sigma p_{1\max} = 4,08 + 0,95 - 0,18 = 4,85 \text{ к/см}^2,$$

$$\Sigma p_{2\max} = 3,83 + 0,84 - 0,17 = 4,45 \text{ к/см}^2.$$

Минимальные усилия составляют:

$$\Sigma p_{1\min} = 4,08 - 0,95 - 0,18 = 2,95 \text{ к/см}^2,$$

$$\Sigma p_{2\min} = 3,83 + 0,84 - 0,17 = 2,78 \text{ к/см}^2.$$

Напряжения в теле рубашки трубопровода:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{15 - 2,95}{1,5} \times 75 = 603 \text{ к/см}^2,$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{15 - 4,85}{1,5} \times 75 = 507 \text{ к/см}^2$$

Напряжения в арматуре:

а) при повышении температуры

$$\sigma_{\min} = \frac{2,78 \times 80}{0,6} = 304 \text{ к/см}^2,$$

б) при понижении температуры

$$\sigma_{\max} = \frac{4,45 \times 80}{0,6} = 598 \text{ к/см}^2.$$

Уменьшение первоначальных напряжений в трубе в процентах от первоначального составляет:

$$K_{III \min} \frac{750 - 603}{750} \times 100 = 19,6\%.$$

Приведенный пример убедительно показывает несравненное преимущество предлагаемого нами способа усиления трубопровода перед другими.

Институт Строительных материалов и Сооружений
Академии Наук Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Федоров.—Расчет облицовок напорных гидротехнических тоннелей на внутреннее давление. Изв. НИИГ, т. XXV, 1939.
2. Н. Т. Мелещенко и А. Л. Можевитинов.—Расчет напряжений в круговой арке при воздействии гидростатической нагрузки и температуры. Изв. НИИГ, XXII, 938.

Լ. Ռ. Բաղդարյան

ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՆԵՐՔԻՆ ՇԱՊԻԿՈՎ ԵՐԿԱՔԱՐԵՏՈՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՆԵՐՔԻՆ ՃՆՇՄԱՆ, ՋԵՐՍՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԿԾԿՄԱՆ ՆԿԱՏՄԱՍԲ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ներկա աշխատությունը նվիրված է երկաթարետոն պաշտպանիչ շապիկով մետաղական խողովակաշարի՝ ներքին հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմության և կծկման հաշվարկին:

Առաջին մասում արվում է երկշար արմատուրով երկաթարետոն շապիկի հաշվարկի բանաձևերի արտածումը, երբ բետոնն աշխատում է սեղման և ձգման դեմ:

Երկրորդ մասում բերվում է հաշվարկային բանաձևերի արտածումը նույն դեպքի համար այն տարբերությամբ, որ բնութեն աշխատում է միմիայն սեղմման դեմ:

Երրորդ մասում նկարագրվում է գոյություն ունեցող մետաղական խողովակաշարերի մեր առաջաբեկած ուժեղացման կոնստրուկցիան ավելի մեծ տրամագծի մետաղական շապիկի միջոցով, ընդ որում միջխողովակային տարածության մեջ շաղախ է մղվում: Բերվում է նաև այդ կոնստրուկցիայի հաշվարկը: Կոնստրուկցիան հնարավորություն է տալիս հիմնական աշխատանքները կատարել առանց հիդրոկայանը կանգնեցնելու և նվազագույնի հասցնելու հիդրոկայանի աշխատանքի ընդհատումը, որն անհրաժեշտ է միջխողովակային տարածությունը շաղախով լցնելու և շաղախի ամրացման համար:

Վերջում բերվում է խողովակաշարի ուժեղացման օրինակ՝ 3 վարիանտով—մետաղական շապիկով, ձգիչ բանդաժներով և երկնթաբեռոն շապիկով: Օրինակը համոզիչ կերպով ցույց է տալիս ուժեղացման առաջարկվող եղանակի առավելությունները: