

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 62–762:539

Ю. А. ВЕРИГИН, Ж. О. КУЛЬСЕИТОВ, доктора техн. наук, профессора,
Б. М. АБДЕЕВ, канд. техн. наук, проф., Т. Ф. БРИМ, асп. (Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул)

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАДИАЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯГА

Получено приближенное аналитическое решение осесимметричной конструкционной статической задачи теории упругости о радиальном взаимодействии деформируемого эластомерного кольца эллиптического сечения с абсолютно жесткими цилиндрическими поверхностями. Выведены расчетные формулы всех основных функциональных характеристик моделируемого стационарного изотермического процесса механики упругодеформируемого твердого тела в зависимости от среднего контактного давления, действующего на внешнем периметре кольцевого элемента. Результаты исследований можно использовать при проектировании современных машин, аппаратов и приборов для оценки несущей способности резиновых уплотнителей.

Резиновые уплотнители прочно вошли в конструкции современных строительных машин и механизмов, нормальная работа которых связана с надежным функционированием, широко применяемых пневматических, гидравлических и вакуумных систем [1, 2].

Наиболее распространенным и универсальным видом герметизирующих несущих элементов являются эластичные кольца круглого и эллиптического сечений [1, 3] из различных синтетических резин (эластомеров), которые в отличие от манжет, шевронных и других уплотнителей способны с большой эффективностью герметизировать одно- и двухстороннее давление.

Предлагается рассмотреть фундаментально-прикладную изотермическую контактную задачу механики упругодеформированного твердого тела, не описанную в научно-технической и физико-математической литературе. Ее актуальность определяется не только теоретической новизной и комплексностью базовой расчетной модели [4], но и возможностью практического использования полученных результатов в машиностроении при проектировании эластомерных уплотнителей для условий их радиального сжатия и предварительного натяга [1].

Резина, обладающая такими свойствами, как эластичность, долговечность, коррозионностойкость, простота в изготовлении и экономичность, занимает одно из первых мест в качестве конструкционного герметизирующего материала.

В качестве расчетной схемы рассматривается кольцо несимметричного сплюснутого овального профиля, имеющее в сечении два плавнотупоугольных полуэллипса (рис. 1), что по сравнению с более скручиваемым и менее надежным при эксплуатации круглым сечением ($a_{эв} = a_{эн} = r_э$) [1], а также симметричным эллиптическим ($a_{эв} = a_{эн} < r_э$) позволяет осуществлять за счет большего числа варьируемых параметров уже на стадии математического моделирования реализацию процесса регулирования (оптимизации) начальных контактных давлений и натягов.

При проектировании деталей машин широкое распространение получил метод расчета колец большой и малой кривизны [5, 6], основанный на модели жесткого криволинейного бруса, поперечные сечения которого при нагружении не деформируются, а лишь перемещаются и разворачи-

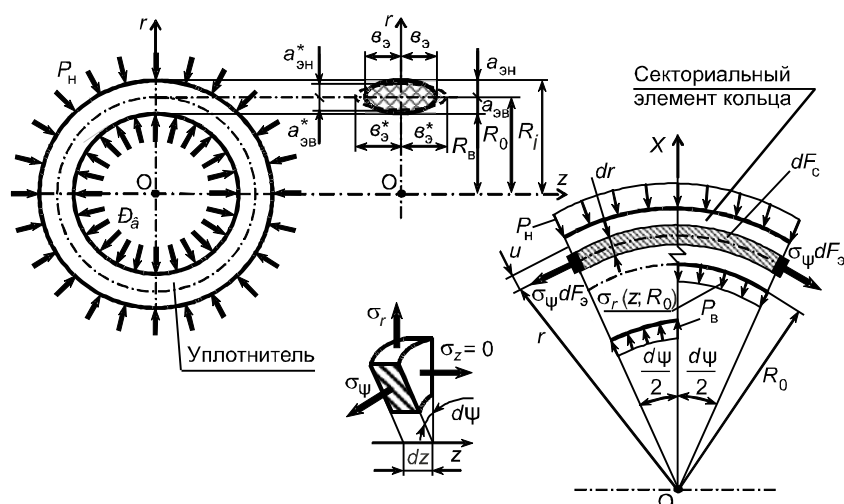


Рис. 1

ваются в своей плоскости. Однако для эластичных кольцевых элементов конструкций этот способ решения задачи совершенно не пригоден ввиду большой деформативности резины и несоответствию методики выбора параметров порядка [7].

Известная справочно-нормативная методика расчета на прочность и жесткость эластомерных герметизирующих колец [1] базируется на некорректной с физико-математической точки зрения предельно упрощенной теории линейного напряженного состояния материала, которая, не учитывая конструктивные особенности уплотнителя и схему его нагружения, противоречит классической задаче Ляме о радиальном сжатии круглых пластин-дисков и толстостенных труб-цилиндров [6].

В основу представляемой работы положены предпосылки, гипотезы и уравнения уточненной механико-математической модели [4], учитывающей (см. рис. 1):

— две компоненты напряжений из четырех ($\sigma_r \neq 0$, $\sigma_\psi \neq 0$, $\sigma_z = \tau = 0$) и пространственный характер исследуемого изотермического процесса по деформациям ($\epsilon_r \neq 0$, $\epsilon_\psi \neq 0$, $\epsilon_z \neq 0$, $\gamma = 0$) при условии соблюдения закона Гука для резины, т. е. $|\epsilon_{\max}| \leq 0,25$ [1];

— стационарный тепловой градиент $\Delta\theta = \theta - \theta_0 = \text{const}$ [6] в предположении, что во всем диапазоне эксплуатационных температур θ эластомер находится в высокоэластическом состоянии [1, 3] (где $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ — начальная температура);

— фактор формы $0,5 \leq \Phi_3 \leq 1,5$ [1, 4, 8];

— радиусы кривизны R_B , R_H , R_0 и начальное относительное растяжение кольца $\bar{\epsilon}_\psi = 0,01 \div 0,05$ по внутреннему радиальному размеру R_B , которое рекомендуется создавать при монтаже уплотнителя [1];

— деформированное состояние кольца при определении силовых и геометрических контактных характеристик с допущением, что эллиптическая форма его сечения сохраняется, а сжимающие цилиндрические поверхности, которые конструируются из металла, являются абсолютно жесткими (модуль упругости резины на несколько порядков меньше, чем, например, у стали [1, 3]);

— фактическую сжимаемость эластомера, когда коэффициент Пуассона $\mu = \mu(\theta) < 0,5$, что важно в случае $\Delta\theta < 0$ [3, 9].

Для понимания существа вопроса приводим только самые необходимые соотношения с использованием оператора Лапласа $\nabla^2 = \partial^2 / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial / \partial r + \partial^2 / \partial z^2$ в цилиндрических координатах r и z ($R_b \leq r \leq R_n$, $-\vartheta \leq z \leq \vartheta$; рис. 1):

1) условие стационарной теплопроводности $\nabla^2 \theta = 0$, которое при $\theta = \text{const}$ выполняется тождественно [6];

2) разрешающее уравнение четвертого порядка

$$\nabla^2(\nabla^2 \varphi) = \nabla^4 \varphi = 0 \quad (1)$$

относительно функции $\varphi = \varphi(r; z)$, связанной с нормальными $\sigma_r, \sigma_\psi, \sigma_z$ и касательным τ напряжениями известными дифференциальными зависимостями [4];

3) температурный функционал J_θ , характеризующий относительную температурную деформацию материала в направлении осей r, z (см. рис. 1) [4, 9]

$$J_\theta = \int_{\theta_0}^{\theta} \alpha_l(\theta) d\theta = \alpha_0 K^{-1} [e^{K(\theta - \theta_0)} - 1], \quad \theta_c \leq \theta \leq \theta_m, \quad (2)$$

где $\alpha_l = \alpha_l(\theta) = \alpha_0 e^{K(\theta - \theta_0)}$ — экспоненциальный коэффициент линейного теплового расширения резины и его значение α_0 , соответствующее $\theta = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$, а $K = \text{const}$ — постоянный параметр, имеющий размерность $(^\circ\text{C})^{-1}$ и определяемый по методике [9];

θ_c — температурная граница фазового перехода к стеклованию резины [1, 9];

$\theta_m > 0$ — предельная эксплуатационная температура эластомера [1];

4) формулы радиального $u = u(r)$ и осевого $w = w(z)$ перемещений [4, 10]:

$$u = -\frac{1+\mu}{E_y} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} + J_\theta r, \quad w = \frac{1+\mu}{E_y} \left[2(1-\mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] + J_\theta z, \quad (3)$$

где $E_y = E_y(\Phi_\vartheta)$ — условный модуль упругости уплотнителя эллиптического профиля, зависящий от фактора формы $\Phi_\vartheta = 0,25\vartheta_\vartheta (a_{\vartheta\text{н}} a_{\vartheta\text{в}})^{-1} \cdot (a_{\vartheta\text{н}} + a_{\vartheta\text{в}})$ [8].

Функции $\sigma_r, \sigma_\psi, \sigma_z, \tau$ и u должны удовлетворять (см. рис. 1) [10]:

а) статическим граничным условиям:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= \int_{F_\vartheta} \sigma_\psi dF_\vartheta - R_0 [P_b (1 - a_{\vartheta\text{в}} R_0^{-1}) - P_n (1 + a_{\vartheta\text{н}} R_0^{-1})] = \\ &= \int_{F_{\vartheta\text{н}}} \sigma_\psi dF_{\vartheta\text{н}} + R_0 \left[2 \int_0^{\vartheta_\vartheta} \sigma_r(z; R_0) dz + P_n (1 + a_{\vartheta\text{н}} R_0^{-1}) \right] = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tau(R_0; \pm \vartheta_\vartheta) = 0, \quad \sigma_z(R_0; \pm \vartheta_\vartheta) = 0, \quad \int_{F_c} \sigma_z dF_c = 0, \quad (5)$$

где $F_\vartheta, F_{\vartheta\text{н}}$ — соответственно площадь всего эллиптического сечения и его верхней (наружной) части;

F_c — площадь сектора при $z = 0$;

$P_b = \text{const}, P_n = \text{const}$ — равномерно распределенные по окружностям радиусами R_b и R_n нагрузки, представляющие собой равнодействующие функций реактивных давлений $q_b = q_b(y)$ и $q_n = q_n(y)$, имеющих максимумы $q_{\text{мв}}, q_{\text{мн}}$ и средние давления $q_{\text{св}}, q_{\text{сн}}$, связанные с P_b, P_n и параметрами

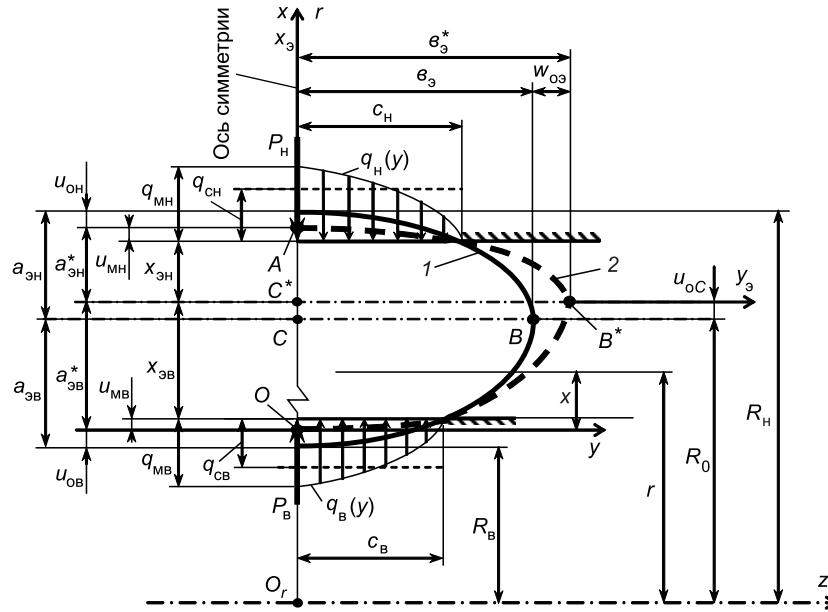


Рис. 2. Расчетная модель
1 — исходное состояние кольца; 2 — общая деформация кольца

c_B , c_H , характеризующими линейные размеры (полуширину) областей контакта, следующим образом (рис. 2):

$$q_{CB} = P_B (2c_B)^{-1}, \quad q_{CH} = P_H (2c_H)^{-1}; \quad (6)$$

б) кинематическому краевому соотношению для зависимости $u(r)$ при $r = R_B = R_0 - a_3$, учитывающему монтажное растяжение кольца [1, 3]:

$$u(R_B) R_B^{-1} = \bar{\epsilon}_\Psi = 0,01 \div 0,05. \quad (7)$$

Принимая во внимание симметрию расчетной модели (см. рис. 1 и 2), аппроксимируем функцию напряжений $\varphi(r; z)$ аналитическим выражением вида [10]

$$\varphi = C_1 z \cdot \ln r + C_2 r^2 z + C_3 z^3, \quad (8)$$

где C_1 , C_2 , C_3 — константы, вычисляемые из условий (4), (5) и (7), после раскрытия которых имеем линейную функциональную зависимость между P_B и P_H

$$P_B = (\beta_2 / \beta_1) P_H + \beta_3 / \beta_1, \quad 0 \leq P_H \leq [P_H], \quad (9)$$

приведенную в статье [10]. Коэффициенты $\beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0$ имеют достаточно громоздкий вид и по этой причине их аналитические выражения здесь не представлены. Формула предельно допустимого значения равнодействующей $[P_H]$ выведена авторами работы [10] из граничного условия физической линейности материала кольца $|\epsilon_{\max}| = 0,25$ [1].

Продолжая решение сформулированной задачи, вводим дополнительную предпосылку о возможности применения фундаментальных зависимостей Герца–Штаермана для эллиптических функций $q_B(y)$, $q_H(y)$ и половинных размеров c_B , c_H цилиндрических поверхностей контакта (см. рис. 2) [11]:

$$q_B = q_B(y) = 2P_B \sqrt{c_B^2 - y^2} (\pi c_B^2)^{-1} = q_{MB} \sqrt{c_B^2 - y^2} (c_B)^{-1}, \quad -c_B \leq y \leq c_B; \quad (10)$$

$$q_H = q_H(y) = 2P_H \sqrt{c_H^2 - y^2} (\pi c_H^2)^{-1} = q_{MH} \sqrt{c_H^2 - y^2} (c_H)^{-1}, \quad -c_H \leq y \leq c_H; \quad (11)$$

$$c_H = 2\sqrt{P_H (\epsilon_3^*)^2 (1 - \mu^2) (\pi a_{3H}^* E_Y)^{-1}}, \quad c_B = 2\sqrt{P_B (\epsilon_3^*)^2 (1 - \mu^2) (\pi a_{3B}^* E_Y)^{-1}}; \quad (12)$$

$$q_{\text{мв}} = 2P_{\text{в}} (\pi c_{\text{в}})^{-1} = 4q_{\text{сн}} \pi^{-1}, \quad q_{\text{мн}} = 2P_{\text{н}} (\pi c_{\text{н}})^{-1} = 4q_{\text{сн}} \pi^{-1}, \quad (13)$$

где $a_{\text{эн}}^*$, $a_{\text{эв}}^*$, $\vartheta_{\text{э}}^*$ — деформированные полуоси эллиптического сечения кольца (см. рис. 1, 2).

Геометрические характеристики $c_{\text{в}}$ и $c_{\text{н}}$ должны удовлетворять двум неравенствам в точках O и A расчетной модели (см. рис. 2) [11]:

$$c_{\text{в}} \ll (\vartheta_{\text{э}}^*)^2 \cdot (a_{\text{эв}}^*)^{-1}, \quad c_{\text{н}} \ll (\vartheta_{\text{э}}^*)^2 \cdot (a_{\text{эн}}^*)^{-1}. \quad (14)$$

Правомерность и корректность использования классических формул (10)–(12) следует, прежде всего, из осевой симметрии решаемой задачи и первоначального соприкосновения взаимодействующих тел по замкнутому круговому контуру, т. е. по линии. При этом модель плоского деформированного состояния, положенная в основу зависимостей (10)–(12), является адекватной и применительно к данной конструкционной (неклассической) задаче [5], по крайней мере, для областей контакта кольца с цилиндрическими поверхностями в пределах границ местных перемещений $u_{\text{мв}}$, $u_{\text{мн}}$ при соблюдении условий (см. рис. 2):

$$|u_{\text{мв}}| \ll a_{\text{эв}}^*, \quad |u_{\text{мн}}| \ll a_{\text{эн}}^*. \quad (15)$$

Далее, определяя зависимости $u = u(r)$ и $w = w(z)$ в соответствии с (3)–(5), (7), (8) и руководствуясь [10], будем иметь для общих перемещений $u_{\text{ов}}$, $u_{\text{он}}$, $u_{\text{ос}}$, $w_{\text{оэ}}$ точек O , A , C и B сечения кольца (см. рис. 1, 2) четыре функции:

$$u_{\text{ов}} = u_{\text{ов}}(R_{\text{в}}), \quad u_{\text{он}} = u_{\text{он}}(R_{\text{н}}), \quad u_{\text{ос}} = u_{\text{ос}}(R_0), \quad w_{\text{оэ}} = w_{\text{оэ}}(\pm \vartheta). \quad (16)$$

Размеры полуосей $a_{\text{эн}}^*$, $a_{\text{эв}}^*$ и $\vartheta_{\text{э}}^*$ деформированного кольцевого профиля, согласно схеме рис. 2, выражаем через кинематические характеристики $u_{\text{ов}}$, $u_{\text{он}}$, $u_{\text{ос}}$ и $w_{\text{оэ}}$ моделируемого процесса:

$$a_{\text{эв}}^* = a_{\text{эв}} - u_{\text{ов}} + u_{\text{ос}}, \quad a_{\text{эн}}^* = a_{\text{эн}} - u_{\text{ос}} + u_{\text{он}}, \quad \vartheta_{\text{э}}^* = \vartheta_{\text{э}} + |w_{\text{оэ}}|, \quad (17)$$

где все радиальные перемещения $u_{\text{ов}}$, $u_{\text{ос}}$, $u_{\text{он}}$ приняты положительными, но при их подстановке в (17) необходимо учитывать фактические знаки $u_{\text{ов}}$, $u_{\text{ос}}$, $u_{\text{он}}$.

Местные (контактные) абсолютные деформации $u_{\text{мв}}$, $u_{\text{мн}}$ определяем в зависимости от размеров $c_{\text{в}}$, $c_{\text{н}}$ из канонических уравнений деформированных эллипсов (см. рис. 2)

$$x_{\text{э}}^2 (a_{\text{эв}}^*)^{-2} + y_{\text{э}}^2 (\vartheta_{\text{э}}^*)^{-2} = 1, \quad x_{\text{э}}^2 (a_{\text{эн}}^*)^{-2} + y_{\text{э}}^2 (\vartheta_{\text{э}}^*)^{-2} = 1, \quad (18)$$

которые решаем относительно $x_{\text{э}} = x_{\text{эв}}$ и $x_{\text{э}} = x_{\text{эн}}$, полагая соответственно $y_{\text{э}} = \pm c_{\text{в}}$, $y_{\text{э}} = \pm c_{\text{н}}$ и принимая во внимание, что $u_{\text{мв}} > 0$ и $u_{\text{мн}} < 0$ в системе отсчета $x_{\text{э}} C^* y_{\text{э}}$:

$$u_{\text{мв}} = a_{\text{эв}}^* - |x_{\text{эв}}| = a_{\text{эв}}^* \left(1 - \sqrt{1 - \frac{c_{\text{в}}^2}{(\vartheta_{\text{э}}^*)^2}} \right), \quad (19)$$

$$u_{\text{мн}} = -(a_{\text{эн}}^* - |x_{\text{эн}}|) = -a_{\text{эн}}^* \left(1 - \sqrt{1 - \frac{c_{\text{н}}^2}{(\vartheta_{\text{э}}^*)^2}} \right).$$

Учитывая (6) и преобразуя правую зависимость (12) к виду

$$16(1 - \mu^2) q_{\text{сн}}^2 (\vartheta_{\text{э}}^*)^2 (\pi E_{\text{у}})^{-1} - P_{\text{н}} a_{\text{эн}}^* = 0 \quad (20)$$

с последующей заменой геометрических $a_{\text{эн}}^*$, $\vartheta_{\text{э}}^*$ и силового $P_{\text{в}}$ параметров согласно (9), (16)–(17), получаем квадратное уравнение для вычисления равнодействующей $P_{\text{н}} \geq 0$ по заданному среднему контактному давлению

$q_{\text{сн}} \geq 0$ и исходным физико-геометрическим характеристикам деформируемого кольца:

$$P_{\text{н}}^2 + P_{\text{н}} \xi_{\text{к1}} + \xi_{\text{к2}} = 0, \quad (21)$$

где формулы функциональных коэффициентов $\xi_{\text{к1}} = \xi_{\text{к1}}(q_{\text{сн}})$, $\xi_{\text{к2}} = \xi_{\text{к2}}(q_{\text{сн}})$ приведены в [10].

На основании физико-механического смысла рассматриваемой контактной задачи и проведенных численных исследований нелинейной зависимости (21) можно констатировать, что в случае $q_{\text{сн}} = P_{\text{н}} = 0$ параметр $\xi_{\text{к2}} = 0$, а при $q_{\text{сн}} > 0$ и $P_{\text{н}} > 0$ коэффициенты $\xi_{\text{к1}}$ и $\xi_{\text{к2}}$ имеют знаки $\xi_{\text{к1}} < 0$, $\xi_{\text{к2}} > 0$. Как следствие этого факта в общем решении уравнения (21) перед квадратным корнем должен быть знак «-», т. е.

$$P_{\text{н}} = -\frac{\xi_{\text{к1}}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\xi_{\text{к1}}}{2}\right)^2 - \xi_{\text{к2}}}. \quad (22)$$

В качестве наглядной иллюстрации и апробации выведенных функциональных формул контактных характеристик $P_{\text{в}}, P_{\text{н}}, c_{\text{в}}, c_{\text{н}}, q_{\text{св}}, u_{\text{мв}}, u_{\text{мн}}$ в зависимости от $q_{\text{сн}}$ приводим конкретный пример расчета и проверку соблюдения неравенств (14), (15) для уплотнительного кольца, имеющего симметричное эллиптическое сечение, из эластомера СКН-18 с удельным весом $\rho_0 = 1300 \text{ кг/м}^3$, твердостью $H_0 = 80 \text{ (HJRD)}$, модулем упругости $E_0 = 10 \text{ Н/мм}^2$ и коэффициентом Пуассона $\mu_0 = 0,475$ [1, 9] при следующих исходных данных [10]: $a_{\text{эв}} = a_{\text{эн}} = a_{\text{э}} = 2,3 \text{ мм}$; $b_{\text{э}} = 3 \text{ мм}$; $\bar{\epsilon}_{\Psi} = 0,03$; $q_{\text{сн}} = 1,5 \text{ МПа} = 1,5 \text{ Н/мм}^2$ [1]; $\Phi_{\text{э}} = 0,65$; $R_{\text{в}} = 27 \text{ мм}$; $R_0 = R_{\text{в}} + a_{\text{э}} = 29,3 \text{ мм}$; $R_{\text{н}} = R_0 + a_{\text{э}} = 31,6 \text{ мм}$; $E_{\text{э}} = 14,2533 \text{ Н/мм}^2 \text{ (HJRD)}$ в зависимости от $\Phi_{\text{э}}$ и E_0 при $\theta^0 = 20^\circ\text{C}$; $\theta = \theta^0 = 20^\circ\text{C}$, т. е. $J_{\theta} = 0$ в соответствии с (2).

После определения коэффициентов $\beta_1 = 1,428$; $\beta_2 = 1,564$; $\beta_3 = 0,421 \text{ Н/мм}$; $\xi_{\text{к1}} = -105,196 \text{ Н/мм}$; $\xi_{\text{к2}} = 265,035 \text{ Н}^2/\text{мм}^2$ [10] и параметров: $P_{\text{н}} = 2,583 \text{ Н/мм}$; $u_{\text{ов}} = 0,809 \text{ мм}$; $u_{\text{ос}} = 0,718 \text{ мм}$; $u_{\text{он}} = 0,638 \text{ мм}$; $w_{\text{ос}} = 0,034 \text{ мм}$, согласно (22) и (16) [10], находим по формулам (9), (12), (6), (19), (14), (15): $P_{\text{в}} = 3,125 \text{ Н/мм}$; $c_{\text{н}} = 0,861 \text{ мм} \ll (a_{\text{э}}^*)^2 \cdot (a_{\text{эн}}^*)^{-1} = 4,149 \text{ мм}$; $c_{\text{в}} = 0,949 \text{ мм} \ll (a_{\text{э}}^*)^2 \cdot (a_{\text{эв}}^*)^{-1} = 2,208 \text{ мм}$; $q_{\text{св}} = 1,654 \text{ Н/мм}^2$; $u_{\text{мн}} = -0,091 \text{ мм}$; $u_{\text{мв}} = 0,111 \text{ мм}$; $|u_{\text{мн}}| = 0,091 \text{ мм} \ll a_{\text{эн}}^* = 2,219 \text{ мм}$; $|u_{\text{мв}}| = 0,111 \text{ мм} \ll a_{\text{эв}}^* = 2,208 \text{ мм}$.

Полученные аналитические зависимости при решении этой оригинальной (неклассической [5]) задачи механики могут быть непосредственно использованы для количественной оценки и регулирования (оптимизации) напряженно-деформированного состояния радиальных эластомерных герметизирующих колец эллипсообразного и круглого сечений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. В. Гордеев и др.; Под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1994. — 448 с.
2. Веригин Ю. А. Механизация технологических процессов строительства / Ю. А. Веригин, В. П. Горобец. — Барнаул: АлтГТУ, 2004. — 298 с.
3. Аврушенко Б. Х. Резиновые уплотнители / Б. Х. Аврушенко. — Л.: Химия, 1978. — 136 с.
4. Абдеев Б. М. Уточненная физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния радиальных эластомерных уплотнительных колец эллиптического сечения для условий предварительного натяга / Б. М. Абдеев, Т. Ф. Брим, Ж. О. Кульсеитов // Вестн. ВКГТУ. № 4. — Усть-Каменогорск, 2006.
5. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.

6. Бояршинов С. В. Основы строительной механики машин / С. В. Бояршинов. — М.: Машиностроение, 1973. — 456 с.
7. Веригин Ю. А. Синергетические основы процессов и технологий / Ю. А. Веригин, С. В. Толстенов. — Барнаул: АлтГТУ, 2007. — 160 с.
8. Абдеев Б. М. Условный модуль упругости и фактор формы резиновых уплотнительных колец несимметричного эллиптического сечения / Б. М. Абдеев, Т. Ф. Брим, А. Ж. Кульсеитов // Вестн. ВКГТУ. № 1. — Усть-Каменогорск, 2007.
9. Абдеев Б. М. Методика и алгоритм расчета механических и теплофизических характеристик резины с учетом температурного градиента / Б. М. Абдеев, А. А. Кравцов // Вестн. ВКГТУ. № 3. — Усть-Каменогорск, 2004.
10. Абдеев Б. М. К вопросу оценки прочности и жесткости радиальных эластомерных уплотнительных колец эллиптического сечения для условий предварительного натяга / Б. М. Абдеев, Т. Ф. Брим, А. Ж. Кульсеитов // Вестн. ВКГТУ. № 4. — Усть-Каменогорск, 2007.
11. Штаерман И. Ф. Контактная задача теории упругости / И. Ф. Штаерман. — М.; Л.: Гостехиздат, 1949. — 270 с.

© Веригин Ю. А., Кульсеитов Ж. О., Абдеев Б. М., Брим Т. Ф., 2008

Получено 13.03.08

УДК 621.878.2

Ф. Ф. КИРИЛЛОВ, канд. техн. наук, проф., **А. Д. КУХАРЕНКО**, инж. (Томский государственный архитектурно-строительный университет)

ВЫБОР ШИРИНЫ РЕЗЦА БЕСКОВШОВОГО ТРАНШЕЕКОПАТЕЛЯ

Выведено соотношение, связывающее оптимальное значение ширины резца бесковшового траншеекопателя с энергетическими параметрами базовой машины, конструктивными особенностями исполнительного органа и прочностными характеристиками грунтовой среды.

Эффективность работы бесковшовых траншеекопателей определяется наиболее оптимальными конструктивными параметрами исполнительного органа и режимами работы траншеекопателя, такими как скорость резания и рабочая скорость передвижения.

Основными конструктивными параметрами исполнительного органа являются ширина резцов — b , шаг резания (расстояние между линиями резания) — t и расстояние между резцами в линии резания — l_p . Значения этих параметров могут быть оптимальными только для определенных грунтовых условий и зависят от мощности N_p , реализуемой на резание (отделение) грунта. Оптимальные значения этих параметров обеспечивают наименьшую энергоемкость процесса разрушения P_3 .

Производительность V , м³/ч, траншеекопателя при заданной мощности резания и удельной энергоемкости процесса разрушения грунта P_3 определяется по формуле

$$V = N_p / P_3, \quad (1)$$

где N_p — мощность, расходуемая на резание, кВт.

Удельная энергоемкость P_3 , кВт·ч/м³, может быть определена по зависимости из работы [1]

$$P_3 = \overline{P_{уд}} / 3,6, \quad (2)$$

где $\overline{P_{уд}}$ — среднее значение удельной силы резания, определяемое как отношение суммарных сил резания на площадь поперечного сечения стружки на всех резцах, МПа.

Следовательно, необходимая мощность резания зависит от сопротивляемости грунтов резанию и заданной производительности

$$N_p = v_n \cdot H \cdot B \cdot \overline{P_{уд}} / 3,6, \quad (3)$$

где H, B — глубина и ширина траншеи, м;
 v_n — скорость подачи (рабочая скорость передвижения траншекопателя), м/ч.

Соотношение скоростей резания v_p , м/с, и подачи v_n определяет толщину срезаемой стружки h , мм:

$$h = \frac{v_n \cdot l_p \cdot \cos \beta}{v_p \cdot 3,6}, \quad (4)$$

где l_p — расстояние между резцами в линии резания, м;
 β — угол наклона цепного исполнительного органа относительно вертикали.

Расстояние между резцами в линии резания можно выразить через шаг цепи $t_{ц}$ и количества линий резания $n_{л}$ с учетом схем расстановки резцов. Для наиболее распространенной схемы — симметричной «елочки» можно записать

$$l_p = \frac{n_{л} + 1}{2} \cdot t_{ц}. \quad (5)$$

Ширина разрабатываемой траншеи через конструктивные параметры определяется следующим выражением:

$$B = t_{opt} \cdot (n_{л} - 1) + b, \quad (6)$$

где t_{opt} — оптимальный шаг резания.

Оптимальный шаг резания зависит от гранулометрического состава грунта и вычисляется по формуле [2]

$$t_{opt} = b + K_t \cdot h, \quad (7)$$

где K_t — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств грунтов и для глинистых грунтов $K_t = 0,7$, а для песчаных грунтов $K_t = 1,3$.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями показано [3], что наименьшая энергоёмкость процесса разрушения реализуется при соотношении $b/h = 0,8 \dots 1,2$. При условии $b = h$ ширина траншеи будет соответствовать значению

$$B = b \cdot (n_{л} + K_t \cdot n_{л} - K_t). \quad (8)$$

С учетом выражений (4)–(8) находим мощность резания

$$N_p = \frac{2 \cdot \overline{P_{уд}} \cdot b^2 \cdot v_p \cdot H \cdot (n_{л} + K_t \cdot n_{л} - K_t)}{t_{ц} \cdot (n_{л} + 1) \cdot \cos \beta}. \quad (9)$$

В процессе работы траншекопателя только определенная часть мощности двигателя $N_{дв}$ расходуется непосредственно на резание

$$N_p = N_{дв} \cdot \eta_{э} \cdot \eta_p \cdot \eta_0 \cdot K_p, \quad (10)$$

где $\eta_{э}$ — коэффициент эксплуатационной нагрузки, равный $0,85 \dots 0,9$ [4];
 η_p — КПД редуктора привода исполнительного органа;
 η_0 — КПД исполнительного органа;
 K_p — доля мощности двигателя, расходуемая на привод исполнительного органа.

Приравнивая правые части уравнений (9) и (10), получаем зависимость для определения ширины единичного резца

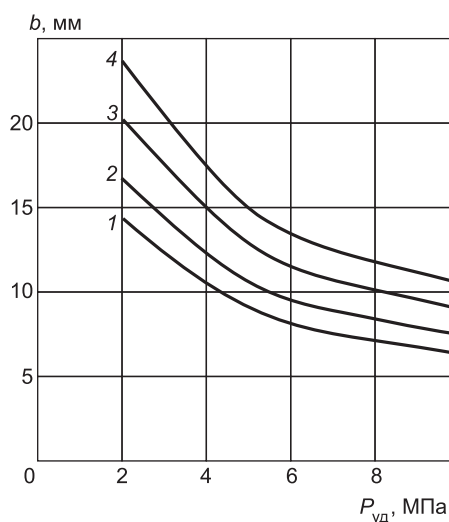
$$b^2 = \frac{N_{дв} \cdot \eta_{\varepsilon} \cdot \eta_p \cdot \eta_0 \cdot K_p \cdot t_{ц} \cdot (n_{л} + 1) \cdot \cos \beta}{2 \cdot \overline{P_{уд}} \cdot v_p \cdot H \cdot (n_{л} + K_t \cdot n_{л} - K_t)} \quad (11)$$

Выводы. В результате анализа многопараметрической зависимости (11) и данных, приведенных на рисунке, видно: 1. С увеличением прочности мерзлого грунта, которая характеризуется удельной силой резания — $\overline{P_{уд}}$, уменьшается скорость подачи — v_p , толщина срезаемой стружки — h и соответственно ширина единичного резца — b .

2. При увеличении мощности двигателя в 2 раза ширина единичного резца должна увеличиться в 1,41 раза при одних и тех же прочих конструктивных параметрах.

3. Увеличение толщины срезаемой стружки за счет увеличения шага цепи или разрежения резцов в схеме набора вызывает увеличение ширины срезаемой стружки.

4. Для практических расчетов рекомендуется ширину резцов согласовывать с мощностью двигателя и принимать для мощности двигателя $N_{дв} = 100$ кВт $b = 10...16$ мм; $N_{дв} = 200$ кВт $b = 12...20$ мм. Применение резцов шириной менее 10 мм нецелесообразно с точки зрения прочности инструмента.



Зависимость ширины резца b от сопротивления грунта резанию $\overline{P_{уд}}$ при мощности двигателя 100 и 200 кВт, скорости резания $v_p = 2$ м/с и $\beta = 30^\circ$

1 — $N_{дв} = 100$ кВт, $t_{ц} = 101,2$ мм; 2 — $N_{дв} = 100$ кВт, $t_{ц} = 152,4$ мм; 3 — $N_{дв} = 200$ кВт, $t_{ц} = 101,2$ мм; 4 — $N_{дв} = 200$ кВт, $t_{ц} = 152,4$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солод В. И. Горные машины и автоматизированные комплексы: Учеб. для вузов / В. И. Солод, В. И. Зайков, К. М. Первов. — М.: Недра, 1981. — 503 с.
2. Кириллов Ф. Ф. Выбор оптимального шага расстановки резцов на бесковшовом траншеекопателе / Ф. Ф. Кириллов, Г. И. Митерев, А. Н. Школьный // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «ИНТЕРСТРОЙМЕХ 2006». — М., 2006. — С. 98–99.
3. Моделирование разрушения углей режущими инструментами. — М.: Наука, 1981. — 181 с.
4. Тракторы: теория. Учеб. / Под общ. ред. В. В. Гуськова. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.

© Кириллов Ф. Ф., Кухаренко А. Д., 2008

Получено 31.03.08

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 504.4.054.51

В. В. КУЗИНА, А. Н. КОШЕВ, д-р хим. наук, проф., И. Ф. СУХОВ, канд. тех. наук, доц. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ РЕГИОНА

Рассмотрены различные способы распространения загрязняющих веществ в водных средах. Приводятся математические модели ситуаций, при которых учитывается одновременное влияние конвективной и диффузионной составляющих массопереноса; массоперенос определяется преимущественно процессами конвекции. В зависимости от характера загрязнения и вида водоема строятся одно-, двух- и трехмерные математические модели.

В настоящее время мониторинг необходим при решении теоретических и прикладных задач науки и технологии и охватывает все стороны жизнедеятельности общества. Актуальность, которую приобретает корректное отражение механизмов распространения загрязнений в водной среде при разработке численных прогнозов, в первую очередь объясняется тем, что рациональное решение различных проблем, возникающих в связи с загрязнением воды промышленными стоками, тесно связано с возможностью расчета концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в поверхностных водных объектах.

В связи с возрастающим значением экологического мониторинга возникает необходимость разработки эффективных вычислительных моделей, описывающих различные способы распространения загрязняющих веществ, и построение для этих целей информационной системы, содержащей наряду с расчетными данными и базу данных водной системы региона. Возникает задача создания математических моделей для физических процессов в водных средах и соответствующих им вычислительных моделей, которые бы обладали требуемой устойчивостью при решении прогностических задач с использованием эмпирических данных и включали бы различные механизмы распространения примесей в водных средах для получения оптимальных оценок прогноза.

Существующие виды мониторинга окружающей среды различают как по характеру загрязнения среды, так и по методам или целям наблюдения. Одно из наиболее распространенных средств, используемых для организации мониторинга различных процессов жизнедеятельности человека — моделирование.

Методы математического моделирования являются эффективным средством при изучении экосистем в динамике, позволяют совершенствовать процессы сбора и хранения исходной информации. В связи с этим задача мониторинга распространения возможных загрязнений представляется достаточно актуальной. Часто под термином «математическое моделирование» понимают не только построение и исследование математических моделей, но и создание вычислительных алгоритмов и программ, реализующих эти алгоритмы на компьютере. Будем понимать под мони-

торингом многоцелевую информационную систему (ИС), основные задачи которой — наблюдение, оценка и прогноз состояния природной среды.

Использование ИС для организации мониторинга экологических процессов дает возможность получения промежуточных результатов на любом этапе, представляющем интерес для исследователя. Предметом исследования была выбрана водная система Пензенской области.

Ранее авторами рассматривались математические модели и методы, описывающие процессы диффузии в водной среде. В данной статье показаны процессы одновременного конвективного и диффузионного переноса ЗВ и преимущественно конвективного переноса вещества, что актуально при мониторинге рек, проточных вод и т.п. Для моделирования потребуется реализация численных методов решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы конвекции и диффузии.

Предположим, что расчетная область представляет собой широкий двумерный канал, на некотором отрезке границы которого существует источник пассивной примеси (например, канал для сброса промышленных стоков).

В этом случае распределение концентрации примеси C подчиняется следующему уравнению переноса [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u C) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v C) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где x и y — продольная и поперечная координаты относительно водного потока;

ρ — плотность примеси;

u и v — осредненные скорости потока в направлениях x и y ;

D — коэффициент диффузии.

Крайевые условия задаются следующим образом (схематическое изображение расчетной области $ABCD$ представлено на рис. 1, а):

1) считаем, что линии AB и CD находятся на достаточном удалении от источника, помещенного на отрезке FE , и следовательно, можно считать $C|_{AB} = C|_{CD} = 0$;

2) на отрезках BC , AF , ED $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$, где n — направление внутренней нормали;

3) на отрезке FE необходимо рассмотреть два случая:

а) примесь медленно вытекает через границу FE . Тогда, если $|AB| \gg |FE|$, то можно считать $C|_{FE} = \text{const} = C_0$;

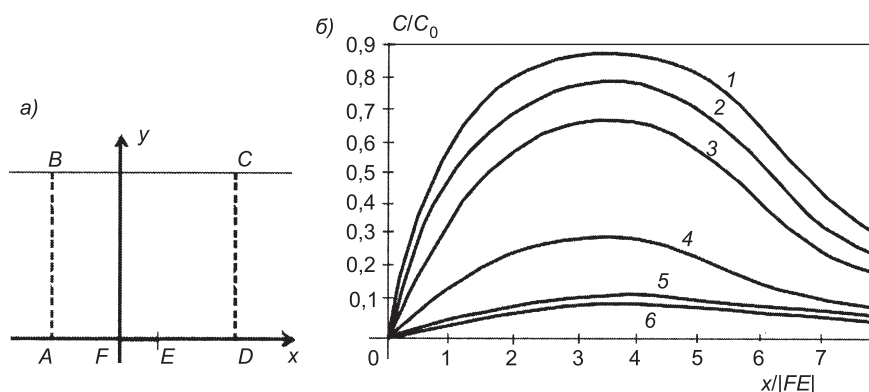


Рис. 1. Расчет концентрации

а — расчетная область; б — изменение относительной концентрации; 1 — на расстоянии $1/8 |FE|$ от оси x ; 2 — $0,25 |FE|$; 3 — $3/8 |FE|$; 4 — $0,5 |FE|$; 5 — $5/8 |FE|$; 6 — $0,75 |FE|$

б) примесь под давлением вытесняется в канал $ABCD$ через отрезок FE и расстояние AB сравнимо с FE . Тогда можно считать $\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{FE} = \text{const} = C_n$ (скорость вытекания примеси через отрезок FE постоянна).

Уравнение (1) решалось конечно-разностным методом с регулярной квадратной сеткой. На рис. 1, б схематически представлены результаты расчета полей C в области $ABCD$ при $u = 5$ см/с, $v = 0,1$ см/с.

Для аппроксимации производных использовалась регулярная квадратная сетка с шагом h .

В этом случае можно выразить первые и вторые производные неизвестной функции C в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial x} \approx \frac{C(E) - C(W)}{2h}; \quad \frac{\partial C}{\partial y} \approx \frac{C(S) - C(N)}{2h};$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx 2 \left[\frac{C(E) - C(P)}{2h^2} - \frac{C(W)}{h^2} + \frac{C(N)}{2h^2} \right]; \quad \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx 2 \left[\frac{C(S)}{2h^2} - \frac{C(P)}{h^2} + \frac{C(N)}{2h^2} \right]. \quad (2)$$

Система линейных алгебраических уравнений, соответствующих уравнению (1), имеет вид

$$\bar{A} \cdot \bar{C} = \bar{f}, \quad (3)$$

где \bar{A} — матрица коэффициентов при неизвестных \bar{C} ;
 \bar{f} — вектор-столбец свободных членов.

Эта система решалась методом Зейделя, который обеспечил хорошую сходимость для решаемого класса задач:

$$\bar{C}^{n+1} = \bar{D}^{-1}(-\bar{M} \cdot \bar{C}^{n+1} - \bar{N} \cdot \bar{C}^n + \bar{f}),$$

где \bar{C}^n — вектор неизвестных, найденный на n -й итерации;

\bar{D} — диагональная матрица;

\bar{M}, \bar{N} — соответственно нижняя и верхняя треугольные матрицы, такие что $\bar{A} = \bar{D} + \bar{M} + \bar{N}$.

Рассмотрим случай, когда излив ЗВ будет происходить в течение некоторого времени, в результате чего может образоваться равномерно движущийся поток (конвективный механизм). Допустим, что естественное русло имеет трапециевидальную форму сечения, которое сохраняет неизменными пропорции (рис. 2).

При таких допущениях площадь живого сечения потока A можно определить по выражению $A = G / L$, где G — объем ЗВ, L — расстояние от места сброса ЗВ до истока водоема.

Используя усредненную площадь живого сечения, определим величину гидравлического радиуса: $R = A / P$, где P — смоченный периметр по-

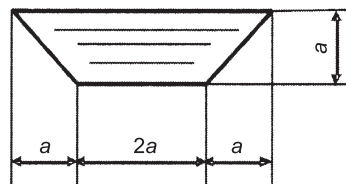


Рис. 2. Модель поперечного сечения русла

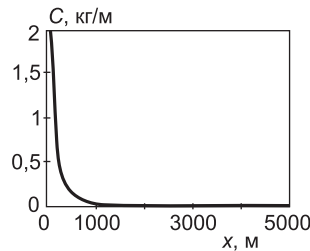


Рис. 3. Изменение концентрации ЗВ в водотоке при объеме ЗВ в 1 кг

тока. Для рассматриваемого русла площадь поперечного сечения будет равна $A = 3a^2$, а смоченный периметр $P = 4,828a$. При этом будем считать, что гидравлический уклон равен уклону дна.

Для определения скоростной характеристики потока W воспользуемся приближенной формулой $W = \frac{1}{n} R^{0,7}$, где n — коэффициент шероховатости (например, для неукрепленных русел с исключительно плохими условиями содержания $n = 0,04$).

Рассчитаем скорость движения потока по формуле $V = W \cdot \sqrt{I}$, где I — гидравлический уклон, который в первом приближении можно принять равным уклону дна русла.

Зная скорость движения потока и расстояние до истока водоема, можно оценить время начала загрязнения водоема: $t = L / V$.

При расчете количества ЗВ следует учитывать влажность почвы. В сухой период некоторая часть ЗВ при движении будет задерживаться на смоченной поверхности, образуя пленку толщиной δ , тогда объем осевшего на почву ЗВ будет равен $G_0 = A_c \cdot \delta$. Здесь $A_c = P \cdot L$ — площадь смоченной поверхности. В первом приближении толщину пленки можно принять равной 0,5 мм.

При движении жидкого ЗВ по природному руслу часть его будет просачиваться в грунт с последующим попаданием в грунтовые воды. Расход фильтрованного потока Q_ϕ определим по выражению $Q_\phi = k A_c I$, где k — коэффициент фильтрации (для супеси $k = 10^{-5} - 10^{-3}$ см/с). Примем в первом приближении $k = 10^{-4}$ см/с, $I = 1$.

После определения расхода фильтрационного потока можно оценить объем G_ϕ ЗВ, просочившегося в грунт, считая, что время фильтрации равно времени движения потока по руслу: $G_\phi = Q_\phi \cdot t$. Таким образом, объем загрязнения G_3 будет равен: $G_3 = G - G_0 - G_\phi$.

При наличии дождя можно считать, что ЗВ не будет оседать на поверхности, и предположить, что фильтрация будет вдвое меньше (двухкомпонентная жидкость). Для оценки времени начала загрязнения водоема можно использовать среднюю скорость данного водотока. Для более точного прогноза необходимо учитывать площадь водосбора и интенсивность осадков.

С учетом принятых допущений можно расчетным путем определить примерное время начала загрязнения истока водоема и ориентировочное количество ЗВ, попадающего в водоем. Например, если сброс ЗВ произойдет на расстоянии $L = 600$ м до истока реки при среднем уклоне дна сухого русла $I = 0,016$, то следует ожидать прямого попадания ЗВ в водоем только при больших количествах ЗВ (см. таблицу). В рассматриваемом примере для ЗВ с массой $G = 248,5$ кг время достижения истока реки будет составлять ориентировочно $t = 1,65$ ч, при этом количество загрязнения может составить $G_3 = 29,3$ кг.

В случае попадания ЗВ в проточный водоем можно оценить изменение концентрации в потоке. Предварительные расчеты показывают, что в этом случае можно пренебречь молекулярной диффузией. Следовательно, загрязнение будет распространяться со скоростью водотока. Если предположить, что изменение расхода водотока происходит пропорционально длине, то можно прогнозировать изменение концентрации ЗВ в водотоке. Пример расчета приведен на графике рис. 3.

Пример расчета времени и объема загрязнения

Масса ЗВ, кг	Время, ч	Количество, кг
5,76	—	—
44,1	—	—
248,5	1,65	29,3
500	1,29	251
1000	1,01	717
5000	35 мин	4060

Рассмотренные модели позволяют прогнозировать распространение ЗВ по сухим водотокам и в проточных водоемах в случаях возникновения аварийных ситуаций. Такие расчеты необходимы при планировании организационно-технических мероприятий в зонах, примыкающих к источникам загрязнения.

Информационная система (ИС), разработанная в среде программирования Visual Basic для реализации описанных алгоритмов, позволяет вести расчет и прогнозирование распространения ЗВ по одной или нескольким моделям на выбор пользователя с последующим сравнением полученных результатов с предельно допустимыми концентрациями веществ в водной среде. ИС содержит БД, хранящую информацию о водных объектах области, о химических элементах и ЗВ, о предельно допустимых концентрациях, разработанную в среде Microsoft Access. Для математических вычислений использовался универсальный мощный пакет MathCAD. Общая схема алгоритма работы программы представлена на рис. 4.

С помощью таблиц «Реки», «Озера», «Водохранилища» организуется представление речной сети в виде ориентированного графа и задаются веса соответствующих вершин и ребер.

Водные объекты уместно привязать к регионам, чтобы отметить принадлежность ребер к конкретной реке, либо бассейну, либо к определенному району области. Для этих целей добавлены в структуру БД еще три таблицы. Это разделение полезно также для сортировки объектов по регионам, что упростит дальнейший анализ и расчет.

Следует отметить, что разработанная структура БД, предназначенная для описания ориентированного графа, является не единственно возможной, однако на данный момент она кажется наиболее оптимальной.

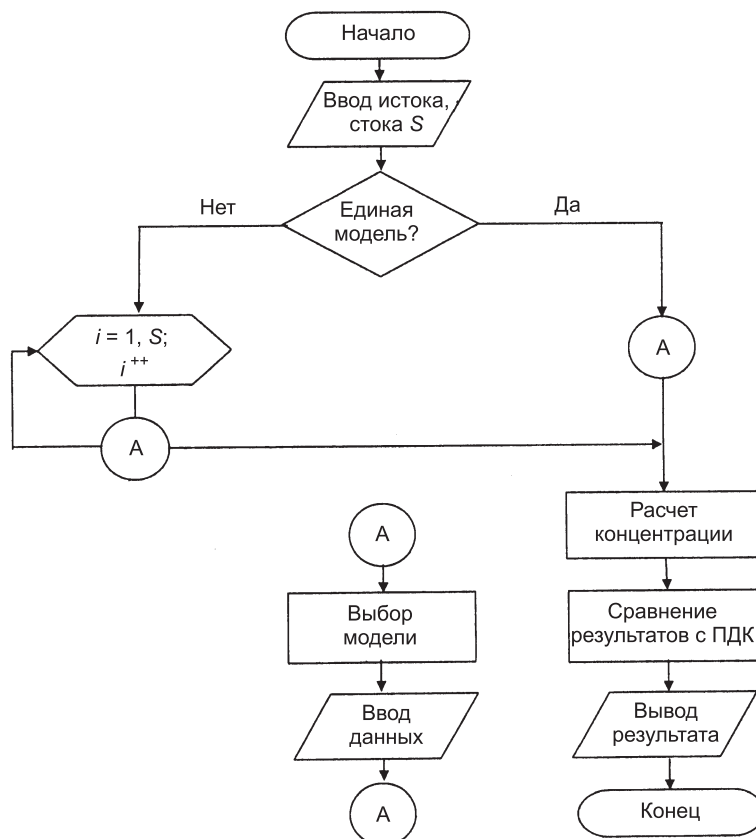


Рис. 4. Общая схема алгоритма работы программы

На стадии эксплуатации информационной системы структура БД может изменяться. Выбранная среда разработки Microsoft Access допускает оптимизацию БД на любом этапе.

Информационная система позволяет вести расчет и прогнозирование распространения ЗВ по одной или нескольким моделям на выбор пользователя с последующим сравнением полученных результатов с предельно допустимыми концентрациями веществ в водной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М.: Наука, 1966. — 724 с.

© Кузина В. В., Кошев А. Н., Сухов И. Ф., 2008

Получено 03.04.08

УДК 711.4–168:504.75

С. Г. ШЕЙНА, канд. техн. наук, доц., **Л. В. ГИРЯ**, асп. (Ростовский государственный строительный университет)

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ РИСКОМ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Приводятся организационно-технологические основы управления экологическим риском реконструкции городской застройки. Для обеспечения реконструкции городской застройки предложена классификация основных показателей экологического риска, рассмотрена технология его картирования на примере г. Ростова-на-Дону.

Эффективность организационно-технологических решений при реконструкции городской застройки в современных условиях зависит от наличия информационной базы степени экологической опасности уже на начальной стадии проекта. Анализ информации о степени экологических рисков на территории городской застройки влияет на проектное решение как при выборе мероприятий по охране окружающей среды, так и по защите населения от негативного воздействия неблагоприятных факторов городской среды.

Под экологическим риском (ЭР) понимается мера опасности, характеризующая вероятность возникновения возможных негативных последствий для человека и окружающей среды [1]. Важным свойством риска является то, что *риском можно управлять*, т. е. использовать различные меры, позволяющие в определенной степени прогнозировать наступление рискованного события и принимать меры к снижению тяжести его последствий [2].

Управление экологическим риском при реконструкции городской застройки состоит из нескольких этапов:

- оценка риска;
- управление риском;
- мониторинг как контроль состояния окружающей среды.

Оценка риска выполняется на основе идентификации источников загрязнения и комплексной оценки территории для различных компонентов ОС (атмосферы, почвы, водных объектов и др.).

Комплексная оценка территории по факторам экологического риска включает анализ интегральных показателей загрязнения атмосферы, почвы, шумового, водных объектов. Разработанная классификация экологи-

Классификация показателей экологического риска по степени загрязнения окружающей среды

Инженерно-экологические зоны	Зоны экологического риска						
	неопасная		малоопасная		опасная		чрезвычайно опасная
	Баллы						
	1–5		6–10	11–15	16–20		21–25
Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА)	<2	2–5	10–15		16–32		>32
Загрязнение питьевой воды (по отклонению количества показателей от норм, %)	<20		20–40	40–60	60–80		80–100
Шумовая нагрузка днем, дБ	<55	60–64	65–74		75–81		>81
Загрязнение водных объектов (ИЗВ) (острая токсичность, %)	<0,2	>(0,2...1)	>(1...2)	>(2...4)	>(4...6)	>(6...10)	> 10
Суммарный показатель загрязнения $Z_c = \text{сумма } C/C_{\phi} - (n-1)$	< 16		16–32		32–80		> 128
Загрязнение твердыми отходами (коп. свалки, балл)	0–4		4–8	8–12	12–16		16–20
Радиационное загрязнение (эффективная эквивалентная доза излучения, м ³ /год)	0–1		1–5	5–20	20–50		> 50

ческого риска (1 — неопасная, 2 — малоопасная, 3 — опасная, 4 — чрезвычайно опасная) базируется на расчете интегрального показателя загрязнения основных компонентов окружающей среды (см. таблицу).

Технология картирования опасных экологических процессов (рис. 1) состоит в последовательном наложении электронных карт по загрязнению атмосферы, почвы, шумового воздействия от автотранспорта, индексу загрязнения воды на основе использования ГИС-технологий.

Предложенная методика оценки экологического риска и технология его картирования позволили выполнить зонирование территории г. Ростова-на-Дону (рис. 2) по степени экологического риска. Исходными данными являлись:

— генеральный план г. Ростова-на-Дону, разработанный НИИ Урбанистики г. Санкт-Петербурга на 2008–2025 г.;

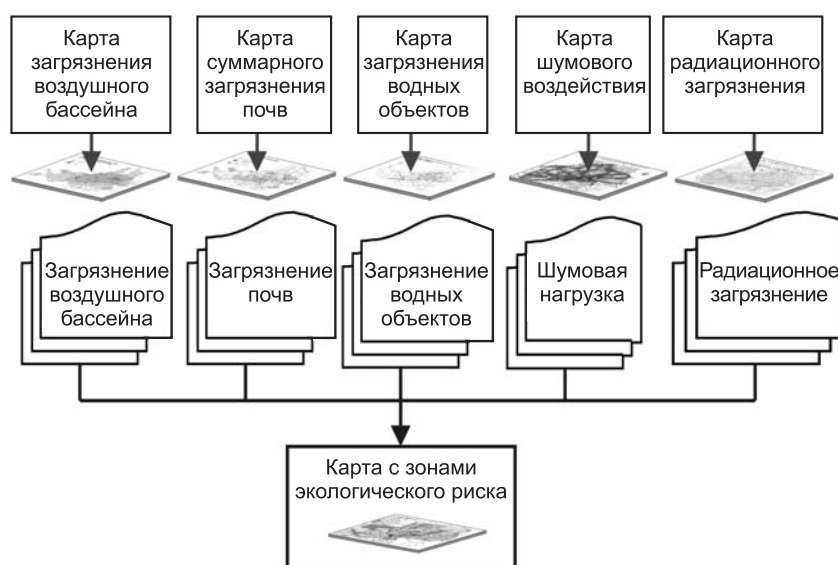


Рис. 1. Алгоритм технологии картирования опасных экологических процессов



Рис. 2. Электронная карта с зонами экологического риска г. Ростова-на-Дону

— данные шумового загрязнения территории г. Ростова-на-Дону, полученные на кафедре ГСХ РГСУ;

— данные комплексного эколого-геохимического наблюдения за состоянием природной среды, приведенные специалистами ТЦ «Ростовгеомониторинг» под руководством д-ра биол. наук В. В. Приваленко.

Анализ исследований [1, 2] позволил выделить 3 группы методов управления экологическим риском.

1. *Передача ЭР* — это передача ответственности третьим лицам при сохранении существующего уровня ЭР. К этой группе относится экологическое страхование, т. е. передача риска под ответственность страховой компании или любому третьему лицу за определенную плату, на договорных условиях.

2. *Сохранение ЭР* подразумевает сохранение риска на том же уровне за инициатором намечаемой хозяйственной деятельности, что не всегда означает отказ от любых действий, направленных на уменьшение риска. При сохранении риска инициатор хозяйственной деятельности принимает его на себя, т. е. оставляет под свою ответственность.

3. *Снижение ЭР* — уменьшение возможного негативного воздействия на ОС и здоровье населения. Мероприятия по снижению экологического риска по охране среды делятся на две группы — зонально-территориальные и локальные методы.

Выбор метода управления экологическими рисками при реконструкции и соответствующего варианта мероприятий полностью определяется уровнем риска. Исходя из принятой классификации ЭР, предложены соответствующие методы управления ЭР и сформированы варианты управленческих решений на основе реализации наборов мероприятий.

В неопасной зоне экологического риска (зона приемлемого риска) необходим набор превентивных мероприятий. Подбор дополнительных мероприятий по управлению экологическим риском при реконструкции не требуется, так как при допустимом уровне экологического риска негативное воздействие на ОС и здоровье населения не превышает установленных нормативов ПДК.

Для малоопасной и опасной зон экологического риска (зона приемлемого и неприемлемого риска) наиболее подходящий метод управления ЭР — снижение при проведении реконструкции с обязательной разработкой комплекса мероприятий для снижения риска до допустимого уровня.

Для чрезвычайно опасной зоны экологического риска (зона запрещенного риска) эффективный метод управления — передача через механизм экологического страхования и снижение ЭР, с обязательной разработкой комплекса мероприятий.

В рассмотренном выше перечне методов управления ЭР основным является метод его снижения. Он непосредственно должен быть реализован инвестором-застройщиком и требует оптимизации как со стороны экологической обоснованности временных затрат, так и со стороны экономической целесообразности принятых решений.

Все мероприятия по снижению риска при реконструкции можно разделить на две группы:

- ликвидация последствий воздействия факторов экологического риска, включающая разработку мероприятий по охране атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв, охране городской среды от шума и электромагнитных полей в проекте;

- устранение причин возникновения факторов ЭР. В случае невозможности устранения — разработка мероприятий к источнику воздействия по уменьшению его влияния на окружающую среду.

Для информационного обеспечения процесса разработан программный модуль по управлению экологическим риском, который позволяет при выборе адреса объекта реконструкции или нового строительства определить комплекс мероприятий по снижению экологического риска для данного здания или территории.

Интерактивная связь картографической и фактографической баз данных позволяет инвестору получить необходимую информацию как на предынвестиционной стадии, так и в процессе эксплуатации объекта недвижимости.

ИАС «Управление экологическим риском» запускается из проекта «Экология» в программе ESRI ArcView 3.2.

В результате работы с ИАС при выборе на электронной карте территории или объекта можно получить семантическую информацию о степени экологического риска и предлагаемом комплексе мероприятий по его снижению либо передать ее в соответствии с разработанной методикой. Полученная информация является базовой для принятия эффективных организационно-технических решений при проведении реконструкции и нового строительства.

На ИАС «Управление экологическим риском» получено свидетельство [3].

Выводы. 1. Учет степени экологического риска на предынвестиционной стадии позволяет выбрать мероприятия по защите окружающей среды при разработке проекта реконструкции и нового строительства.

2. Разработанная классификация экологического риска и технология его картирования позволяют проводить мониторинг и выполнять прогноз развития неблагоприятных экологических процессов на территории муниципальных образований, выбрать эффективные организационные решения при реконструкции городской застройки.

3. Информационно-аналитическое обеспечение процесса управления экологическим риском представлено информационно-аналитической системой «Управление экологическим риском», базирующейся на использовании современных геоинформационных технологий и систем управления баз данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняковский Э. Р. Управление экологической безопасностью: Учебно-практическое пособие. — М.: Альфа-Пресс, 2007. — 248 с.
2. Страхова Н. А. Основы экологического управления и менеджмента / Н. А. Страхова, Г. Н. Соколова, И. В. Вейсенберг и др. — Ростов н/Д: Изд-во РГСУ, 2003. — 259 с.
3. Свид. № 20046612087 об официальной регистрации программы для ЭВМ «Управление экологическим риском» / Р. Б. Матвейко, С. Г. Шеина, Л. В. Гирия и др.: Оpubл. 22.11.07.

© Шеина С. Г., Гирия Л. В., 2008

Получено 17.04.08

УДК 711.4.-168(571.1/.5)

А. Н. КЛЕВАКИН, канд. архит. (Новосибирская архитектурно-художественная академия)

ОБНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СРЕДЫ СИБИРСКИХ ГОРОДОВ

Показано, что процесс обновления материально-пространственной среды сибирских городов в индустриальную эпоху принимает крайнюю форму реконструкции — замещение старого новоделом. Причины выявленного явления кроются в несогласованности двух традиций проектного дела — преимущественная ориентация градостроительного проектирования на освоение новых территорий и охранное проектирование, призванное сберегать образцы материально-пространственной среды как закрытые музейные экспонаты.

Примечательно, что обновление материально-пространственной среды сибирских городов в индустриальную эпоху разворачивается по сценарию, предполагающему крайнюю форму реконструкции, — замещение старого новоделом. В 1960-е гг. в Новосибирске исчезает характерная для сибирских городов деревянная застройка вдоль улицы Ленина, участки каменной застройки конца XIX в. вдоль Красного проспекта и т.д.

К началу XXI столетия состояние культурного наследия сибирских городов приблизилось к критической отметке. В одном из самых старых городов — Томске, некогда центре освоения региона, количественный состав деревянных строений стал резко сокращаться. За период 1984–2003 гг. их число сократилось в 1,5 раза. Процесс «исчезновения», по замечанию свидетелей, приобрел лавинообразный характер. При этом никакие усилия общественных организаций, местной власти, помощь международных организаций, столичной общественности, действующее законодательство не смогли предотвратить разрушение и утраты.

В средствах массовой информации появились сообщения, из которых становится понятно, что деревянный Томск под угрозой полного уничтожения. Данный факт явился свидетельством беспомощности культурного, промышленного, вузовского центра перед проблемой включения культурного наследия в современную жизнь сибирского города.

Причины постепенного вывода культурного наследия из активной жизни старгородских центров на рубеже XXI в. кроются в особенностях организации проектного дела, основы которого определяются идеологией индустриального города в советский период времени. Первоначально, в период своего становления, советская система проектного дела отрицала старый город как категорию, имеющую право на существование. Преимущественная ориентация системы градостроительного проектирования на решение производственных задач по сравнению с задачами обеспечения

жизнедеятельности поселения в явной форме начала проявляться в 30-е гг. XX столетия в эпоху индустриализации.

В рамках такой традиции проектирования разработка генеральных планов городов, имеющих в своей структуре районы и части старой застройки, принципиально ничем не отличалась от разработки генеральных планов новых городов. Градообразующая основа объекта проектирования продолжала задавать подход к организации системы общественного обслуживания, решению структуры, расчету основных показателей. Специфика объекта проектирования определялась набором предприятий. Одной из основных составляющих пространственного развития оставалась территориальная экспансия и снос застройки, неудобной с точки зрения использования индустриальных методов строительства.

Так, генеральный план Ачинска, разработанный в 1997 г., не вытекал из логики функционирования его структуры. Несмотря на то, что на момент разработки генерального плана страна испытывает экономический кризис, предлагаемые проектные решения выполняются так, как будто бы Ачинск испытывает невиданный экономический подъем, а промышленные предприятия не прекратили функционирование, а продолжают работать. Проект, прошедший согласование во всех инстанциях, включая столичный, местный уровни, указывает на необходимость максимального увеличения территории города и сохранение его прежней специализации [1].

Такой подход к определению «перспективы» пространственного развития города определялся ценностями прогресса, технологии, массового производства, покорения природы и территориальной экспансией индустриального города на деревенское окружение. Предполагалось, что в результате этой экспансии осуществится срастание промышленных центров с селами.

Вторая традиция советского проектного дела — охранительное проектирование. Эта традиция первоначально возникает независимо от сферы градостроительства, имеет институциональное закрепление в министерстве культуры и фокусируется на работе с отдельными объектами, имеющими историческое, культурное значение.

Проект охранных зон как отражение охранительного проектирования выполнялся независимо от проекта генерального плана, поскольку полностью не вписывался в идеологию социалистического города, проектный подход и индустриальные методы строительства. Охранительство в своей основе предполагало сохранение и сбережение образцов и элементов, представляющих культуру прошлого. В силу условий, в которых находилась наша страна, сохранение было возможным лишь в пассивной форме, когда образцы культуры, архитектуры сберегаются как экспонаты прошлых эпох, а не как средовые объекты.

Позже охранный проект расширил рамки своего влияния и контроля до рамок градостроительного искусства и целых частей городской структуры. В системе централизованного проектного дела было найдено место для института, призванного отвечать за комплексный подход к охранным делам в городах. Сегодня это самостоятельная и самодостаточная область, воспроизводящая нормы работы с «историческим наследием» как таковым.

В соответствии с проектом охранных зон историческая часть города изымалась из повседневной жизнедеятельности и превращалась в музей [2]. Так, в результате привлечения специалистов, отвечающих за сохранение прошлого, Ачинск из города со старым центром и новыми индустриальными районами на периферии превращается в город с «зоной охраны центрального района» и «зоной будущего центра». Активная жизнь покидает старгородскую часть, но не найдя готовую для принятия новых

общегородских функций пространственную структуру, расплывается по территории микрорайонов (рис. 1).

Ни первая, ни вторая традиция проектного дела не опирались на практику участия широких слоев населения в процессе обновления городов. За весь период господства централизованной системы управления городами местные сообщества не смогли выработать порядок и правила, в соответствии с которыми было бы возможно самостоятельно делать выбор пути развития пространственной среды.

Присвоение Томску статуса исторического города в 1990 г. не только не приостановило, но даже ускорило ту торопливость, с которой уже осуществлялось уничтожение его историко-архитектурного наследия. В период перехода к рыночным реформам процесс уничтожения деревянной архитектуры Томска превзошел все мыслимые масштабы. По статистике специалистов ТГАСУ к 1984 г. в Томске насчитывалось 2773 деревянных строения, а к сентябрю 2003 г. их осталось всего 1740. Несмотря на усилия проектировщиков по созданию так называемых карт охранных зон исторического центра Томска, усилия общественного совета при областном управлении культуры (в состав совета входили краеведы, архитекторы, искусствоведы) деструктивная сила оказалась сильнее и возобладала над силами охранителей старины.

В силу разделения проектного дела на две самостоятельные части интересы города, интересы сообщества не включались и не рассматривались. Всякий проект предлагал вариант изменений, которые всегда

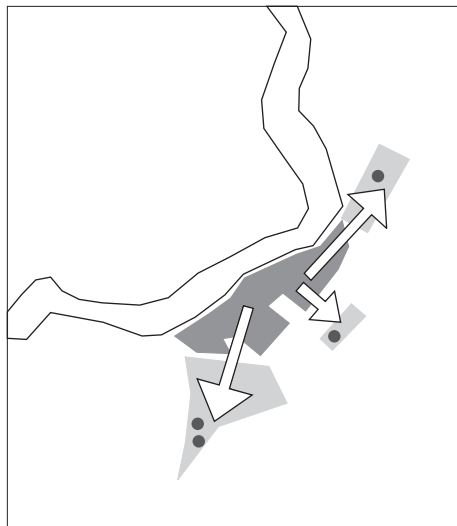
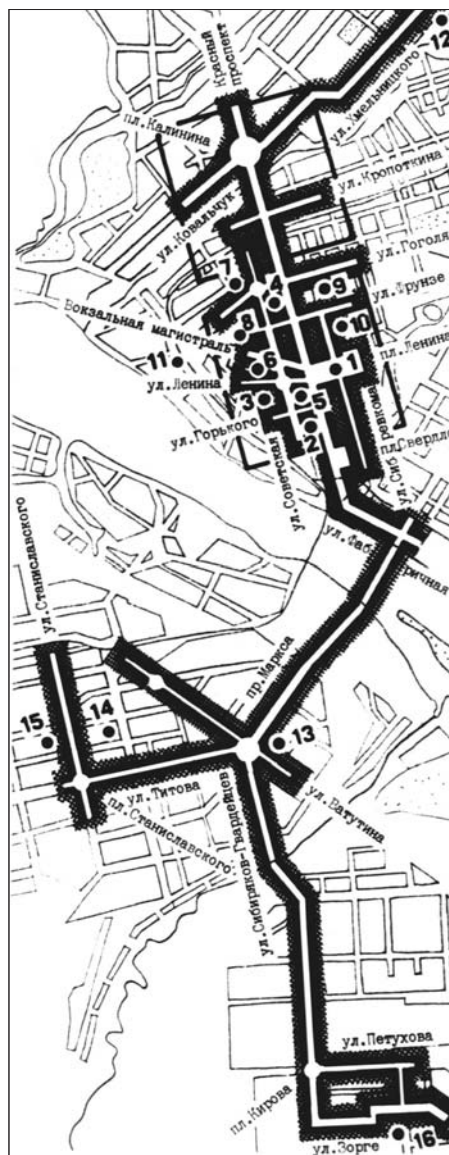


Рис. 1. Ачинск. Несогласованность стратегий индустриального развития и сохранения культурного наследия обуславливает усиление центробежной тенденции и лишает старгородскую часть активной жизнедеятельности

Рис. 2. Пространственное восприятие центральных элементов жителями г. Новосибирска. Обследование 1985 г.



оставались односторонними, поскольку не задействовали потенциал низовой инициативы. Энергия городского творчества не имела реализации по причине противопоставленности двух традиций проектного дела друг другу.

Ресурсы и потенциал исторического города с его индустриальной составляющей не получают комплексной оценки. В пояснительной записке к проекту генерального плана отсутствует достоверная информация, из которой можно было бы судить об особенностях Ачинска, определяемых прошлым города. Об историческом центре Ачинска в проекте генерального плана упоминается между делом и ни слова не говорится о сложившихся старых кварталах, состоянии природных элементов, входящих в структуру города, характеристике значимых объектов, памятных местах, уникальности среды. Вот почему ни один специалист, ни один руководитель не могут воспользоваться проектом генерального плана, поскольку в нем нет главного — знания о задачах, которые может решить город и его жители на момент кризисной ситуации, в которой находится город на рубеже 2000 г.

Длительное время государственная машина градостроительного проектирования стремилась монополизировать право на представления о путях пространственного развития общегородских центров. Ситуация противостояния внутри архитектурно-градостроительного цеха не позволила придать результатам научных исследований 70–80-х гг. статус общественно значимых. Взамен отодвинутого на второй план фундаментального знания вот уже три десятка лет общество вынуждено было испытывать переход от одной импровизации к другой. Вне поля видимости оказались процессы обновления наиболее значимых частей городов — центральных районов. Упорно игнорируя «прописанность» процессов городской деятельности в реальном пространстве ядер и старогородских районов городов, основное внимание сосредоточивается исключительно на новых территориях. В условиях большого пространства Сибири и расчлененности структуры городов продолжающееся рассредоточение функций не обеспечивает целостность территории.

Механизм пространственного развития общегородского центра, определяющий единство и целостность каркаса города, был описан еще во второй половине 70-х гг. прошлого века. В соответствии с этим механизмом зрелость пространственной среды центра или степень развитости общегородских функций определяется структурными изменениями в городе, заключающимися в выделении собственно центральных (уникальных) функций, концентрирующихся в зоне ядра и огибающих его кольцом периферийной зоны, которая становится местом размещения более массовых функций [3].

Исследование функционально-пространственных свойств среды центра Новосибирска в 80-е гг. прошлого века позволило зафиксировать, что традиционные представления о строении общегородского центра в условиях города с расчлененной структурой претерпевают преломление. Реальные процессы средообразования и выделение центральных элементов среды обуславливаются сохранением на протяжении длительного времени автономных частей. Индустриальный период истории порождает кристаллизацию старогородских ядер — наряду с центральной частью на удаленной периферии возникают районы, выполняющие заметную роль в жизнедеятельности города.

По сравнению с другими районами удаленной периферии — участками индивидуальной и микрорайонной застройки, старогородские ядра имеют ряд преимуществ. Эти преимущества определяются сложившейся системой обслуживания, мелкоструктурностью пространственного строения и наличием зеленых насаждений. Три выделенных качества в условиях си-

бирских городов приобрели ключевое значение. Короткая и бурная история не создала иной альтернативы среде районов соцгорода. Отдельные старые районы по своей роли в жизнедеятельности периферии начинают соперничать с ядром центральной части города. Автономное существование отдельных частей периферии и ослабленная роль центральной части вынуждает население обходиться услугами «местного уровня» [4].

Картина распределения центральных элементов в старогородских частях радикально не изменилась за восемнадцать лет, прошедших между двумя обследованиями, проведенными в г. Новосибирске. Количественные приращения новых функций осуществляются в направлении уплотнения главных единиц пространственного каркаса (ул. Б. Хмельницкого, улица и пл. Станиславского). Заложенная в 50-е гг. квартальная структура испытала замену жилых функций периметра на обслуживающий профиль (рис. 2). Подцентры обслуживания, возникшие в эпоху индустриального развития, не теряют своей значимости в восприятии населения, но и не получают необходимой поддержки для обновления на рубеже веков. Рост удаленной периферии и возрастание внешних нагрузок требуют необходимых реконструктивных мероприятий. Разовые мероприятия, точечное новое строительство, перепрофилирование производственных зон под торгово-коммерческое назначение не могут заменить комплексную реконструкцию жилых кварталов, наметить переход к политике конверсии промышленности города.

Повышение роли центральных пространств в районах массовой застройки 60–70-х гг. периферийных частей г. Новосибирска связано с освоением участков незастроенных территорий, повышением роли транспортно-пересадочных узлов в Левобережной части. Процесс концентрации функций в первую очередь происходит вдоль главных улиц, а позже по периметру микрорайонной застройки (пр. Маркса, улицы Ватутина, Станиславского, Титова). Наблюдается полная замена жилых функций на торговые, обслуживающие, деловые. В уровне первого этажа располагаются магазины, салоны, другие учреждения обслуживания. Подвальные помещения жилой застройки, ранее используемые для хозяйственных нужд населения, начинают задействоваться в коммерческих целях. Позже активизируются малые улицы, примыкающие к главным магистралям района.

Освоение площадок с объектами долгостроя, оставшимися в наследство от советской эпохи, имеет затяжной характер (пл. Маркса). Размещение крупных объектов, открытие станции метро и наличие транспортных коммуникаций не обеспечивает запуск процессов интенсивного насыщения среды. Первоначально территория делится на мелкие участки и сдается в аренду частным предпринимателям. Прохождение через микрорыночную кампанию, возведение больших строений в сумме не обеспечивается качеством архитектуры и не складывается в комплексное решение. Участок не имеет инфраструктуры, обеспечивающей взаимосвязь внешних и внутренних потоков. Локальность вводимых в эксплуатацию объектов не соответствует сложности нагрузок, испытываемых с удаленной периферии.

Большинство районов массовой застройки продолжают получать спонтанно вводимые объекты, в целом не приобретая специализации. Скороспелые решения по присвоению официального названия отдельным участкам намного опережают процессы пространственного формирования и обустройства. Участки получают имена площадей и улиц, не имея застроенного периметра и значимых объектов.

Схема отображения негативных элементов среды части города, складывание которой осуществлялось в индустриальную эпоху, свидетельствует, что со сменой эпох негативные качества среды не исчезают автоматически сами собой, а требуют направленных мероприятий как градостроительного, так и социального характера.

Сохранение неблагоустроенных бараков по ул. Степной, в районе рынка (ул.Чехова) напоминает жителям о нерешенности проблем района. Эти участки, а также отдельные другие фрагменты улиц, по мнению жителей, должны быть благоустроенными в первую очередь. В качестве напоминания о проблемах, оставшихся со времени 60-х гг. прошлого века, остается недостроенная гостиница на пл. Маркса. Длительное время постоянное беспокойство для жителей вызывали «подъезды к местам торговли и планировка проезжей части у вещевого рынка».

По сравнению с районами периферийной зоны в центральной части в качестве главных выделяется более широкий набор пространственных единиц. Наряду с участками улиц и отдельными местами в ходе второго обследования были выделены — театры, парки, «отдельные жилые дома», учебные заведения, «дорогие магазины» и т.д. (рис. 3).

Рис. 3. Пространственное восприятие центральных элементов жителями г. Новосибирска. Обследование 2003 г.

1 — районы массовой застройки 60–70-х гг.; 2 — старгородские районы

В одном ряду с перечисленными элементами важное значение имеют микроэлементы — «сквер» и «пятачок». Как и в первом опросе, в настоящий период для определенной части опрошенных центральность связывается с «частью города».

Дислокация центральных элементов типа «точка» указывает на то, что в настоящий момент происходит процесс насыщения центра отдельными объектами. Наращивание функционального и пространственного потенциала осуществляется в форме отдельных точечных преобразований в северном, частично в южном секторах. Западный и северо-западный сектор центра города продолжает оставаться закрытым для роста. Здесь на момент проведения опроса не производится никаких радикальных вторжений. Восточный сектор центрального ядра города в представлениях жителей продолжает оставаться не нагружен центральными элементами. В качестве значимых здесь выделено лишь два элемента. Примечательно, что известная кампания переноса общегородского ядра из центральной части в юго-восточном направлении на октябрьскую часть не находит подкрепления в реальности функционирования и взаимодействия городских процессов.

Как и в периферийных районах индустриального периода, в старом центре г. Новосибирска вопросы реконструкции продолжают волновать население. Указывается на «ветхое состояние жилых дворов и инженерной инфраструктуры», «определенную неухоженность представительских мест». В общий перечень негативных качеств среды попадают изменения, связанные с новым строительством. Это, прежде всего, «возникновение элитного жилья и дорогих офисов». Кроме того, негативную оценку получает общий подход к вопросу обновления. При бесконечном ремонте офисных помещений и благоустройстве «мест у входа в здание» основная часть улиц остается в бесхозном состоянии.

Проведенный сопоставительный анализ материалов диагностики среды г. Новосибирска позволяет констатировать, что процесс обновления пространственной среды старогородских центров Сибири на рубеже XXI в. оказался заторможен. Выработанная в недрах централизованного планирования советского времени система проектирования городов направлялась на освоение новых территорий, позже приобрела дополнение охранным проектированием, призванным сберегать образцы материально-пространственной формы в пассивной форме как музейные экспонаты прошлых эпох. Обе традиции проектного дела развивались и существовали автономно, не взаимодействуя между собой и не вырабатывая механизмы развития. Проектные документы совмещали в себе два взаимоисключающих подхода. Это обусловило крайние формы реконструктивных мероприятий, выключение из активной жизнедеятельности и утрату значимых объектов и фрагментов пространственной среды. Без внимания оказалась сущностная категория сибирского города — образцы индустриального периода развития городов. Части города и районы застройки 30–80-х гг., определившие импульсы становления планировочной структуры прошлого века и обеспечивающие современную жизнь городов, выпали из поля зрения властей, представителей обеих частей проектного цеха.

Целостность включения историко-культурного наследия сибирских городов в процесс урбанизации в XXI в. предполагает переход к новому подходу проведения реконструктивных мероприятий. Этот подход вытекает из необходимости активного включения старогородских ядер и сложившихся районов в жизнедеятельность городов. Образцы среды прошлой индустриальной эпохи должны получить техническое и инфраструктурное обустройство.

Выводы. 1. В настоящий период времени из поля зрения профессиональных проектировщиков и управленцев выпала весьма ценная категория среды сибирского города. Без внимания оказались производственно-селитебные образования до- и послевоенного времени, портовые, производственные и промышленные сооружения эпохи индустриализации. Современное использование данного типа участков связано с включением в активную жизнедеятельность, наделение новыми значениями, определяемыми публичным характером их использования.

2. «Сложившиеся районы» индустриального периода являются носителями не только короткой и бурной истории сибирских городов, но и способны выполнить роль «цивилизованного образца в новых условиях», готовы показать свою социальную эффективность. Пространственная среда этого типа промышленно-селитебных поселений сохраняет традиционную улично-квартальную структуру. Благодаря наибольшему удельному весу общегородских объектов, благоприятным транспортным условиям, эта территория обладает высокой притягательностью для населения всего города, характеризуется наивысшим уровнем потребительской активности.

3. Комплекс проектных разработок, выполняемых нами для г. Куйбышева, предполагает выделение района соцгорода в качестве составной части общегородского центра. Предлагаемая концепция построена на замене ряда функций, утративших свой статус в условиях нового времени. Проектное решение — платформа для реализации местным населением накапливаемого «символического потенциала» Каинск — индустриальный Куйбышев — будущий центр Новосибирской агломерации. Акцент в большей степени делается не на новое строительство, а на реконструкцию и обустройство существующих сложившихся районов, территорий и зон.

4. Наряду с традиционной застройкой и малоэтажным усадебным домом в качестве эталона пространственной среды предлагается квартальный тип среды с присущими ей атрибутами — улица, квартал, пространство общего пользования внутри квартала, двор и т. д. [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка контактных зон и схема расселения г. Ачинска с целью рационального решения внешней транспортной сети, рекреационных возможностей и размещения переселенцев. Генеральный план г. Ачинска // Пояснит. зап. Т. II. — Красноярск: Красноярскгражданпроект, 1995.
2. Ачинск. Проект зон охраны памятников истории и культуры. Т. 3. — СПб.: Ленгипрогор, 1995.
3. Шпаковская Е. С. Пространственное развитие общегородского центра в структуре крупного города: Автореф. ... канд. дис. — М., 1977.
4. Клевакин А. Н. Функционально-пространственное развитие центра крупнейшего города с расчлененной структурой (на примере Новосибирска): Автореф. дис. ... канд. архит. / А. Н. Клевакин. — М., 1989.
5. Проект детальной планировки центра г. Куйбышева НСО. Пояснит. зап. СибНИИ градостроительства. — Новосибирск, 2008. — 26 с.
6. Правила землепользования и застройки города Куйбышева Куйбышевского района Новосибирской области. — Куйбышев, 2008. — 191 с.

© Клевакин А. Н., 2008

Получено 17.03.08

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.011.1.045

В. И. ЖАДАНОВ, канд. техн. наук, доц., **Е. В. ТИСЕВИЧ**, инж. (Оренбургский государственный университет);
Г. И. ГРЕБЕНЮК, д-р техн. наук, проф. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНО-ДЕФОРМИРУЕМЫХ РЕБРИСТЫХ СЖАТО-ИЗГИБАЕМЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

Сообщение 1

Приведены усовершенствованные алгоритмы расчета сжато-изгибаемых нелинейно-деформируемых ребристых панелей, разработанные на основе «балочной» расчетной схемы. Рассмотрены различные типы поперечных сечений и условий закрепления опор панелей. Даны выражения для определения коэффициента приведения обшивки, позволяющего учесть фактическую степень ее участия в общей работе конструкции. Показана целесообразность применения крупноразмерных панелей как конструкций, совмещающих несущие и ограждающие функции. Приведены результаты расчетов опытных конструкций и их сравнение с экспериментальными данными.

Развитие базы клееных деревянных конструкций обусловило техническую возможность и экономическую целесообразность применения в зданиях и сооружениях различного назначения ребристых плит покрытий и панелей стен на деревянном каркасе с наибольшими габаритными размерами, допустимыми по технологическим параметрам и условиям транспортабельности. Наиболее ярко преимущества крупноразмерных ребристых конструкций проявляются при совмещении ими несущих и ограждающих функций, когда основные продольные ребра выполняют роль колонн или балок перекрытий, а обшивки, включенные в общую работу плиты или панели, вместе со вспомогательными элементами являются ограждениями зданий и сооружений. Вариант конструктивного решения совмещенной панели, разработанной авторами, показан на рис. 1.

Характерным отличием совмещенных стеновых панелей от ограждений, навешенных на колонны, является совместная работа на сжатие с изгибом, когда сжимающая нагрузка от вышерасположенных конструкций передается непосредственно на продольные ребра, а изгибающая ветровая нагрузка может быть приложена как к основным ребрам, так и по всей площади конструкции в зависимости от конкретного конструктивного решения панели. В отличие от изгибаемых плит на основе древесины, методика расчета которых изучена достаточно подробно [1–3], существующие алгоритмы проектирования совмещенных нелинейно-деформируемых ребристых сжато-изгибаемых панелей недостаточно достоверно отражают условия совместной работы обшивок и ребер, особенно при наличии подкрепляющих элементов. Во многих случаях это приводит к несоответствию расчетных моделей реальному поведению конструкции при воздействии экспериментальных нагрузок.

С целью адекватной оценки напряженно-деформированного состояния совмещенных сжато-изгибаемых панелей авторами предпринята попытка усовершенствования алгоритмов их расчета. На первом этапе рассмотрим «балочную» расчетную схему. Пусть каким-либо образом закрепленная по контуру стеновая панель загружена по двум кромкам продольной сжимающей нагрузкой q_1 , а по боковой поверхности — поперечной нагрузкой q_2 (рис. 2). В качестве «стержневой» расчетной схемы

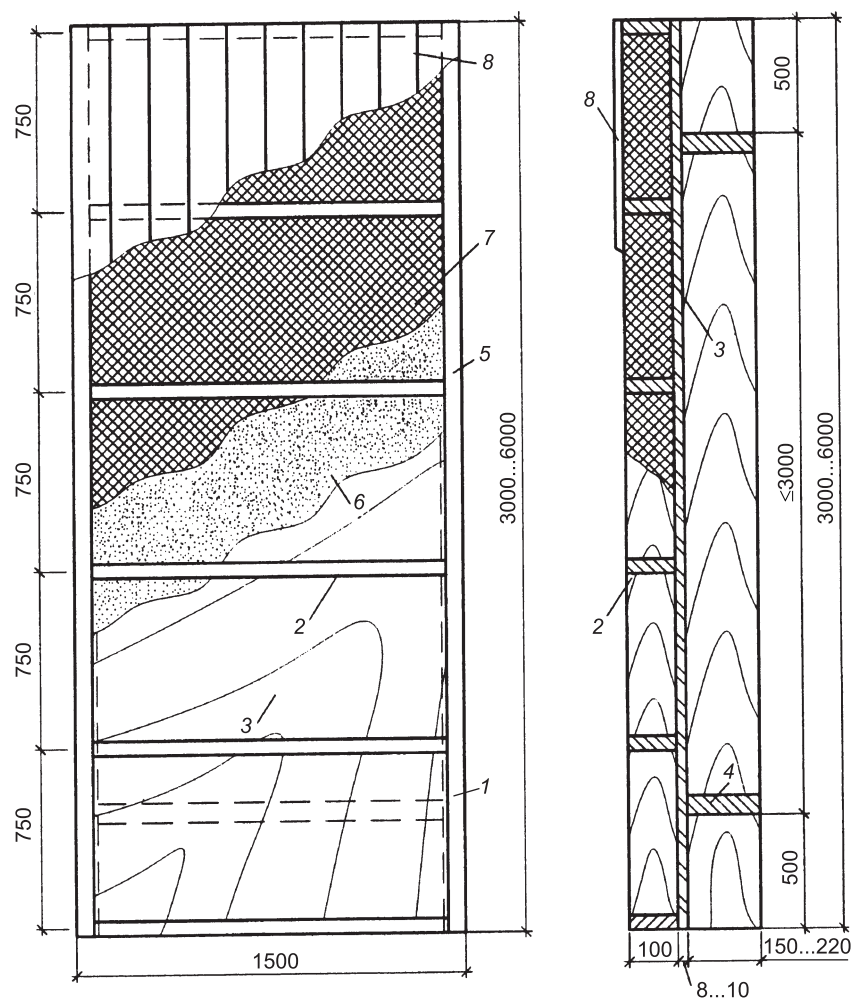


Рис. 1. Вариант конструкции совмещенной стеновой панели с фанерной обшивкой

1 — основные ребра; 2 — вспомогательные ребра; 3 — фанерная обшивка; 4 — диафрагмы; 5 — обрамляющие ребра; 6 — паронизолация; 7 — утеплитель; 8 — декоративная обшивка

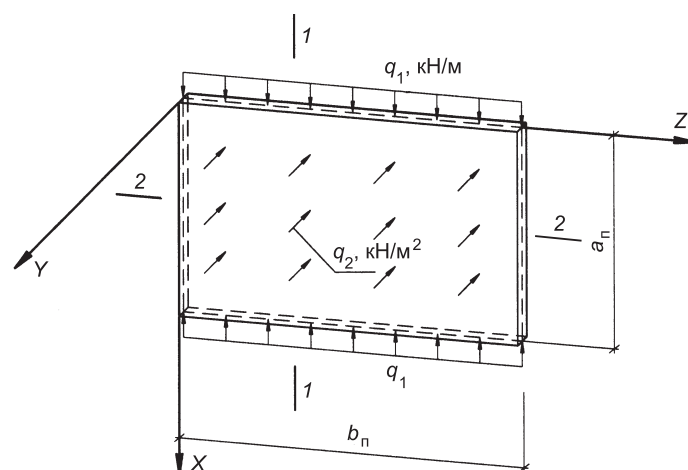


Рис. 2. Схема нагружения сжато-изгибаемой панели продольной сжимающей нагрузкой q_1 и поперечной изгибающей нагрузкой q_2

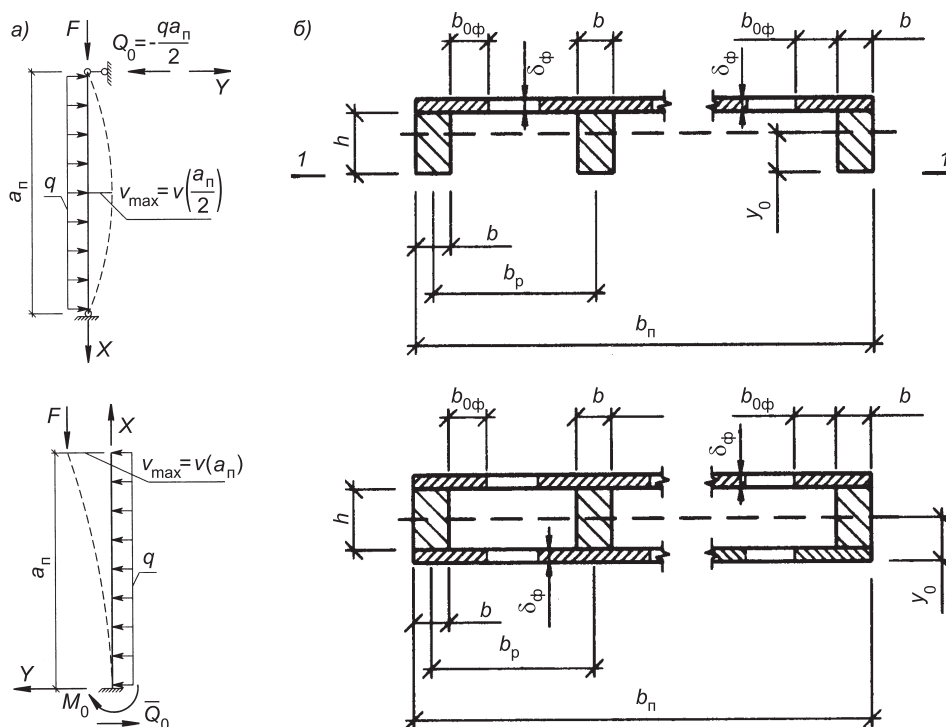


Рис. 3. Продольно-поперечный изгиб шарнирно опертой панели и панели с защемленной опорной частью

а — расчетные схемы; б — варианты поперечных сечений

панели рассмотрим схему, соответствующую продольно-поперечному изгибу шарнирно опертой или защемленной одним концом балки (рис. 3).

По аналогии с расчетом большеразмерных изгибаемых плит [3] будем полагать, что обшивка лишь частично вовлекается в работу сечения совместно с основными ребрами. В этом случае степень участия обшивки в общей работе конструкции оценивается коэффициентом приведения $k_{об}$. Экспериментально-теоретические исследования, проведенные авторами, показали, что коэффициент $k_{об}$ может быть определен по формуле:

$$k_{об} = k_b \cdot k_e \cdot k_l, \quad (1)$$

где k_b — коэффициент приведения обшивки для изгибаемых элементов, зависящий от шага основных ребер b_p и толщины обшивки δ :

$$k_b = 0,0428\delta^2 + 0,227\delta + 0,556 \text{ при } b_p = 750 \text{ мм,}$$

$$k_b = 0,0298\delta^2 + 0,151\delta + 0,337 \text{ при } b_p = 1500 \text{ мм,} \quad (2)$$

$$k_b = 0,0148\delta^2 + 0,076\delta + 0,199 \text{ при } b_p = 3000 \text{ мм;}$$

k_e — корректировочный коэффициент, учитывающий действие продольных сжимающих сил;

k_l — корректировочный коэффициент, учитывающий соотношение шага основных ребер b_p к пролету панели a_n .

Значение коэффициента k_e можно определить с достаточной для практических целей точностью (степень погрешности не более 3%) по аппроксимационной формуле

$$k_e = 1 - 0,09\sqrt{N \cdot c / M}, \quad (3)$$

где N — расчетное продольное усилие, кН;

M — расчетный изгибающий момент, кНм;

$c = 1$ м — коэффициент на единицу измерения.

Коэффициент k_l зависит от фактического соотношения b_p/a_n и его значение можно записать в виде (степень погрешности не более 5%):

$$k_l = 1,2 - 0,4\sqrt{b_p/a_n} \text{ при } b_p/a_n > 0,25, k_l = 1 \text{ при } b_p/a_n \leq 0,25. \quad (4)$$

Отметим, что вышеприведенные формулы при незначительной погрешности отличаются простотой и удобством использования, в том числе в автоматизированных расчетах. При необходимости точного определения коэффициента $k_{об}$ можно использовать стандартные программные расчетные комплексы типа «SCAD», «Лира», «COSMOS» и им подобные.

Зная значение $k_{об}$, можно определить геометрические характеристики поперечного сечения панели. Приведем пошаговый алгоритм такого определения с учетом наличия одной или двух обшивок, причем в случае двухсторонней обшивки сохраняется симметрия сечения.

1. Расчетная ширина фанерной обшивки равна

$$b_{\phi} = 2b_{\phi} (m_{op} - 1) + b \cdot m_{op} = k_{об} (b_n - b \cdot m_{op}) + b \cdot m_{op}, \quad (5)$$

где $k_{об}$ — коэффициент приведения обшивки, зависящий от шага ребер;

m_{op} — число основных ребер панели;

b — ширина поперечного сечения основных ребер.

2. Площадь приведенного сечения панели

$$A_{пр} = A_d + n A_{\phi}, \quad (6)$$

где $A_d = m_{op} b h$ — площадь поперечного сечения деревянных ребер;

$n = E_{\phi} / E_d$ — коэффициент приведения фанеры и древесины;

A_{ϕ} — площадь поперечного сечения фанерных обшивок:

$A_{\phi} = b_{\phi} \phi$ — в случае односторонней обшивки;

$A_{\phi} = 2b_{\phi} \phi$ — в случае двухсторонних обшивок;

h — высота поперечного сечения основных ребер.

3. Приведенный статический момент сечения относительно оси 1-1 для случая с односторонней обшивкой:

$$S_{пр} = \frac{1}{2} m_{op} \cdot b \cdot h^2 + n \cdot A_{\phi} \cdot \left(h + \frac{\delta_{\phi}}{2} \right). \quad (7)$$

4. Положение центральной оси приведенного сечения определяется величиной y_0 (см. рис. 3):

— односторонняя обшивка: $y_0 = S_{пр} / A_{пр}$; (8)

— двухсторонняя обшивка: $y_0 = 1/2 (h + 2\delta_{\phi})$. (9)

5. Момент инерции приведенного сечения относительно центральной оси равен:

— односторонняя обшивка:

$$I_{пр} = m_{op} \cdot \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(y_0 - \frac{h}{2} \right)^2 \right) + n \cdot b_{\phi} \cdot \delta_{\phi} \cdot \left(h - y_0 + \frac{\delta_{\phi}}{2} \right)^2; \quad (10)$$

— двухсторонняя обшивка:

$$I_{пр} = m_{op} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} + 2n \cdot b_{\phi} \cdot \delta_{\phi} \cdot \left(\frac{h + \delta_{\phi}}{2} \right)^2. \quad (11)$$

Определим усилия, перемещения и напряжения в панелях на основе точного решения при продольно-поперечном изгибе. При $E_d I_{пр} = \text{const}$, $q = \text{const}$, общее решение по методу начальных параметров дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба стержня имеет вид [4]:

$$v(x) = v_0 + \frac{\Theta_0}{k} \cdot \sin kx + \frac{M_0}{k^2 \cdot E \cdot I} (1 - \cos kx) + \frac{\bar{Q}_0}{k^2 E_q I_{np}} \cdot \left(x - \frac{\sin kx}{k} \right) - \frac{q}{k^2 E_q I_{np}} \cdot \left(\frac{\cos kx}{k^2} + \frac{x^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (12)$$

где (x) — функция прогибов сечений;

v_0 — начальный прогиб;

Θ_0 — начальный угол поворота;

$\bar{Q}_0 = \frac{qa_n}{2}$ — начальная «балочная» поперечная сила;

$$k = \sqrt{\frac{F}{E_q I_{np}}}; \quad F = q_1 \cdot b_n; \quad q = q_2 \cdot b_n;$$

a_n — расчетная длина панели; b_n — ширина панели.

Рассмотрим различные условия закрепления концов панели, наиболее распространенные в строительной практике (см. рис. 3).

Шарнирно опертая панель. Учитывая граничные условия $v_0 = 0$, $M_0 = 0$, $\bar{Q}_0 = \frac{q \cdot a_n}{2}$, $v(a_n) = 0$, получим

$$\Theta_0 = \frac{k}{\sin k \cdot a_n} \left(\frac{q \cdot a_n}{2F} \left(a_n - \frac{\sin k \cdot a_n}{k} \right) \right) - \frac{q}{F} \left(\frac{\cos k \cdot a_n}{k^2} + \frac{a_n^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (13)$$

$$v_{\max} = v\left(\frac{a_n}{2}\right) = \frac{\Theta_0}{k} \sin k \frac{a_n}{2} - \frac{qa_n}{2F} \left(\frac{a_n}{2} - \frac{\sin k \frac{a_n}{2}}{k} \right) + \frac{q}{F} \left(\frac{\cos k \frac{a_n}{2}}{k^2} + \frac{a_n^2}{8} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (14)$$

$$M_{\max} = M\left(\frac{a_n}{2}\right) = E_d I_{np} \left(-k \Theta_0 \sin k \frac{a_n}{2} - \frac{qa_n}{2F} k \sin \frac{ka_n}{2} + \frac{q}{F} \left(-\cos k \frac{a_n}{2} + 1 \right) \right), \quad (15)$$

$$|Q|_{\max} = |Q(0)| = F \cdot \Theta_0 + \frac{q \cdot a_n}{2}. \quad (16)$$

Защемленная панель. Граничные условия $v_0 = 0$, $\Theta_0 = 0$, $\bar{Q}_0 = -q \cdot a_n = Q(0)$.

После преобразований получим

$$M_0 = M_{\max} = \frac{q \cdot a_n \cdot \sin k \cdot a_n}{k \cdot \cos k \cdot a_n} - \frac{q}{k^2 \cdot \cos k \cdot a_n} \cdot (-\cos k \cdot a_n + 1) = \frac{q}{k^2} \cdot \left(a_n \cdot k \cdot \operatorname{tg} k \cdot a_n + 1 - \frac{1}{\cos k \cdot a_n} \right), \quad (17)$$

$$|Q|_{\max} = \max(q \cdot a_n; F \cdot \Theta(a_n)), \quad (18)$$

где

$$\Theta(a_n) = \frac{M_0}{k \cdot E_d \cdot I_{np}} \cdot \sin k a_n - \frac{q \cdot a_n}{k^2 \cdot E_d \cdot I_{np}} \cdot (1 - \cos k a_n) + \frac{q}{k^2 \cdot E_d \cdot I_{np}} \cdot \left(-\frac{\sin k a_n}{k} + a_n \right), \quad (19)$$

$$v_{\max} = v(a_n) = \frac{M_0}{F} \cdot (1 - \cos ka_n) - \frac{q \cdot a_n}{F} \cdot \left(a_n - \frac{\sin ka_n}{k} \right) + \frac{q}{F} \cdot \left(\frac{\cos ka_n}{k^2} + \frac{a_n^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (20)$$

Нормальные и касательные напряжения в поперечных сечениях определим по формулам сопротивления материалов. В частности, максимальное сжимающее напряжение при двухсторонней обшивке равно:

$$\sigma_{\max}^{\text{сж}} = \frac{M_{\max} \cdot \frac{h}{2}}{I_{\text{пр}}} + \frac{F}{A_{\text{пр}}}. \quad (21)$$

В случае односторонней внешней обшивки соответствующее напряжение будет также в обшивке и равно:

$$\sigma_{\max}^{\text{сж}} = \frac{M_{\max} (h - y_0)}{I_{\text{пр}}} + \frac{F}{A_{\text{пр}}}. \quad (22)$$

При этом продольная сжимающая нагрузка разгружает растянутые от изгиба волокна основных ребер.

В качестве примеров рассмотрим расчеты ребристой сжато-изогнутой панели со следующими характеристиками:

- длина панели — $a_n = 6$ м;
- ширина панели — $b_n = 3$ м;
- количество ребер в направлении 1 (в поперечном сечении) — $m_{\text{ор}1} = 3$;
- количество ребер в направлении 2 (в продольном сечении) — $m_{\text{ор}2} = 4$;
- высота сечения ребер — $h = 0,3$ м;
- ширина сечения ребер в направлении 1 — $b_1 = 0,07$ м;
- ширина сечения ребер в направлении 2 — $b_2 = 0,05$ м;
- интенсивность поперечной нагрузки — $q_2 = 0,4$ кН/м²;
- интенсивность погонной продольной нагрузки — $q_1 = 14$ кН/м;
- толщина фанерной обшивки — $\phi = 0,015$ м;
- $E_d = 10^4$ МПа; $E_{\phi 1} = 9 \cdot 10^3$ МПа; $E_{\phi 2} = 6 \cdot 10^3$ МПа;
- модули упругости и коэффициенты Пуассона древесины в ортогональных направлениях приняты по продольному направлению ребер — $\mu_d = 0,5$; $\mu_{\phi 12} = 0,085$; $\mu_{\phi 21} = 0,065$.

Результаты расчетов панели с использованием «балочной» расчетной схемы приведены в таблице. Расчеты проведены с использованием разработанного авторами программного модуля SOLV1 в среде DIGITAL Visual Fortran.

Проведенные экспериментальные исследования шарнирно опертой панели с вышеперечисленными параметрами позволили определить величину фактического прогиба в середине пролета, которая оказалась 3,4 мм (0,0034 м), что на 17% меньше теоретического значения. Данное расхождение, с одной стороны, можно считать удовлетворительным для условий натурального эксперимента, с другой — оно дает определенный резерв надежности конструкции и предопределяет возможность разработки бо-

Результаты расчетов панели с использованием «балочной» расчетной схемы

Расчетная схема	M_{\max} , кНм	Q_{\max} , кН	W_{\max} , м
Шарнирно опертая панель	8,359	5,538	0,0041
Защемленная панель	36,88	11,06	0,0711

лее точных алгоритмов расчета нелинейно-деформируемых совмещенных ребристых сжато-изгибаемых панелей на основе древесины.

Выводы. 1. В случае расчета на прочность и жесткость сжато-изогнутых панелей в одном направлении для расчетов внутренних усилий, напряжений и деформаций вполне применимо использование «балочной» расчетной схемы.

2. Разработанный алгоритм расчета ребристых панелей позволяет учесть фактическую неравномерность работы обшивки по ширине панели при помощи коэффициента, определенного экспериментально-теоретическим путем и выраженного аппроксимационными формулами, удобными в практических расчетах.

3. Использование «балочной» расчетной схемы приводит к частичному завышению величин прогибов, что идет в запас надежности конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. — Введ. 01.01.82. — М.: Стройиздат, 1980. — 31 с.
2. Рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению большепролетных клефанерных плит для покрытий общественных зданий. — Новосибирск: СибЗНИИЭП, 1988. — 22 с.
3. Жаданов В. И. Большеразмерные совмещенные плиты из клееной древесины и пространственные конструкции на их основе. Разработка, исследования, оптимизация / В. И. Жаданов, Г. И. Гребенюк, П. А. Дмитриев. — Оренбург: ИПК ОГУ, 2007. — 209 с.
4. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник в 3 т. / Под ред. И. В. Биргера, Я. Г. Пановко. — Т. 1. — М.: Машиностроение, 1968. — 831 с.

© Жаданов В. И., Тисевич Е. В., Гребенюк Г. И., 2008

Получено 04.04.08

УДК 624.137

П. В. ЗУБАЧЕВ, асп. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

СМЕЩЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ В ШПУНТОВОМ ОГРАЖДЕНИИ, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕМ УСИЛЕННЫЙ ГРУНТОВЫЙ ОТКОС

Численно, с использованием компьютерной программы, основанной на модели упруго-идеальнопластического грунта, установлено влияние армирования и инъекционного уплотнения грунтового откоса на смещения и величину внутренних усилий в шпунтовом ограждении. Оценено влияние (на них) размеров усиленного массива и наличие связи между вертикальными армирующими пластинами с ограждением. Полученные результаты могут быть использованы при решении вопросов, связанных со строительством в стесненных условиях.

Котлованы вновь строящихся зданий и сооружений в стесненных условиях городской застройки часто приходится ограждать различными подпорными сооружениями нередко в виде шпунтовых стенок постоянного или временного назначения. При этом горизонтальные смещения временных стенок и их устойчивость, помимо физико-механических свойств основания, ограничиваются условиями строительного процесса, а требования, предъявляемые к стенкам постоянного назначения, — условиями строительства и эксплуатации строящегося здания и примыкающих к нему объектов. Расход материала и стоимость возведения ограждения во многом зависят от особенностей конструкции сооружения. Последняя в немалой степени определяется величиной действующего на него бокового давления

грунта. Таким образом, с целью получения оптимального решения для способа ограждения котлованов в проектных разработках целесообразно применять различные меры по уменьшению бокового давления грунта. Данная задача может быть разрешена за счет армирования грунта, поддерживаемого стенкой или его закреплении с дополнительным уплотнением [1, 2].

Ниже, в развитие [2], приведены результаты численных экспериментов, выполненных с целью установления рациональных путей снижения

бокового давления грунта на ограждения. Вычисления проделаны с привлечением метода дискретизации расчетной области треугольными конечными элементами (т.к.э.). Использована модель слоистого упругоидеальнопластического массива грунта [3] и исходные характеристики грунтов одной из строительных площадок

Таблица 1

Наименование грунта	γ , кН/м ³	φ	c , кПа	E , МПа	ν
ИГЭ-1	16	30	1	8	0,25
ИГЭ-2	17	34	1	30	0,25
ИГЭ-3	17	29	8	20	0,30

Примечание. γ — удельный вес грунта; φ , c — угол внутреннего трения и сцепление грунта соответственно; E , ν — модуль деформации и коэффициент Пуассона соответственно.

г. Новосибирска. Физико-механические характеристики грунтов различных напластований (ИГЭ) представлены в табл. 1.

Мощность верхнего слоя насыпного грунта (ИГЭ-1) во всех случаях составляет 3 м, второго (песок, ИГЭ-2) — 12 м, третьего (твердый суглинок, ИГЭ-3) — более 5 м. Грунтовые воды в пределах исследуемой толщи основания не выявлены, потому их влияние в расчетах не учитывается.

Котлован — протяженной формы, имеет ширину $B = 20$ м, глубину $H = 8$ м и длину $L > 50$ м, поэтому задача решена в условиях плоской деформации сооружения. Заглубление шпунтового ограждения по отношению к дну котлована составляет 7 м. Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) основания, перемещения U ограждения (стенки) и внутренних усилий в различных сечениях ограждения выполнены для стенки толщиной $t_n = 0,3$ м = const. Рассмотрены случаи вертикального

армирования грунтового откоса, удерживаемого стенкой, или закрепление его методом высоконапорного инъецирования песчано-цементной смеси («раствора») [4]. Рассмотрен закрепленный массив, примыкающий к стенке, который имеет высоту $H = 8$ м и ширину $m = 6$ м. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки q на поверхность откоса составляет 10 кН/м².

1. Откос, армированный вертикальными пластинами. Шаг l между железобетонными пластинами принят постоянным и равным 1 м, их изгибная жесткость определяется толщиной $\delta = 0; 0,05; 0,10; 0,15$ и $0,20$ м (рис. 1). Длина пластин $h = H$. Пластины усиления в

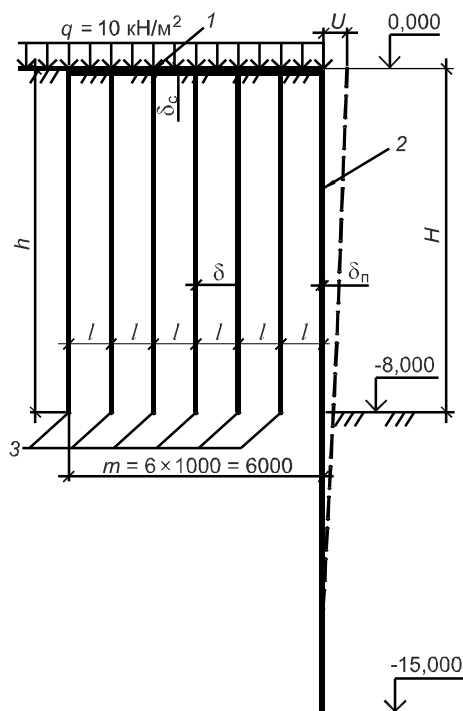


Рис. 1. Расчетная схема усиленного откоса и шпунтового ограждения
1 — связь; 2 — ограждение; 3 — стержни

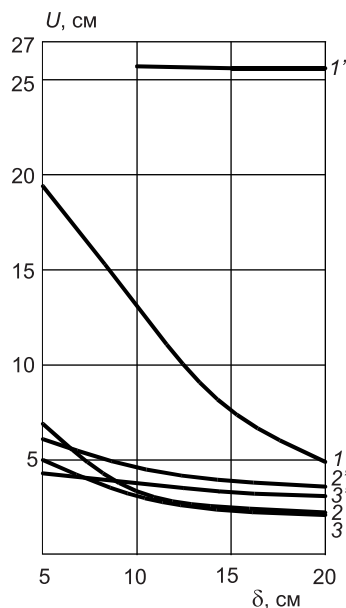


Рис. 2. Влияние размеров поперечного сечения армирующих пластин (δ) и связи (c) на горизонтальные смещения ограждения (U)

1–3 соответствует значениям $c = 0, 0,10$ и $0,20$ м; вариант армирования при $h = H/2$ показан цифрами со штрихом

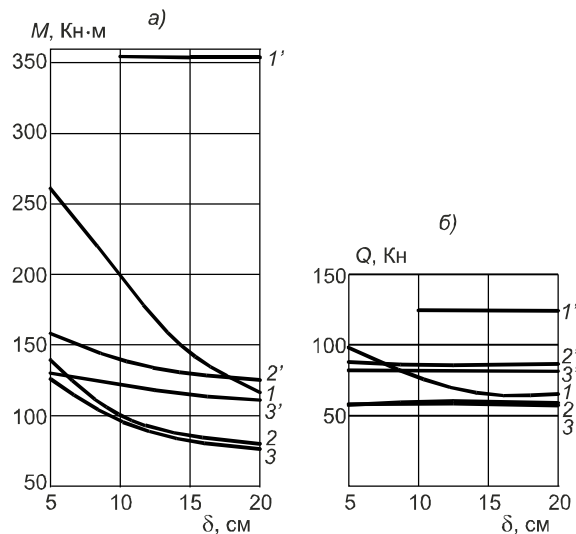


Рис. 3. Влияние размеров поперечного сечения армирующих пластин (δ) и связи (c) на величину максимальных усилий в ограждении M (а) и Q (б)

Усл. обозн. см. на рис. 2

верхних сечениях объединены между собой и подпорной стенкой гибкой связью, изгибная жесткость которой соответствует жесткости железобетонной плиты толщиной $c = 0, 0,10$ и $0,20$ м.

На рис. 2 представлены полученные при этом результаты, из которых следует, что с увеличением толщины пластин и жесткости объединяющей их связи, горизонтальные смещения U верха стенки уменьшаются. При отсутствии связи ($c = 0$) величина U составила 25,3 см, так что соединение пластин со стенкой, обеспечивающее их совместную работу, является весьма эффективным способом уменьшения горизонтальных смещений конструкции. Внутренние усилия в стенке (изгибающие моменты M и поперечные силы Q) при изменении толщины армирующих пластин и объединяющей их связи в интервале от 0 до 0,1 м существенно изменяются (рис. 3). Примечательно, что при толщине пластин $\delta = 0,1$ и $0,2$ м и толщине связи $c = 0,1$ или $0,2$ м результаты расчета смещений стенки и усилий в ней различаются незначительно, так что дальнейшее увеличение параметров δ и c становится нецелесообразным.

Уменьшение параметра h до величины $H/2$ (при всех прочих равных условиях и $\delta = 0,2$ м) приводит к незначительному увеличению горизонтальных смещений ограждения (см. рис. 2) и к заметному увеличению внутренних усилий в ограждении (на 150% для изгибающих моментов и до 130% для поперечных сил).

В случае отсутствия армирующих пластин и толщине стенки, равной 0,3 м, горизонтальные смещения стенки $U = 0,46$ м, максимальный изгибающий момент $M = 533$ кН·м, максимальная поперечная сила $Q = 177$ кН (см. табл. 2, п. 1). Сопоставление этих данных с результатами, представленными на рис. 2, 3, позволяет сделать вывод о целесообразности усиления грунтового откоса вертикальными пластинами, соединенными со стенкой в ее верхней части.

Таблица 2

№ п/п	Размеры усиленного массива		Механические характеристики усиленного грунта					Результаты расчета		
	Ширина b , м	Глубина h , м	кН/м^3	φ	c , кПа	E , МПа	ν	U , см	M , кН·м	Q , кН
1	—	—	—	—	—	—	—	46	533	177
2	6	8	18,7	30	10	40	0,3	24	311	112
3	6	8	17,0	38	5	40	0,3	20	273	104
4	6	8	24,0	38	100	$23 \cdot 10^3$	0,2	1,2	108	436
5	6	8	24,0	38	100	$23 \cdot 10^3$	0,2	2,6	42	32
6	10	3	17,0	38	5	40	0,3	32	407	141

2. *Откос, усиленный методом высоконапорного инъецирования песчано-цементной смеси.* С целью увеличения механических характеристик слабых грунтов основания и грунтовых откосов ООО ПСК «Фундамент» в г. Новосибирске выполняет большой объем работ названным выше методом [4]. При этом усиленный грунт преобразуется в геокомпозит, состоящий из уплотненного естественного грунта и линз затвердевшей песчано-цементной смеси. Интегральные прочностные показатели геокомпозита (угол внутреннего трения и сцепление) в первом приближении установлены методом ДальНИИИстроя [5], а интегральный деформационный показатель (модуль деформации геокомпозита E) — по зависимостям, разработанным для сред, содержащих жесткие включения различных размеров при отсутствии между ними контакта [6].

После усиления грунтового откоса и улучшения его механических характеристик давление грунта на ограждение и его горизонтальные смещения уменьшаются. Степень их уменьшения иллюстрируется результатами нижеследующих расчетов с использованием вышеперечисленных исходных данных и метода расчета. Расчетные характеристики грунтов откоса, имеющего усиленную область 6×8 м, а также значения контролируемых параметров U , M , Q , полученные в результате расчетов, приведены в табл. 2. Как и в других случаях, толщина ограждения — 0,3 м. В п. 1 табл. 2 приведены результаты расчета U , M , Q для случая ограждения, поддерживающего естественный откос (грунтовые условия — по табл. 1).

Из табл. 2 следует, что усиленный инъецированием откос (п. 2–5) оказывает меньшее воздействие на ограждение по сравнению с естественным неусиленным откосом (п. 1). Как смещения U ограждения, так и максимальные внутренние усилия M и Q в нем в случаях, отмеченных п. 2–5, существенно меньше, чем при наличии естественного неусиленного откоса. Размеры усиленного массива, естественно, не могут не повлиять на поведение ограждения. Так, массив с размерами усиленной области 6×8 м (п. 2, 3) улучшает условия работы ограждения заметнее, чем массив с размерами усиления 10×3 м (п. 6). Степень улучшения свойств грунта при его усилении также заметно влияет на поведение ограждения, его смещения и запас прочности. Так, при гипотетическом усилении грунта в откосе до степени, соответствующей значениям угла внутреннего трения $\varphi = 38^\circ$, сцепления $c = 100$ кПа, модуля деформации $E = 23 \cdot 10^3$ МПа (п. 4, табл. 2), смещения ограждения и изгибающий момент в ограждении становятся минимальными, хотя значительно возрастает поперечная сила Q . Это объясняется принятым в этом решении влиянием полного сцепления гипотетического грунта с ограждением. При снятии этого условия (п. 5, табл. 2) усилия в ограждении становятся минимальными, хотя несколько возрастают горизонтальные смещения ограждения. Это явление напрямую связано с изменением условий взаимодействия грунтового откоса с ограждением, что выявляется при анализе НДС грунтового массива в различных случаях, отмеченных в табл. 2.

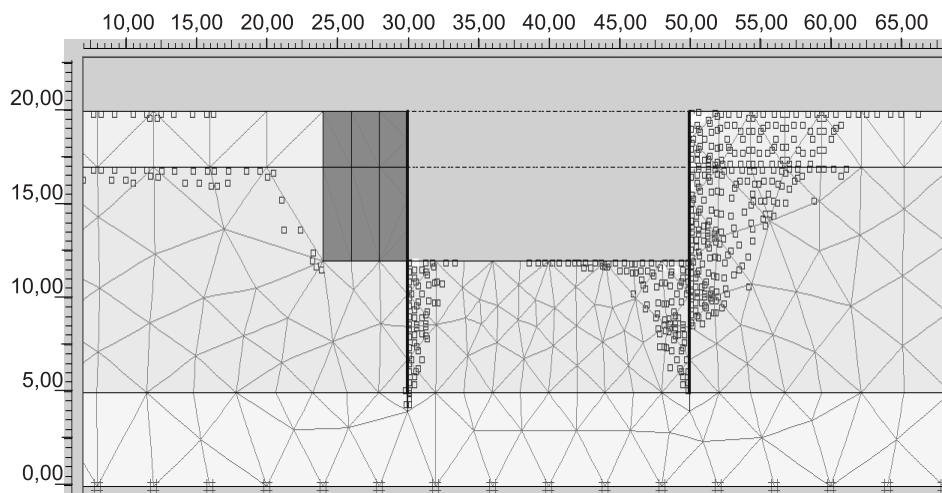


Рис. 4. Области пластических деформаций в естественном (справа) и усиленном инъецированием (слева) грунтовом откосе

На рис. 4 изображены точки пластического течения грунта для двух крайних случаев. Справа изображена стенка, поддерживающая естественный откос (п. 1, табл. 2), слева — стенка, за которой имеется область усиленного грунта размерами 6×8 м (п. 4, табл. 2). При сравнении этих двух случаев видно, что справа — ярко выраженная область пластических деформаций грунта как за стенкой, так и перед ней. За стенкой, поддерживающей усиленный массив грунта, наблюдается появление лишь незначительного количества точек с предельным напряженным состоянием, что говорит о нахождении откоса в допредельном состоянии. Именно этим и объясняются малые значения перемещения ограждения и малые величины внутренних усилий, возникающих в нем.

Выводы. 1. При армировании откоса вертикальными пластинами горизонтальные смещения ограждающего сооружения (шпунтовой стенки; стенки, выполняемой методом «стена в грунте» и др.) уменьшаются с увеличением толщины пластин и ограждения, а также при наличии горизонтальной связи пластин с сооружением.

2. Уменьшение длины армирующих пластин с (h до $H/2$), связанных с ограждением, слабо отражается на изменении величины горизонтальных смещений ограждения, но приводит к увеличению внутренних усилий в нем.

3. Искусственное усиление грунтов откоса способом инъецирования на участке их примыкания к ограждению приводит к уменьшению смещений сооружения и внутренних усилий в нем. Степень уменьшения этих показателей зависит от степени усиления грунта в откосе и условий взаимодействия усиленного массива с ограждением. Минимальные усилия в сооружении и минимальные смещения ограждения возникают в случае отсутствия связи между усиленным массивом и сооружением.

4. Мощность усиленной инъецированием области (по глубине откоса) имеет большое значение для уменьшения смещений сооружения и усилий, в нем возникающих. В практическом отношении целесообразно усиливать грунт на всю высоту откоса, поддерживаемого ограждением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Криворотов А. П. К оценке сжимаемости геотехногенных оснований зданий и сооружений / А. П. Криворотов, А. В. Лубягин, П. А. Савков и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 7. — С. 108–113.

2. Зубачев П. В. Оценка прочности и деформируемости шпунтового ограждения армированного грунтового откоса /П.В. Зубачев, А.П. Криворотов//Изв. вузов. Строительство.— 2007.— № 10.— С. 98–102.
3. PLAXIS. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses/Руководство пользователя: Версия 8. — Нидерланды: Дельфтский технологический университет, 2002.
4. Пат. № 2119009 РФ. Способ уплотнения грунта /А. В. Лубягин, В. С. Миронов.— Оpubл. Российское агентство по патентам и товарным знакам. 1997 г.
5. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем и пылевато-глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. ДальНИИС.— М.: Стройиздат, 1989.— 24 с.
6. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов/З. Г. Тер-Мартirosян.— М.: Изв. Ассоц. строит. вузов, 2005.— С. 89–105.

© Зубачев П. В., 2008

Получено после доработки 27.03.08

УДК 697.1.001.5

Р. А. НАЗИРОВ, д-р техн. наук, проф., **О. В. СОЛОВЬЕВА**, **Д. А. МИХЕЕВ**, инженеры, **Е. В. ПЕРЕСЫПКИН**, канд. техн. наук (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ УГЛОВ СТЕН, УГЛОВЫХ И РЯДОВЫХ СТЫКОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Представлены результаты исследований температур на внутренней поверхности угловых частей ограждающих конструкций с применением металлических элементов. Установлено, что применение высокотеплопроводных алюминиевых пластин является эффективным средством улучшения температурно-влажностных показателей наружных углов стен, угловых и рядовых стыков каменных строительных конструкций. Определены оптимальные геометрические размеры металлических пластин, позволяющие повысить температуру на внутренней поверхности углов ограждающих конструкций.

Опыт эксплуатации зданий показывает, что узловые сопряжения строительных конструкций, например, примыкание внутренних стен, перегородок, плит перекрытий, санитарно-технических кабин и т.п. к наружным ограждениям — самое уязвимое место с позиции обеспечения санитарно-гигиенических требований, связанных с понижением температуры внутренней поверхности ниже температуры точки росы. В этих местах чаще всего наблюдается промерзание и как следствие увлажнение. С целью исключения указанного явления устраивают дополнительную теплоизоляцию конструкций, что не всегда приводит к положительному результату, особенно при устройстве теплоизоляционного слоя на внутренней поверхности стен помещения. В последнем случае резко сокращается приток тепла от нагретого воздуха помещения к поверхности углового стыка конструкций и значительно снижается температура поверхности ограждения. Это понижение распространяется на поверхность, не защищенную утеплителем, что приводит к еще более отрицательному результату.

Не имея в виду качество строительно-монтажных работ, понижение температуры, в частности, на внутренних углах наружных стен, обусловлено геометрическими особенностями — неравенством площадей теплоприемления и теплоотдачи, а также уменьшением коэффициента тепло-

восприятия вследствие уменьшения передачи тепла излучением и в результате понижения интенсивности конвекционных потоков воздуха.

Величина понижения температуры в наружном углу стены по данным [1] зависит от формы конструкции угла, величины термического сопротивления стены, разности температур внутреннего и наружного воздуха, изменения величины сопротивления тепловосприятия.

Автор [1] отмечает, что в слоистых крупнопанельных стенах на величину температуры в угловом стыке конструкций будет оказывать влияние толщина внутреннего бетонного слоя панелей. Чем больше его толщина, тем выше будет температура вследствие интенсивного подвода тепла бетонным слоем от гладки стены к наружному слою. На основании расчетов внутренней теплоизоляции делается вывод, что «утепление более теплопроводными древесно-волоконистыми плитами оказалось значительно эффективнее, чем малотеплопроводным пенополистиролом» [1, с. 174].

Изучая влияние конструктивных факторов на температурно-влажностный режим узловых сопряжений деревянных (щитовых) домов, авторы [2] установили, что с увеличением теплопроводности внутренней обшивки от 0,116 до 0,29 Вт/(м·°С) температура в углу стены повышается на 0,7–1,0°С. Этот эффект авторы объясняют выравниванием температуры поверхности в результате более интенсивного подвода тепла от гладки панели к углу по теплопроводной обшивке. Для практического применения установленного эффекта авторами предлагается установка высокотеплопроводных пластин, например, из алюминия или оцинкованного железа в углах зданий с внутренней стороны. Элементы утепления в виде алюминиевых пластин шириной 0,1–0,15 м и толщиной $0,1 \cdot 10^{-4}$ – $0,1 \cdot 10^{-2}$ м обеспечили повышение температуры в углу с 2,2 до 9,7°С.

Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов [3] провели специальные расчеты, в которых переменными факторами были материал металлических элементов, их размеры и местоположение относительно внутренней обшивки. Расчеты проведены для постоянных температур внутреннего (+18°С) и наружного (–30°С) воздуха при коэффициентах теплообмена внутренней и наружной поверхности соответственно 8,7 и 23 Вт/(м²·°С). Теплопроводность материалов, Вт/(м·°С): древесины 0,175; древесно-волоконистых плит 0,107; оцинкованной стали 46; алюминиевого сплава 185. Результаты расчетов представлены в табл. 1 [3].

Таблица 1

**Результаты расчета температур на внутренней поверхности угла
в зависимости от расположения и геометрических размеров
металлических элементов**

Номер эксперимента	Материал металлических элементов и их местоположение на панели	Толщина и ширина металлических элементов, мм	Температура внутренней поверхности угла, °С
1	Дюралюминий на внутренней поверхности обшивки	0,1 × 100	10,5
2	Дюралюминий под внутренней обшивкой	0,1 × 100	8,0
3	Дюралюминий на внутренней поверхности обшивки	0,1 × 150	11,4
4	То же	0,5 × 100	11,2
5	Оцинкованное железо под внутренней обшивкой	0,6 × 100	10,2
6	Оцинкованное железо на внутренней поверхности обшивки	0,6 × 100	9,6
7	То же	1,0 × 100	9,4
8	Без металлических элементов	—	6,1

Таблица 2
**Факторы варьирования для
 исследования математической модели**

Фактор варьирования	Значение фактора варьирования		
	Уровни варьирования		
	-1	0	1
Толщина x1, мм	5	7	9
Глубина x2, мм	0	2	4
Ширина x3, мм	40	80	120

Таким образом, установлена принципиальная возможность повышения температуры путем использования теплопроводных материалов с внутренней стороны угловых сопряжений строительных конструкций. С целью эффективного применения этого способа для решения актуальных проблем в современном домостроении проведены специальные расчеты. Получена математиче-

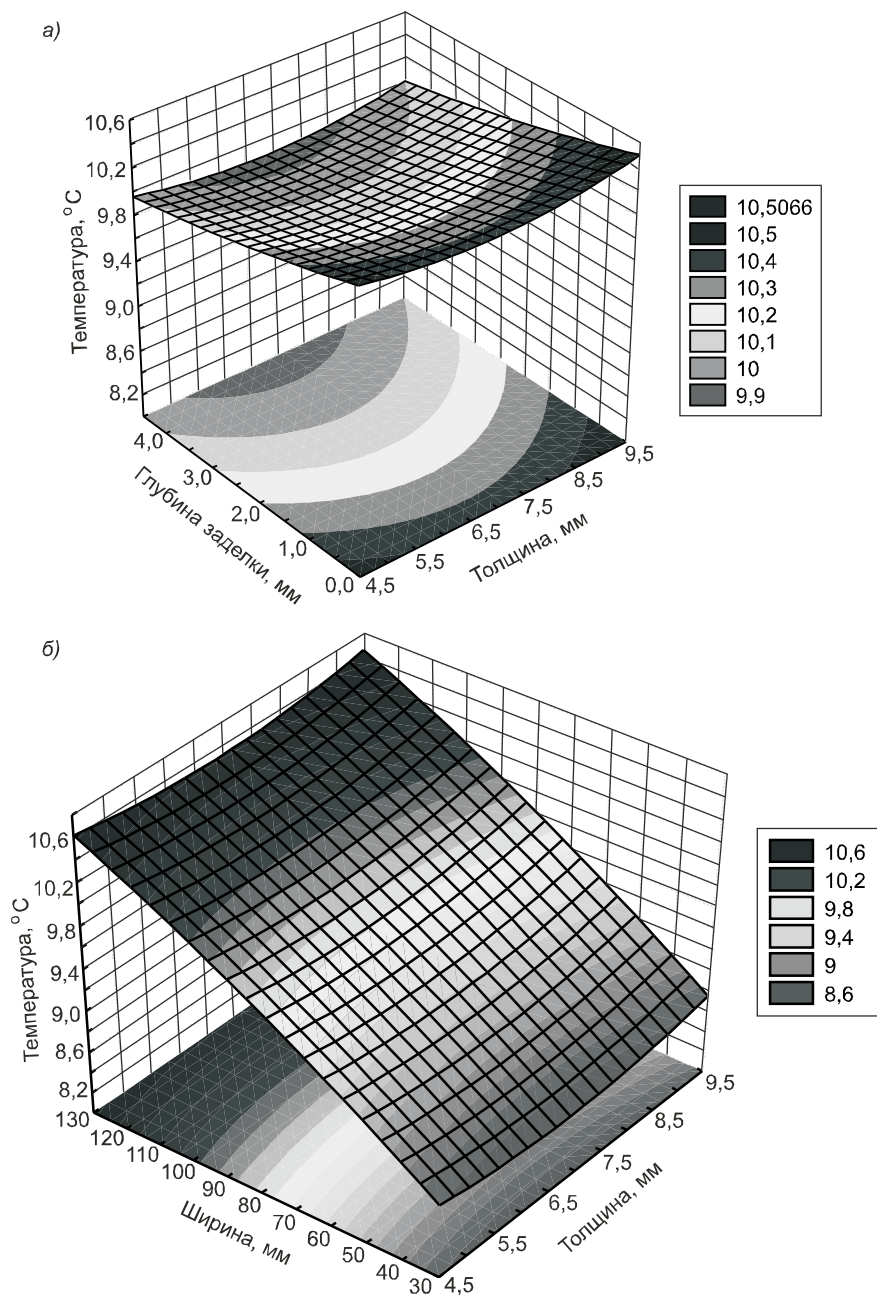


Рис. 1. Изменение температуры в угловом стыке кирпичной кладки толщиной 640 мм в зависимости от глубины заделки (а) и без заделки (б) алюминиевой пластины шириной 120 мм

ская модель изменения температуры в углу кирпичной кладки толщиной 640 мм для климатических условий г. Красноярска в зависимости от глубины заделки в материал стенового ограждения алюминиевой пластинки (x_1), ее толщины (x_2) и ширины (x_3):

$$T(x_1, x_2, x_3) = 9,4 + 0,0167 \cdot x_1 + 0,083 \cdot x_1^2 - 0,23 \cdot x_2 + 0,03 \cdot x_2^2 + 0,767 \cdot x_3 - 0,083 \cdot x_3^2 + 0,0167 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Значения факторов варьирования представлены в табл. 2.

Установлено, что применение металлической пластины повышает температуру в угловых сопряжениях кирпичной кладки и увеличивает ее среднее значение с 7,0 до 9,4°C. Анализ математической модели по величине значимых постоянных коэффициентов позволяет констатировать, что наибольшее значение на повышение температуры оказывает ширина пластины. Некоторому повышению температуры способствует и увеличение ее толщины, а заделка алюминиевой пластины в материал ограждения нецелесообразна, так как это приводит к существенному снижению выходного параметра. На рис. 1, а представлен график зависимости температуры в угловом стыке от толщины и глубины заделки алюминиевой пластинки, а на рис. 1, б — от ее ширины и толщины.

Хорошо видно, что максимального значения температуры можно достичь минимальной толщиной заделки (или ее отсутствием) и увеличением ее толщины. Однако увеличение толщины почти в 2 раза не приводит к заметному увеличению температуры и становится экономически нецелесообразным. Более рациональным с технической и экономической точки зрения является применение тонких и широких алюминиевых пластин.

На рис. 2 представлен график зависимости температуры от ширины пластины при ее толщине 0,06 мм. Нетрудно заметить, что увеличение ее ширины более 50 мм не приводит к существенному увеличению температуры в угловом стыке кирпичной кладки толщиной 640 мм.

Применение высокотеплопроводных алюминиевых пластин является эффективным средством улучшения температурно-влажностного режима наружных углов стен, угловых и рядовых стыков каменных строительных конструкций. Их толщина может составлять десятые доли миллиметра, а ширина не превышать 80 мм.

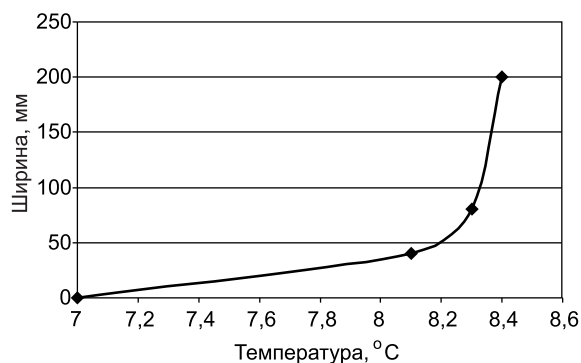


Рис. 2. Влияние ширины пластины на повышение температуры в угловом стыке кирпичной кладки 640 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1973. — 287 с.
2. Груздева Л. В. Влияние конструктивных факторов на температурно-влажностный режим узловых сопряжений деревянных домов / Л. В. Груздева, П. П. Щеглов, Ю. А. Матросов // Деревообрабатывающая промышленность. — 1983. — № 8.
3. Табунщиков Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. — М.: Стройиздат, 1986. — 380 с.

© Назиров Р. А., Соловьева О. В., Михеев Д. А., Пересыпкин Е. В., 2008

Получено 23.08.07

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Приводится вывод уравнений для расчета фрактальной размерности дисперсных и пористых материалов со случайной упаковкой элементов структуры (частиц или пор) в смесевых составах и в системах последовательного вложения (фильтрации).

К дискретным будем относить системы, в которых твердая, жидкая или газовая фаза дискретно распределена случайно (произвольно) или систематически (регулярно) в другой иной или одноименной фазе.

Есть объекты, которые обладают необычными геометрическими или топологическими свойствами — канторовой структурой, повторяющей себя на меньших масштабах. Во многих физических, технологических и других процессах, естественно созданных или искусственно создаваемых материалов и изделий, формирование структуры объекта складывается автомодельно по самоподобию в виде систем различного уровня последовательного вхождения и повторения ее в меньших масштабах. Выход на автомодельное решение означает уменьшение числа степеней свободы и выделение нескольких основных параметров, к которым подстраиваются все остальные. Есть некоторое предельное количество структур, больше которого получить в данной среде невозможно, чем те, которые согласуются с ее внутренними свойствами. Такие системы в отличие от евклидовой размерности имеют дробную — фрактальную размерность и называются фрактальными. К числу таких систем относятся искусственно подбираемые составы заполнителя и наполнителя с прерывной или прерывистой гранулометрией для получения композитов специального назначения: бетонов, асфальто- и полимербетонов, порошковых металлических пресс-композитов и сплавов, металлокомпозитов, электропроводных и самосмазывающихся материалов и др. Прежде всего к фрактальной относятся зерновые составы фильтрационной упаковки и композиты с их использованием, а также поризованные материалы, если подбор их фракций по размеру частиц или пор в процессе поризации вести по определенному закону автомодельного самоподобия. Высоконаполненные композиты получают путем формования изделий в формах. Полость формы сначала заполняют крупной фракцией заполнителя, а затем последующие мелкие фракции профильтровывают вибрацией в свободный объем через просветы между зернами крупной фракции с последующей пневмовакуумной или свободной пропиткой заполнителя жидкой фазой — основой. Такие составы последовательного вложения без раздвижки зерен (частиц) обладают фрактальностью.

Распределение частиц по средним размерам во фрактальных составах фильтрационной упаковки, как и в смесях высокоплотных составов, а также пор в поризованных материалах можно описать общей закономерностью случайного их распределения, систематизированных по классам прерывности для выполнения принципа автомодельного самоподобия:

$$d_n / d_1(z) = [1 / 10\eta_1 (\sqrt{3} - 1)^p]^{mn/3} = (0,2549 / \eta_1)^{mn/3},$$

где $p = 0-15$: для трехмерного пространства $p = 3$;

d_n — размер n -й фракции;

d_1 — размер максимальной фракции;

n — номер очередной фракции либо размера пор в поризованном материале;

m — класс системы распределения зерен либо пор по размерам, определяющий прерывистость их гранулометрии, при этом $m = 1 \div 12$: для фрактальных составов последовательного положения $m = 6 \div 12$;

η_1 — плотность упаковки монодисперсных идентичных пор, различают максимальную (теоретическую) $\eta_1 = 1/(\sqrt{3}-1)^6 = 0,64976$; плотную топологическую (наибольшую) — $\eta_1 = 0,64029$, среднюю — $\eta_1 = 0,63716$, наименьшую — $\eta_1 = 0,63405$ и рыхлую — $\eta_1 = 0,60377$.

Полиморфная форма распределения для полидисперсных сфер в трехмерном пространстве при $\eta_1 = 0,64976$ имеет вид $d_n/d_1 = (\sqrt{3}-1)^m$.

Покажем, что фрактальная размерность D каждой системы класса m распределения пор в поризованном теле при $n \gg 1$ стремится к величине $D = 2$. Фрактальную размерность вычислим по формуле Хаусдорфа–Безиковича: $D = \ln N / \ln(1/A_i)$, что идентично $D = \ln P / \ln(1/z)$, где P — часть крупных пор, приходящихся на один порядок автомодельного самоподобия в их размещении; $1/P = z^D$, где z — отношение геометрических размеров или объемов двух смежных по размеру пор в системе класса m ; N — число элементов, на которое делится первоначальный (единичный объем) тела; A_i — размер единичного элемента: $N = (1/A_i)^D$.

Из отношения размеров двух смежных частиц или пор получим:

$$\begin{aligned} z &= d_n / d_{n-1} = [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^{-m/3}; \\ P &= (d_n / d_{n-1})(1/z^3) = [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^{-m/3} \cdot [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^m = \\ &= [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^{2m/3}; \\ D &= \ln P / \ln(1/z) = \ln \{ [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^{2m/3} \} / \ln \{ [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3]^{m/3} \} = \\ &= \left\{ \frac{2}{3} \cdot m \ln [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3] \right\} / \left\{ \frac{1}{3} \cdot m \ln [10 \cdot \eta_1 (\sqrt{3}-1)^3] \right\} = 2. \end{aligned}$$

Найдем выражение для фрактальной размерности дисперсных (зернистых) материалов и поризуемых масс в системах последовательного вложения, где плотность упаковки элементов структуры (частиц или пор) определяется выражением вида:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} + (1 - \sigma_{n-1}) \cdot \psi^{(m)} = 1 - \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_{n-1} \cdot \psi^{(m)} = 1 - \varepsilon_{n-1} \cdot (1 - \psi^{(m)}).$$

Для заданного числа фракций n распределения сферических частиц либо пор по размерам класса m при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots \varepsilon_i$, а $\eta_1 = 1 - \varepsilon_1 = \text{const}$ получим

$$\sigma_n = 1 - \varepsilon_1 \cdot (1 - \psi^{(m)})^n \quad \text{и} \quad P = 1 - \varepsilon_1 \cdot (1 - \psi^{(m)})^n,$$

где σ_n и P — плотность упаковки частиц и пористость поризованной массы; ε_1 — объемная доля твердой монолитной поризуемой массы, $\varepsilon_1 = 1 - P_1$, P_1 — ее исходная пористость, $P_1 \geq 0$;

ε_1 — пустотность исходной крупной фракции зернистого материала, подлежащей заполнению в ней пустот вложением частиц последовательно меньшего размера. Для исходных масс и систем последовательного вложения при $\varepsilon_1 = 1$ и $P_1 = 0$ выполняются равенства:

$$1 - \sigma_n = \varepsilon_1 (1 - \psi^{(m)})^n \quad \text{и} \quad 1 - P = (1 - \psi^{(m)})^n.$$

Выражения для $\psi^{(m)}$ приведены ниже в табл. 2. Приращение плотности упаковки частиц и пористости поризуемой массы — параметра струк-

туры для каждого класса систем их распределения по размерам будут равны:

$$\Delta\sigma = \varepsilon_1(1 - \psi^{(m)})^n \quad \text{и} \quad \Delta\Pi = (1 - \psi^{(m)})^n.$$

Так как $P = \Delta\sigma_n / (\Delta\sigma_{n-1} \cdot z^3)$ и $P = \Delta\Pi_n / (\Delta\Pi_{n-1} \cdot z^3)$, то

$$P = \frac{\varepsilon_1 \cdot (1 - \psi^{(m)})^n}{\varepsilon_1 \cdot (1 - \psi^{(m)})^{n-1}} \cdot \frac{1}{z^3} = (1 - \psi^{(m)}) \cdot [10\eta_1 \cdot (\sqrt{3} - 1)^3]^m;$$

$$D = \frac{\ln \{(1 - \psi^{(m)})[10\eta_1 \cdot (\sqrt{3} - 1)^3]^m\}}{\ln \{10\eta_1 \cdot (\sqrt{3} - 1)^3\}^{m/3}}.$$

Из этого выражения получим

$$D = 3 \left\{ 1 + \frac{\ln(1 - \psi^{(m)})}{m \cdot \ln[10\eta_1 \cdot (\sqrt{3} - 1)^3]} \right\}. \quad (1)$$

Для заданного числа фракций n элементов структуры в системе последовательного их вложения выражение (1) можно записать в виде

$$D = 3 \cdot \left[1 + \frac{n \ln(1 - \psi^{(m)})}{m \cdot \ln(3,923\eta_1)} \right]. \quad (2)$$

Переходя к общей плотности упаковки частиц σ_n полидисперсной смеси и пористости Π поризованного тела для широкого интервала значений $0 \leq \varepsilon_1 \leq 1$, уравнение (2) можно записать в виде

$$D = 3 \cdot \left[1 + \frac{\ln \sigma_n}{m \cdot \ln(3,923\eta_1)} \right]; \quad (3)$$

$$D = 3 \cdot \left[1 + \frac{\ln(1 - \Pi)}{m \cdot \ln(3,923\eta_1)} \right], \quad (4)$$

где η_1 — плотность упаковки частиц, либо объемная доля пор в поризованном теле превалирующего среднего размера, $0,4098 < \eta_1 \leq 0,64976$; для зернистых, дисперсных и тонкодисперсных материалов $0,545 \leq \eta_1 \leq 0,65$; $0,45 \leq \eta_1 \leq 0,545$; $0,4098 \leq \eta_1 \leq 0,45$; для ячеистых бетонов и наполненных композитов $0,4098 \leq \eta_1 \leq 0,507$; $0,507 \leq \eta_1 \leq 0,545$. В тяжелых бетонах плотность упаковки наиболее крупных зерен обычно находится в пределах $0,45 \leq \eta_1 \leq 0,55$, где $\eta_{1\text{ ср}} = 0,5$, расчетное значение $\eta_{1\text{ ср}} = 0,505$. Так как числитель в выражениях (1–4) имеет отрицательное значение (знак минус), а знаменатель больше нуля, то $D \leq 3$. Выражения (3) и (4) идентичны выражению (2) по получаемым результатам в системах последовательного вложения. В полученных выше выражениях показатель $1/m \cdot \ln(3,923\eta_1)$ учитывает влияние плотности упаковки исходных элементов структуры и класс m систем распределения в трехмерном топологическом пространстве, образуемого гравитационным полем земного притяжения. В условиях равновесия электростатических сил отталкивания монодисперсных частиц и гравитационного их уплотнения в слое $\eta_c \leq 1/10(\sqrt{3} - 1)^3 \leq 0,2549$, а при отсутствии гравитационного уплотнения частиц из отношения собственного объема одной частицы к полному недоступному объему диаметром, равным двум диаметрам контактируемых частиц, $\eta_c = 1/4 = 0,25$. Из равенства выражений $g/10(\sqrt{3} - 1)^3 = c/4$ при $c = 10 \text{ м/с}^2$ — показатель размерности, полу-

чим усредненное значение по всей поверхности шара ускорения свободного падения тел $g = 9,8076 \text{ м/с}^2$. Из равенства выражений вида $10(\sqrt{3}-1)^3 = 4c_1^{1/n}$, где $n = 0 \div 3$, получим коэффициенты взаимодействия $C_1 = 0,980762; 0,961894; 0,9433385$, а $1/C_1 = 1,06; 1,04; 1,02$. Коэффициенты C_1 входят в расчетные формулы плотности некоторых эвтектических сплавов, а величины $1/C_1$ являются оптимальными коэффициентами разъединения частиц в высокоплотных полидисперсных составах.

В частном случае ($m = 12$) выражения для фрактальной размерности монодисперсного слоя в контейнере, а также для полидисперсных составов и поризованных материалов, как, например, пено- и газобетонов, где явно выделяются крупные поры, а в межпоровых перегородках микропоры с классом их распределения $m = 12$, имеют вид:

$$D = 3[1 + 0,089 \ln \sigma_n]; \quad (5)$$

$$D = 3[1 + 0,09 \ln(1 - P)]. \quad (6)$$

Коэффициенты 0,089 и 0,09 получают при подстановке в знаменатель уравнений (3; 4) $m = 12 = \text{const}$, так как с уменьшением размера мелких частиц класса $m = 12$ плотность их упаковки в пустотах между крупными не зависит от класса и размера и равна плотности случайной их упаковки либо плотности регулярной укладки в контейнере с большой вместимостью: $1/(12 \cdot 0,9357) = 0,089$, а также при $\eta_1 = 0,64976$ — для слабозаимодействующих и $\eta_1 \leq 0,64029$ — для невзаимодействующих элементов структуры материалов. Выражения (5) и (6) можно записать в общем виде:

$$D = D_e \cdot \left[1 + \frac{\ln(1 - \Phi_c)}{m \cdot \ln(3,923\eta_1)} \right], \quad (7)$$

где D_e — размерность евклидова пространства;
 Φ_c — топологический параметр структуры — общая объемная доля элементов структуры (пустот либо пор) дисперсных или пористых материалов, а также атомов или ионов в зародышеобразующихся микро- или макрочастицах сферической формы;

η_1 — наибольшая потенциально возможная плотность упаковки монодисперсных элементов структуры: для случайной (произвольной) упаковки невзаимодействующих элементов $\eta_1 \leq 0,6403$, для систематических (регулярных) упаковок взаимодействующих элементов структуры (атомов или ионов) $0,64976 \leq \eta_1 \leq 0,7405$.

Результаты расчета D (7) при $\eta_1 = 0,64976$, $m = 12$ и $0,1 \leq \Phi_c \leq 1$ для пористых материалов приведены в табл. 1. С уменьшением пористости поризованного тела, его фрактальная размерность повышается, а с увеличением она стремится к величине $D = 2$ и находится в пределах $2 \leq D \leq 3$. Результаты расчета по формуле (7) или (5, 6) хорошо отражают общую

Таблица 1

Фрактальная размерность пористых материалов

Пористость, объемная доля										
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9764	0,9964
Фрактальная размерность										
1,98*	1,96*	1,94*	1,91*	1,88*	1,83*	1,79*	1,71*	1,59*	1,5*	≈1*
2,97**	2,94**	2,9**	2,86**	2,81**	2,76**	2,68**	2,57**	2,38**	2**	—

* При $D_e = 2$; ** при $D_e = 3$.

закономерность изменения фрактальной размерности с изменением пористости либо пустотности соответственно пористых и дисперсных материалов.

Допустим, что знаменатель выражения (7) не зависит от η_1 ($\eta_1 = 0,64976 - \text{const}$), тогда из выражения (5) при $m = 12$ и $\sigma_{\Pi} = 0,4098...0,59497$, где $\sigma_{\Pi} = (0,640289/0,64976) \cdot 0,640289 = 0,59497$, получим $D = 2,7579...2,7587$. Допуская эту зависимость из выражения (7) при $m = 12$, $\eta_1 = 0,7405$ — наиплотнейшая плотность укладки атомов и $\Phi_c = 0,6400-0,6403$ — наибольшая плотность случайной упаковки не взаимодействующих элементов структуры, получим $D = 2,7605...2,7603$. Величиной фрактальной размерности $D = 2,76$ характеризуются структуры зародышеобразования, например, при возникновении кристаллитов в металлах и глобул в полимерах. Тогда как при $\Phi_c \geq 0,64976$ — для слабо взаимодействующих элементов структуры со случайной упаковкой из выражения (7) получим $D = 2,754$. Эти расчеты указывают на то, что в условиях перегрева (выше температуры кристаллизации) флуктуации плотности кристаллизующихся веществ являются центрами образования сферических наночастиц со случайной упаковкой атомов до определенного критического размера — порога сферичности. Быстрое охлаждение системы приводит к сохранению сферичности и дальнейшему росту наночастиц до размера микро- и макросферических образований, что имеет место в природе минералов и горных пород. Таким образом, выражение (7) можно использовать для описания различных процессов образования структур топологического беспорядка и регулярных структур (укладок), образуемых из не взаимодействующих ($0,4098 \leq \eta_1 \leq 0,64029$) и взаимодействующих ($0,64976 \leq \eta_1 \leq 0,7405$) их элементов при $0 \leq \Phi_c \leq 1$ и $0,64 \leq \eta_1 \leq 0,74$ соответственно.

Следует отметить, что согласно структурной топологии дискретных систем [3] отношение объемной доли мелких пор к крупным в ячеистых бетонах определяется в среднем как $0,4098/(1-0,4098)$ на дифференциальных и интегральных кривых (просеивания):

$$P_{кр} = 0,59[P - (\epsilon_{\Gamma} + \epsilon_{кт})], \quad P_{м} = 0,41P + 0,59(\epsilon_{\Gamma} + \epsilon_{кт}).$$

Некоторая доля их образуется в капиллярах в виде трубок Вентури, расположенных между гидратируемыми частицами цемента и новообразованиями:

$$P'_{кр} = \epsilon_{\kappa}(1 - \sqrt{0,1}) \quad \text{и} \quad P'_m = \sqrt{0,1}\epsilon_{\kappa},$$

где P , $P_{кр}$, $P'_{кр}$, P_m , P'_m — соответственно общая пористость, объемная доля крупных и мелких пор в поризованных композитах, образуемых в процессе воздухововлечения;

ϵ_{Γ} , $\epsilon_{кт}$, ϵ_{κ} — соответственно гелевая, контракционная и капиллярная пористость;

$\sqrt{0,1} = 0,31623$, $(1 - \sqrt{0,1}) = 0,68377$ — элементы золотого топологического сечения (отношение объемов смежных фаз в искусственных композитах, в технологических процессах и пр.).

Так, при $P = 0,93$ и $B/C = 2$ согласно [3] $\epsilon_{\Gamma} = 0,0845$, $\epsilon_{кт} = 0,036$ и $\epsilon_{\kappa} = 0,668$. Из приведенных выше равенств получим: $P_{кр} = 0,478$, $P_m = 0,332$, а суммарная доля микропор $P_{мп} = P_m + \epsilon_{\Gamma} + \epsilon_{кт} = 0,3320 + 0,084 + 0,036 = 0,452$. Тогда как $P'_{кр} = 0,668 \cdot 0,68377 = 0,4568$, $P'_m = 0,668 \cdot 0,31623 = 0,2113$ — объемная доля капиллярных пор, пронизывающих крупные поры. При $P = 0,81138$ и $B/C = 1$ $\epsilon_{\Gamma} = 0,1485$, $\epsilon_{кт} = 0,06288$, $\epsilon_{\kappa} = 0,4167$, а $P_{кр} = 0,354$, $P_m = 0,246$, $P'_{кр} = 0,2849$, $P'_m = 0,13176$, $P_{мп} = 0,246 + 0,21138 = 0,4574$. Остаточная капиллярная пористость в первом примере

$\epsilon'_k = 0,668 - 0,4768 = 0,2112$, во втором $\epsilon'_k = 0,4167 - 0,2849 = 0,1318$. Равенство крупных пор и микропор $P_{кр} = P_m$ наступает при $\epsilon_r + \epsilon_{кт} = P / 6,54$. При $P = 0,93$ $\epsilon_r + \epsilon_{кт} = 0,142$, а при $P = 0,8$ $\epsilon_r + \epsilon_{кт} = 0,122$, что соответствует высоким значениям водоцементного отношения (В/Ц).

Ниже в табл. 2 приведены результаты расчета показателя $1/m \cdot \ln(3,923\eta_1)$ и фрактальной размерности в зависимости от плотности упаковки исходных элементов структуры η_1 и класса m распределения последующих мелких элементов в остающихся пустотах в системах последовательного вложения и полидисперсных смесях.

Таблица 2

Изменение показателя $1/m \cdot \ln(3,923\eta_1)$ и фрактальной размерности в системах

Класс системы, m	Плотность упаковки, η_1							
	0,410	0,450	0,507	0,545	0,595	0,604	0,6403	0,6498
3, $\psi^{(3)} = \epsilon_i^2 \eta_i$	<u>0,702</u> 1,889 2,676	<u>0,586</u> 1,948 2,743	<u>0,485</u> 1,971 2,809	<u>0,439</u> 1,964 2,842	<u>0,393</u> 1,934 2,879	<u>0,387</u> 1,926 2,885	<u>0,362</u> 1,89 2,906	<u>0,356</u> 1,879 2,911
6, $\psi^{(6)} = \epsilon_i \eta_i$	<u>0,351</u> 2,440 2,708	<u>0,293</u> 2,474 2,750	<u>0,242</u> 2,486 2,791	<u>0,219</u> 2,482 2,813	<u>0,197</u> 2,467 2,837	<u>0,193</u> 2,463 2,841	<u>0,181</u> 2,445 2,858	<u>0,178</u> 2,439 2,862
9, $\psi^{(9)} = \eta_i^{2i}$	<u>0,234</u> 2,630 2,871	<u>0,195</u> 2,649 2,867	<u>0,162</u> 2,657 2,856	<u>0,147</u> 2,655 2,845	<u>0,131</u> 2,645 2,828	<u>0,129</u> 2,642 2,825	<u>0,121</u> 2,630 2,809	<u>0,119</u> 2,626 2,805
12, $\psi^{(12)} = \eta_i$	<u>0,176</u> 2,722 2,722	<u>0,147</u> 2,737 2,737	<u>0,121</u> 2,743 2,743	<u>0,110</u> 2,741 2,741	<u>0,098</u> 2,733 2,733	<u>0,097</u> 2,732 2,732	<u>0,090</u> 2,722 2,722	<u>0,089</u> 2,720 2,720

Примечание. Над чертой приведены результаты для указанного выше показателя, под чертой — фрактальная размерность случайной упаковки частиц либо пор (5; 6), а ниже — для систем последовательного вложения (1).

Из табл. 2 видно, что приведенный выше показатель уменьшается, а фрактальная размерность случайной упаковки элементов структуры повышается с увеличением класса системы и плотности их упаковки и достигает максимума при $\eta = 0,507$ для класса $m = 9$. Фрактальная размерность систем последовательного вложения повышается с увеличением плотности упаковки элементов структуры для систем класса $m = 3...6$ и уменьшается для систем класса $m = 9$. Оба способа упаковки элементов структуры имеют одинаковую фрактальную размерность при данном значении η_1 класса $m = 12$, которая достигает максимума $D = 2,743$ при $\eta_1 = 0,507$. Наибольшую фрактальную размерность имеют системы последовательного вложения при $m = 9$. Следовательно, наибольший эффект упаковки при меньшем числе фракций достигается в системах последовательного вложения (фильтрации) класса $6 < m < 9$, а для смесевых систем класса $m = 12$.

Таким образом, развитие такой идеи синергетики для автомодельных систем самоподобия приближает возможность компьютерного моделирования технологических процессов и регулирования свойств строительных композитов заданного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хархардин А. Н. Способы получения высокоплотных составов зернистого сырья/А. Н. Хархардин//Изв. вузов. Строительство.— 1996.— № 10.— С. 56–60.
2. Бобрышев А. Н. Синергетика композитных материалов/А. Н. Бобрышев, В. Н. Козомазов, Л. О. Бабин и др.— Липецк: ОРИУС, 1994.— 153 с.
3. Хархардин А. Н. Структурная топология пенобетона/А. Н. Хархардин//Изв. вузов. Строительство.— 2005.— № 2.— С. 18–25.

© Хархардин А. Н., 2008

Получено 19.02.08

ПОНИЖЕНИЕ ПОРЯДКА СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРОНЕКЕРОВСКОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ МАТРИЦ В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ СИЛ В МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЯХ РЕГУЛЯРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Исследуется деформированное состояние многоэтажного здания, нагруженного в поперечном направлении горизонтальными статическими и (или) динамическими нагрузками, с целью определения характера пространственной работы сил между стенами и перекрытиями. В основу исследования положен метод перемещений с наложением горизонтальных связей на все расчетные точки (РТ), за которые приняты пересечения стен и перекрытий (и точки на перекрытиях между стенами).

Поскольку из-за низкой крутильной (в плоскости перекрытий) жесткости стен, их соединение с перекрытиями можно рассматривать как шарнирное, при единичном смещении k -, i -й РТ деформации подвергаются только k -е перекрытие и i -я стена [1]. Это позволяет свести определение коэффициентов матрицы жесткости к расчету плоских конструкций — стены и перекрытия (рис. 1). При деформационном расчете для решения задачи допустимо воспользоваться уравнениями, учитывающими изгиб и сдвиг стен и перекрытий в своей плоскости. Эта хорошо разработанная методика оказывается эффективной при построении матриц жесткости и используется в проектной и учебной практике ([2], с. 261, 274, рис. V. 15; [3]).

Для иллюстрации методики рассмотрим двухэтажное двухпролетное каркасное здание с однопролетными рамами с жесткими ригелями. В принятой конструкции легко определяются коэффициенты матрицы жесткости (МЖ) [1], благодаря чему нет необходимости уделять много внимания второстепенным вопросам. Однако предложенная методика содержит ряд допущений, поэтому принятая расчетная схема должна быть обоснована. Таким обоснованием может служить статический и динамический расчеты здания, выполненные МКЭ на вычислительном комплексе MSC/NASTRAN с оболочкой Femap. Как показали численные исследования аналогичного здания при его горизонтальном нагружении, при большом шаге рам, вначале принятых в расчете, наблюдается депла-

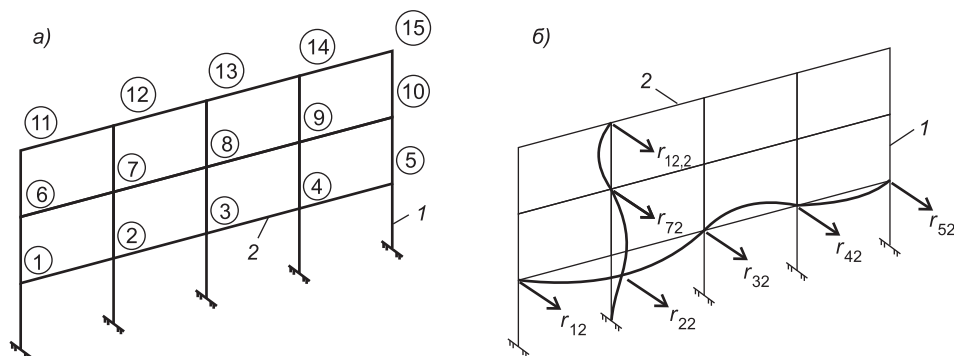


Рис. 1. Расчетная схема многоэтажного здания регулярной конструкции
а — нумерация расчетных точек; б — единичные реакции; 1 — осяевая линия стены; 2 — перекрытия

нация перекрытий, вызывающая снижение их горизонтальной жесткости, дополнительный изгиб колонн и стен. Однако при шаге продольных и поперечных рядов колонн с ригелями или поперечных и продольных стен, равном 6 м, деформация существенно снижается и деформация перекрытия в своей плоскости с использованием балочного или плоского приближений оказывается близкой к определенной МКЭ или по данным эксперимента [4]. Это позволяет в правильно конструктивно организованном здании рассматривать перекрытия как балки-стенки, испытывающие в их плоскости деформацию изгиба и сдвига (балочное приближение). Известно, что балочная модель дает более точные значения деформации, чем напряженного состояния, так как определение моментов и поперечных сил связано с вычислением производных, что приводит к дальнейшему снижению точности приближенных решений. Поэтому рассматриваемая методика для расчета сейсмических и ветровых нагрузок на здания, связанного с решением деформационных задач, оказывается эффективной.

Имеем для рамы: h — высота этажей, $h = 4$ м; a — сторона квадратного сечения колонны, $a = 0,4$ м; J_k — момент инерции колонны, $J_k = a^4 / 12 = 0,4^4 / 12 = 0,0021(3)$ м⁴; E — модуль упругости бетона, $E = 2 \cdot 10^{10}$ Н/м²; EJ_k — жесткость колонны при изгибе, $EJ_k = 4,2(6) \times 10^7$ Н/м²; M — масса, приведенная к узлу, $M = 6 \cdot 10^3$ кг. Матрица жесткости рамы такова: $r = d \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{pmatrix}$, $d = 24EJ_k / h^3$.

Имеем для перекрытия: b, c — размеры сечения плиты перекрытия, $b = 12$, $c = 0,2$ м; A_n, J_n — площадь и момент инерции поперечного сечения плиты перекрытия, $A_n = bc$, $J_n = cb^3 / 12$; G — модуль сдвига, $G = 0,35E$; EJ_n — изгибная жесткость перекрытия в его плоскости, $EJ_n = Ec b^3 / 12 = 5,76 \cdot 10^{11}$ Н·м²; GA_n — жесткость перекрытия при сдвиге, $GA_n = Gbc = 1,68 \cdot 10^{10}$ Н; L — общая длина перекрытия, $L = 24$ м. Для простоты и наглядности дальнейшего исследования по перекрытиям РТ располагаем только в местах пересечения с поперечными стенами. Матрица жесткости перекрытия такова:

$$p = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}, \quad s = \frac{12EJ_n}{L^3} \cdot \frac{1}{1 + 12EJ_n / GA_n L^2}.$$

Соединения перекрытий и стен между собой можно принять шарнирными. При этом матрица жесткости всей конструкции будет иметь следующий вид:

$$R = \begin{pmatrix} p_{1,1} + r_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & r_{1,2} & 0 & 0 \\ p_{2,1} & p_{2,2} + r_{1,1} & p_{2,3} & 0 & r_{1,2} & 0 \\ p_{3,1} & p_{3,1} & p_{3,3} + r_{1,1} & 0 & 0 & p_{1,2} \\ r_{2,1} & 0 & 0 & p_{1,1} + r_{2,2} & r_{1,2} & p_{1,3} \\ 0 & r_{2,1} & 0 & r_{2,1} & p_{2,2} + r_{2,2} & p_{2,3} \\ 0 & 0 & p_{2,1} & p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} + r_{2,2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Предложенная методика позволила существенно упростить составление матриц жесткости здания, сведя его к плоским элементам — поперечным стенам и перекрытиям, а затем, чтобы сделать ее эффективной и в основном расчете, необходимо уменьшить число разрешающих уравнений. Это удастся, например, для зданий, у которых выполняется условие

$X_k^i / X_r^i = \text{const}$, где X_k^i, X_r^i — смещения k -го и r -го этажей по i -й форме колебания, известное как условие подобия форм колебаний поперечных элементов [1, 5], позволяющее осуществить поэтажное расчленение здания. Недостатком метода расчленения, помимо ограниченности области его применения, является еще и необходимость использования различных подходов для построения функций $X^i(x)$ и для определения функций $V(y)$, описывающих деформацию перекрытий в своей плоскости. Этих недостатков можно избежать, если для решения задачи воспользоваться КП матриц. Оно, как и метод расчленения [1], переводит статическую систему уравнений порядка $n \times p$, с матрицей жесткости с числом членов $(n \times n) \times (p \times p)$, где n — число этажей; p — число поперечных стен, в матричное уравнение Лапунова с матрицами n -го и p -го порядка, но в отличие от работы [1] позволяет выполнить это в единой математической постановке (см. ниже). Естественное возникновение кронекеровского произведения матриц (КП) в рассматриваемой задаче строительной механики имеет положительные последствия. Применение кронекеровских операций позволяет существенно упростить вычислительный процесс и открыть новые закономерности в поведении конструкций. Приведем определение кронекеровских операций на примере матриц второго порядка.

Определение [6]. Кронекеровским произведением матриц $A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}$ и $B = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} \\ b_{2,1} & b_{2,2} \end{pmatrix}$ называется матрица

$$C = A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{1,1}B & a_{1,2}B \\ a_{2,1}B & a_{2,2}B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1}b_{1,1} & a_{1,1}b_{1,2} & a_{1,2}b_{1,1} & a_{1,2}b_{1,2} \\ a_{1,1}b_{2,1} & a_{1,1}b_{2,2} & a_{1,2}b_{2,1} & a_{1,2}b_{2,2} \\ a_{2,1}b_{1,1} & a_{2,1}b_{1,2} & a_{2,2}b_{1,1} & a_{2,2}b_{1,2} \\ a_{2,1}b_{2,1} & a_{2,1}b_{2,2} & a_{2,2}b_{2,1} & a_{2,2}b_{2,2} \end{pmatrix}.$$

Кронекеровская сумма матриц $A \otimes B$ определяется аналогично:

$$C = A \oplus B = \begin{pmatrix} a_{1,1} + B & a_{1,2} + B \\ a_{2,1} + B & a_{2,2} + B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} + b_{1,1} & a_{1,1} + b_{1,2} & a_{1,2} + b_{1,1} & a_{1,2} + b_{1,2} \\ a_{1,1} + b_{2,1} & a_{1,1} + b_{2,2} & a_{1,2} + b_{2,1} & a_{1,2} + b_{2,2} \\ a_{2,1} + b_{1,1} & a_{2,1} + b_{1,2} & a_{2,2} + b_{1,1} & a_{2,2} + b_{1,2} \\ a_{2,1} + b_{2,1} & a_{2,1} + b_{2,2} & a_{2,2} + b_{2,1} & a_{2,2} + b_{2,2} \end{pmatrix}.$$

Лемма. Собственные числа и матрица собственных векторов матрицы жесткости рамы r таковы:

$$\lambda = \frac{d}{2} \begin{pmatrix} 3 + \sqrt{5} \\ 3 - \sqrt{5} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} -1 - \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} \\ 2 & 2 \end{pmatrix}.$$

Лемма. Собственные числа и матрица собственных векторов матрицы перекрытия p таковы:

$$\mu = s \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Введем вспомогательные матрицы:

$$E2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad E3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Лемма. Матрицу жесткости всей конструкции R с помощью КП можно представить в следующем виде:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = E2 \otimes p + r \otimes E3.$$

Если узлы нумеровать не по строкам, а по столбцам, то матрица жесткости будет иметь вид $E3 \otimes r + p \otimes E3$.

Лемма [6]. Собственные числа (η) матрицы жесткости всей конструкции R есть кронекеровская сумма собственных чисел матриц жесткости рамы r и перекрытия p , т. е. $\eta = \lambda \oplus \mu$.

Лемма. Выбором шага расположения РТ вдоль перекрытия и соответственно величин приведенных масс можно получить равные узловые массы (M), то для этого случая частоты колебаний конструкций (γ) вычисляются по формуле $\gamma = \sqrt{\eta / M}$. Получим:

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 + \eta_1 \\ \lambda_1 + \eta_2 \\ \lambda_1 + \eta_3 \\ \lambda_2 + \eta_4 \\ \lambda_2 + \eta_5 \\ \lambda_2 + \eta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 6s \\ d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 0s \\ d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 0s \\ d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 6s \\ d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 0s \\ d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 0s \end{pmatrix}, \quad \gamma = \begin{pmatrix} \sqrt{d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 6s} \\ \sqrt{d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 0s} \\ \sqrt{d(3 + \sqrt{5}) / 2 + 0s} \\ \sqrt{d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 6s} \\ \sqrt{d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 0s} \\ \sqrt{d(3 - \sqrt{5}) / 2 + 0s} \end{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{M}} = \begin{pmatrix} 546,4 \\ 83,5 \\ 83,5 \\ 541,0 \\ 31,9 \\ 31,9 \end{pmatrix}.$$

Появившимся в решении двукратным частотам соответствуют двумерные инвариантные подпространства и определение собственных векторов становится неоднозначным. Выбрать их можно из условия ортогональности.

Лемма [6]. Матрица (Z) собственных векторов всей конструкции есть кронекеровское произведение матриц собственных векторов рамы и перекрытия, т. е. $Z = C \otimes S$, или в явном виде

$$Z = C \otimes S = \begin{pmatrix} -1 - \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} \\ 2 & 2 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -1 - \sqrt{5} & 1 + \sqrt{5} & -1 - \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} & 1 - \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} \\ 2 + 2\sqrt{5} & 0 & -1 - \sqrt{5} & 2 - 2\sqrt{5} & 0 & -1 + \sqrt{5} \\ -1 - \sqrt{5} & -1 - \sqrt{5} & -1 - \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} & -1 + \sqrt{5} \\ 2 & -2 & 2 & 2 & -2 & 2 \\ -4 & 0 & 2 & -4 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Итак, путем использования кронекеровского произведения матриц получены собственные числа и ортогональная система собственных векторов всего здания как пространственной системы через собственные числа и собственные векторы матриц жесткости рамы и перекрытия как плоских конструкций. В этом факте проявились специфические свойства самого здания [1, 5].

Теорема. Если матрица представима в виде $A = \sum_{j=1}^n A_j$ и матрицы A_j коммутируют, т.е. $A_j A_k = A_k A_j$, $j = 1 \dots n$, $k = 1 \dots n$, то собственные значения матрицы представимы в виде суммы собственных чисел составляющих матриц.

Теорема. Если матрица представима в виде $A = \prod_{j=1}^n A_j$ и матрицы A_j коммутируют, т.е. $A_j A_k = A_k A_j$, $j = 1 \dots n$, $k = 1 \dots n$, то собственные числа матрицы A представимы в виде произведения собственных чисел матриц сомножителей. Собственные векторы для матриц A_j являются общими. В нашем случае матрица $E2 \otimes p$ и матрица $r \otimes E3$ как раз коммутируют, что, согласно приведенным теоремам, и позволило вычислить собственные числа через кронекеровскую сумму. Размерность матриц $E2 \otimes p$, $r \otimes E3$ и матрицы жесткости всего здания равна произведению размерностей матриц p и r . Поэтому использование КП, позволившее описать все свойства здания через свойства двух матриц невысокого порядка p и r — матриц перекрытия и рамы, это не только существенное понижение порядка вычислительного процесса, но и важное физическое явление.

Формирование матриц узловых смещений X и нагрузок f производится по принципу приспособывания [7]: этаж конструкции — строчка матрицы (см. рис. 1, а). Эти матрицы имеют вид

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} \dot{f}_{1,1} & \dot{f}_{1,2} & \dot{f}_{1,3} \\ \dot{f}_{2,1} & \dot{f}_{2,2} & \dot{f}_{2,3} \end{pmatrix}.$$

Лемма. Уравнения статического равновесия в рассматриваемой постановке задачи есть не что иное, как фундаментальное уравнение Ляпунова. Оно имеет вид:

$$\begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{f}_{1,1} & \dot{f}_{2,1} \\ \dot{f}_{1,2} & \dot{f}_{2,2} \\ \dot{f}_{1,3} & \dot{f}_{2,3} \end{pmatrix} = pX^T + X^T r = f^T.$$

Уравнение Ляпунова является основным уравнением в теории устойчивости механических систем. Приведем одно из известных его решений.

Теорема [6]. Если матрица

$$X = \int_0^\infty e^{-rt} f e^{-pt} dt \quad (3)$$

существует для всех f , то она является единственным решением приведенного выше уравнения статического равновесия. Неожиданным может показаться представление решения матричного уравнения интегралом.

Лемма. Если все узловые массы M равны между собой, уравнение колебаний конструкции можно представить в форме

$$MX''(t)^T + pX(t)^T + X(t)^T r = f(t)^T,$$

или в явном виде:

$$\begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} \end{pmatrix}'' + \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{f}_{1,1} & \dot{f}_{2,1} \\ \dot{f}_{1,2} & \dot{f}_{2,2} \\ \dot{f}_{1,3} & \dot{f}_{2,3} \end{pmatrix}.$$

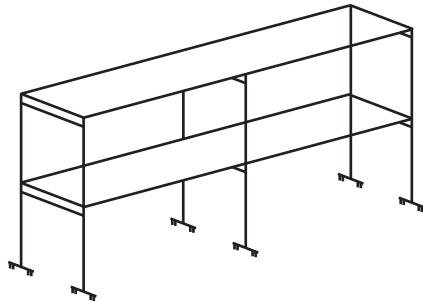


Рис. 2. Двухэтажное каркасное здание к численному примеру

Точное аналитическое решение этого динамического уравнения, представленное непосредственно через исходные матрицы — коэффициенты данного уравнения, в настоящее время получить не удалось.

Приведем пример динамического расчета двухэтажного здания (рис. 2), используя частоты колебаний, полученные при помощи КП. Пусть на здание действует гармоническая сила следующего вида $F(t) = (0 \ 10^6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \cos(\beta t)$.

Теорема. Решение классического уравнения колебания с нулевыми начальными данными будет иметь следующий вид:

$$U(t) = \frac{10^6 \sqrt{5}}{30M} \begin{pmatrix} \sqrt{5} + 1 & -(\sqrt{5} + 1) & \sqrt{5} - 1 & -(\sqrt{5} - 1) \\ -2(\sqrt{5} - 1) & -(\sqrt{5} + 1) & -2(\sqrt{5} - 1) & -(\sqrt{5} - 1) \\ \sqrt{5} + 1 & -(\sqrt{5} + 1) & \sqrt{5} - 1 & -(\sqrt{5} - 1) \\ -2 & 2 & 2 & -2 \\ 4 & 2 & -4 & -2 \\ -2 & 2 & 2 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\cos \beta t - \cos \gamma_1 t}{\beta^2 - \gamma_1^2} \\ \frac{\cos \beta t - \cos \gamma_3 t}{\beta^2 - \gamma_3^2} \\ \frac{\cos \beta t - \cos \gamma_4 t}{\beta^2 - \gamma_4^2} \\ \frac{\cos \beta t - \cos \gamma_6 t}{\beta^2 - \gamma_6^2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где γ — частоты собственных колебаний.

То, что в решении системы уравнений (5) 6-го порядка присутствуют только четыре формы колебания, объясняется тем, что горизонтальная динамическая нагрузка приложена в той точке, которая по двум формам колебания не смещается (смотри 2-й и 5-й столбцы в матрице (2), содержащие нули во втором и пятом узлах). В этой ситуации колебания указанных узлов по этим формам невозможны и математика сама дает сигнал об этом, заставляя соответствующие решения.

Покажем применение уравнения Лапунова для статического расчета на примере трехэтажного здания. Матрица жесткости (МЖ) поперечной стены — рамы с жесткими ригелями для трехэтажного здания такова:

$$r = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{pmatrix} = d \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

МЖ для перекрытия p остается неизменной.

Лемма. Характеристический многочлен матрицы жесткости перекрытия p равен:

$$P(\beta) = 6\beta^2 s - \beta^3.$$

Лемма. Уравнение Лапунова $pX^T + X^T r = f^T$ имеет следующие свойства:

$$p^2 X^T + X^T r^2 = p f^T - f^T r, \quad p^3 X^T + X^T r^3 = p^2 f^T - p f^T r + f^T r^2.$$

Умножив полученную систему на коэффициенты характеристического многочлена и сложив их все, получим алгебраический вариант решения уравнения Лапунова.

Лемма. Уравнение Лапунова $pX^T + X^T r = f^T$ имеет следующее решение:

$$X^T = \left(\frac{s}{d} (6E_3 - p) f^T + f^T r \right) (6sr + r^2 d)^{-1}.$$

Подставив матрицы, получим формулу для определения узловых смещений:

$$X^T = \left(\frac{s}{d} \begin{pmatrix} 5 & 2 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & 2 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{f}_{1,1} & \hat{f}_{1,2} & \hat{f}_{1,3} \\ \hat{f}_{2,1} & \hat{f}_{2,2} & \hat{f}_{2,3} \\ \hat{f}_{3,1} & \hat{f}_{3,2} & \hat{f}_{3,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{f}_{1,1} & \hat{f}_{2,1} & \hat{f}_{3,1} \\ \hat{f}_{2,1} & \hat{f}_{2,2} & \hat{f}_{3,2} \\ \hat{f}_{1,3} & \hat{f}_{2,3} & \hat{f}_{3,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \right) \times \\ \times \left(6s \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} 5 & -4 & 1 \\ -4 & 6 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{pmatrix} \right)^{-1}.$$

Уравнение Лапунова позволило получить точное аналитическое решение статической задачи в компактной форме, что делает рациональным его использование для качественного анализа свойств конструкции. Покажем на примере, что результаты классического решения и решения статического уравнения в форме Лапунова совпадают. Пусть узловые нагрузки в виде матрицы таковы: $\hat{f} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$. Н. Сформируем из нее под тем же

именем вектор строку узловых нагрузок $\hat{f} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$. Матрица жесткости будет иметь вид

$$R = \begin{pmatrix} p_{1,1} + r_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & r_{1,2} & 0 & 0 & r_{1,3} & 0 & 0 \\ p_{2,1} & p_{2,2} + r_{1,1} & p_{2,3} & 0 & r_{1,2} & 0 & 0 & r_{1,3} & 0 \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} + r_{1,1} & 0 & 0 & r_{1,2} & 0 & 0 & r_{1,3} \\ r_{2,1} & 0 & 0 & p_{1,1} + r_{2,2} & p_{1,2} & p_{1,3} & r_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & r_{2,1} & 0 & p_{2,1} & p_{2,2} + r_{2,2} & p_{2,3} & 0 & r_{2,3} & 0 \\ 0 & 0 & r_{2,1} & p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} + r_{2,2} & 0 & 0 & p_{2,3} \\ r_{1,2} & 0 & 0 & r_{3,2} & 0 & 0 & p_{1,1} + r_{3,3} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ 0 & r_{1,2} & 0 & 0 & r_{2,3} & 0 & p_{2,1} & p_{2,2} + r_{3,3} & p_{2,3} \\ 0 & 0 & r_{1,2} & 0 & 0 & r_{3,2} & p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} + r_{3,3} \end{pmatrix}.$$

Численно она равна:

$$R = 10^8 \begin{pmatrix} 3,2 & -5,8 & 2,9 & -0,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5,8 & 1,2 & -5,8 & 0 & -0,16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2,9 & -5,8 & 3,2 & 0 & 0 & -0,16 & 0 & 0 & 0 \\ -0,16 & 0 & 0 & 3,2 & -5,8 & 2,9 & -0,16 & 0 & 0 \\ 0 & -0,16 & 0 & -5,8 & 1,2 & -5,8 & 0 & -0,16 & 0 \\ 0 & 0 & -0,16 & 2,9 & -5,8 & 3,2 & 0 & 0 & -0,16 \\ 0 & 0 & 0 & -0,16 & 0 & 0 & 3,2 & -5,8 & 2,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,16 & 0 & -5,8 & 1,2 & -5,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,16 & 2,9 & -5,8 & 3,2 \end{pmatrix}, \text{ Н/м.}$$

Вектор смещений, вычисленный обычным численным способом, равен

$$X = (x_{1,1} \ x_{1,2} \ x_{1,3} \ x_{2,1} \ x_{2,2} \ x_{2,3} \ x_{3,1} \ x_{3,2} \ x_{3,3})^T = (R^{-1}f)^T = \\ = (0,02083 \ 0,02083 \ 0,02083 \ 0,04147 \ 0,04204 \ 0,04147 \ 0,04166 \ 0,04167 \ 0,04166) \text{ м.}$$

Смещения, вычисленные путем численного решения уравнения Ляпунова, таковы:

$$X = \begin{pmatrix} 0,02083 & 0,02083 & 0,02083 \\ 0,04147 & 0,04204 & 0,04147 \\ 0,04166 & 0,04167 & 0,04166 \end{pmatrix} \text{ м.}$$

Полное совпадение результатов при построчном раз-

ворачивании матрицы в вектор, а также симметрия смещений при симметричном нагружении свидетельствуют о правильности вычислений. Решение уравнения Ляпунова (см.

4) по формуле Беллмана [6] $X = \int_0^{\infty} e^{-rt} f e^{-pt} dt$ дает те же значения.

Матричные экспоненты, быстро затухающие, были вычислены путем диагонализации матриц. Полученные решения допускают раздельное определение сил, действующих на поперечные стены и на каждое перекрытие. Для этого достаточно умножить их матрицы жесткости на смещения соответствующих расчетных узлов. Отметим, что кронекеровские операции можно применять только тогда, когда параллельные элементы перекрытия и поперечные стены идентичны, а узловые массы равны. Предложенное решение позволяет завершить методику анализа пространственной работы сил в зданиях с регулярной перекрестной системой, выполняемого методом расчленения, позволяя выстроить иерархию методов пространственных расчетов зданий и расширить математическую базу строительной механики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников А. И. Метод расчленения — эффективное средство статического и динамического расчета рамно-связевых пространственных систем / А. И. Сапожников // Изв. вузов. Строительство. — 1995. — № 7–8. — С. 125–129.
2. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий / С. В. Поляков. — М.: Высш. шк., 1983. — 304 с.
3. Сапожников А. И. Рекомендации по расчету многоэтажных зданий как единых пространственных систем на горизонтальные сейсмические и ветровые, с учетом пульсаций, воздействия и на устойчивость / А. И. Сапожников, В. В. Гаскин. — Иркутск: НТО стройиндустрии, 1977. — 122 с.
4. Сапожников А. И. Численный анализ деформирования каркасных зданий как трехмерных моделей / А. И. Сапожников, А. И. Мишичев // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 7. — С. 108–115.
5. Егупов В. К. Расчет зданий на прочность, устойчивость и колебания / В. К. Егупов. — Киев: Будівельник, 1965. — 256 с.
6. Беллман Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман. — М.: Наука, 1969. — 367 с.

7. Сапожников А. И. Исследование сейсмостойкости сооружений с учетом их пространственных особенностей / А. И. Сапожников // Сб. матер. II национального конгресса по теорет. и прикл. механике Болгарской АН. — Варна: Болг. АН, 1973. — С. 170–171.

© Сапожников А. И., Яксубаев К. Д., 2008

Получено после доработки 16.04.08

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 625.745.2.

С. А. БОКАРЕВ, д-р техн. наук, проф., **С. А. ПРОСЕКОВ**, асп. (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск);
А. С. ПОТАПОВ, канд. техн. наук (ЗАО «Сибирский научно-исследовательский институт транспортного строительства», г. Новосибирск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТРУБ НА МОДЕЛЯХ

Отражены результаты экспериментальных исследований на моделях вертикального давления грунта засыпки на комбинированные дорожные водопропускные трубы, состоящие из жесткой лотковой части из железобетона и гибкого полуциркульного свода из гофрированного металла.

В практике дорожного строительства все чаще находят применение конструкции водопропускных труб с использованием гофрированного металла. Большей частью это металлические гофрированные трубы замкнутого поперечного сечения (МГТ), прежде всего, круглые. Известны также трубы, в которых нижняя лотковая часть выполняется жесткой из бетона или железобетона, а верхняя гибкой в виде свода из гофрированного металла. В дальнейшем будем называть их комбинированными трубами (КТ).

При проектировании труб надо знать вертикальное давление p грунта засыпки на них. По СНиП 2.05.03-84* [1] значение его принимают равным

$$p = C \cdot h, \quad (1)$$

где C — коэффициент вертикального давления;

— объемный вес грунта; h — высота засыпки над трубой.

В Приложении 4* [1] для жестких труб, например, из бетона или железобетона приведена методика определения C по формулам (1) и (2), согласно им $C \geq 1$; для гибких труб, какими являются МГТ, принято $C = 1$. Для комбинированных труб вопрос о величине C остается открытым.

Цель исследований — выявление особенностей работы в грунтовой среде гибкого свода КТ в сравнении с работой гибких круглых МГТ. При этом ставились задачи исследовать характер и величину деформаций свода КТ и вертикального давления засыпки на него при свободном опирании пят на опору с уступом (тип 1 — двухшарнирная арка) и при их жесткой заделке (тип 2 — бесшарнирная арка).

Исследования выполняли на моделях в плоском грунтовой лотке с использованием моделирования методом эквивалентных материалов. Благодаря подбору соответствующих критериев подобия и эквивалентных материалов, оказался возможным количественный переход от модели к натуре. Отработку методики экспериментов и выбор моделей осуществляли на основе работы [2] применительно к гибкой круглой трубе.

Критерии подобия при выборе модели грунтовой среды устанавливали на основе общего закона механического подобия Ньютона, наряду с применением метода размерностей. В качестве основного условия принято

$$\mu_m^2 = \mu_n^2 \text{ или } \alpha_{\mu^2} = 1, \quad (2)$$

где μ^2 — параметр гибкости трубы, равный [3]

$$\mu^2 = 1 + \frac{kR^4}{EI} = 1 + \frac{E_{гр}R^3}{EI(1 + \mu_{гр})}, \quad (3)$$

где R — радиус трубы (свода);

E — модуль упругости материала трубы (свода);

I — момент инерции стенки трубы (свода);

$E_{гр}$ и $\mu_{гр}$ — соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона грунтовой среды;

k — коэффициент постели, равный по формуле Б. Г. Галеркина [4]:

$$k = E_{гр}/R \cdot (1 + \mu_{гр}). \quad (4)$$

Индексы «м» и «н» здесь и далее относятся соответственно к элементам модели и натурной системы; l и L — размеры модели и натурности.

Одновременно должно соблюдаться подобие жесткости стенки трубы. Соотношения для определения всех использованных признаков подобия в статье не приводятся. Прочность материала трубы не моделировали.

С учетом изложенного подобраны основные элементы модельной системы — трубы и грунтовой среды. Испытывали модель гибкой круглой трубы диаметром $D = 2R = 15$ см и модели комбинированных труб с гибкими полуциркульными сводами того же диаметра типов 1 и 2 с нижней жесткой частью высотой 7,5 см. Модели гибких круглой трубы и сводов изготовлены из листовой латуни.

При выборе материала модели грунтовой среды проведены методические опыты с использованием песка, резиновой крошки и смесей из них. Для каждого материала были определены объемные веса γ_m и углы внутреннего трения φ , выполнены компрессионные испытания по стандартным методикам. На основании исследований в качестве материала для моделирования грунтовой среды принята резиновая крошка в воздушно-сухом ($W \leq 0,3\%$) состоянии. Заданную плотность крошки в опытах обеспечивали за счет ее послойной укладки и соответствующего однотипного уплотнения каждого слоя.

Поскольку при принятой в опытах высоте засыпки нагрузка на трубу и деформации ее поперечного сечения малы, с помощью рычагов моделировали нагрузку $q_{доп}$, которая соответствовала высоте дополнительной засыпки над моделью трубы $H_m = q_{доп} / \gamma_m$. Весом трубы пренебрегали.

Анализ критериев подобия показал, что принятая модель круглой трубы наиболее полно соответствует типовой МГТ диаметром 3 м из элементов толщиной 2,5 мм с размером гофра $130 \times 32,5$ мм. Характеристики натурной и модельной систем и признаки подобия приведены в табл. 1.

Лоток размерами $1200 \times 400 \times 400$ мм, в котором проводили исследования, подготовлен в процессе отработки методики с выполнением опытов методического характера. Передняя и задняя стенки лотка прозрачные из оргстекла толщиной 10 мм, усиленные стальными пластинами толщиной 9 мм. Для создания дополнительной вертикальной нагрузки лоток снабжен системой из 10 рычагов и устройством, обеспечивающим их одновременное опускание. Усилия от рычагов передаются на грунтовую среду через металлические распределительные пластины и деревянные площадки шириной 120 мм. К лотку крепится нутромер, вставляемый в модель трубы через отверстие в задней стенке лотка.

Таблица 1

Характеристики природы и модели, признаки подобия

Показатели		Труба		Грунтовая среда				μ^2
		R , см	EI , МПа·см ⁴ / см	$E_{гр}$, МПа	гр	кН/м ³	$\frac{\varphi}{\text{tg } \varphi}$	
Натурная труба МГТ – 3,0 м: $t = 0,25$ см, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $I = 0,408$ см ⁴ /см		150	$85,68 \cdot 10^3$	28,0	0,30	21,6	$\frac{30,00}{0,577}$	849,4
Модель трубы из латуни: $t = 0,025$ см, $E = 10^5$ МПа, $I = 1,302 \cdot 10^{-6}$ см ⁴ /см		7,5	$1,302 \cdot 10^{-1}$	0,35	0,34	5,4	$\frac{27,67}{0,577}$	847,3
Признаки подобия	обозначения	l	EI	$\alpha_{гр}$	$\alpha_{\mu гр}$		$\text{tg } \varphi$	α_{μ^2}
	требуемые	20	$64 \cdot 10^4$	80	1,0	4	1,0	80
	фактические	20	$65,8 \cdot 10^4$	80	0,88	4	1,1	80

Опыты выполнялись при участии инж. Ю. П. Куркина в следующем порядке. На дно лотка отсыпали слой резиновой крошки и после ее уплотнения получали основание толщиной 3 см. В опытах с моделями комбинированных труб в основание под ними укладывали с частичной заменой крошки деревянные прокладки толщиной 2 см. Устанавливали модель трубы. Производили послойную, равномерно с обеих сторон, засыпку модели резиновой крошкой. При отсыпке крошки по бокам трубы в уровне основания и над трубой в уровне ее верха для измерений вертикальных давлений в грунтовой среде устанавливали датчики давления — мессдозы (рис. 1). Провода от мессдоз выводили через отверстия в боковых стенках лотка. Измерения по мессдозам выполняли с помощью прибора ИСД-3. Симметричное расположение датчиков давления в условиях симметрии конструкций моделей труб и нагрузок позволяло дублировать измерения.

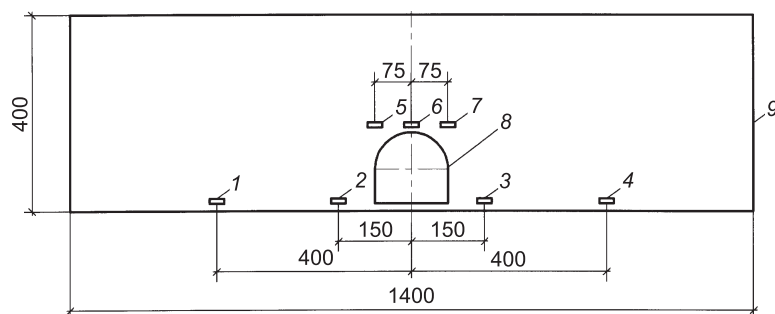


Рис. 1. Схема установки мессдоз в грунтовом лотке
1–7 — номера мессдоз; 8 — модель трубы; 9 — лоток (мм)

Для измерения давлений использовали мессдозы диаметром 30 и высотой 3 мм, обладающие большой жесткостью. В качестве первичного преобразователя в них применены гедисторы ГДТ р-типа с базой 10 мм. Гедисторы наклеивали клеем БФ-2 на стеклянную (кварцевую) мембрану. Принцип действия мессдозы основан на изменении омического сопротивления гедисторов, воспринимающих деформацию измерительной мембраны от действующего на мессдозу давления. Измеренное давление определяется по градуировочной кривой, построенной по данным испытаний в градуировочном устройстве. Испытания и градуировку мессдоз выполняли в песке при аэростатическом давлении. Контроль загрузки при испытаниях осуществляли по образцовому манометру, прошедшему госпроверку.

После отсыпки крошки на полную высоту прикладывали ступени нагрузки: от рычагов и подвесок (1-я ступень) 4,8 кПа; то же и дополнительно от веса гирь (2-я ступень) 6,8 кПа. При начальном положении и при обеих ступенях нагрузки с помощью нутромера измеряли размеры поперечного сечения модели трубы.

Проведено три серии опытов: 1) с круглой гибкой трубой; 2) с комбинированной трубой со сводом типа 1; 3) то же, со сводом типа 2. Всего выполнено 13 опытов, по 4–5 опытов в каждой серии.

Результаты измерений поперечных сечений моделей труб и вертикальных давлений в грунтовой среде обработаны математически с выявлением и исключением грубых погрешностей — промахов при принятой надежности $\alpha = 0,90$ [5] и в необходимых случаях аппроксимацией результатов линейными зависимостями, построенными по методу наименьших квадратов.

Результаты измерений вертикальных и горизонтальных размеров круглой трубы и сводов комбинированных труб представлены на рис. 2

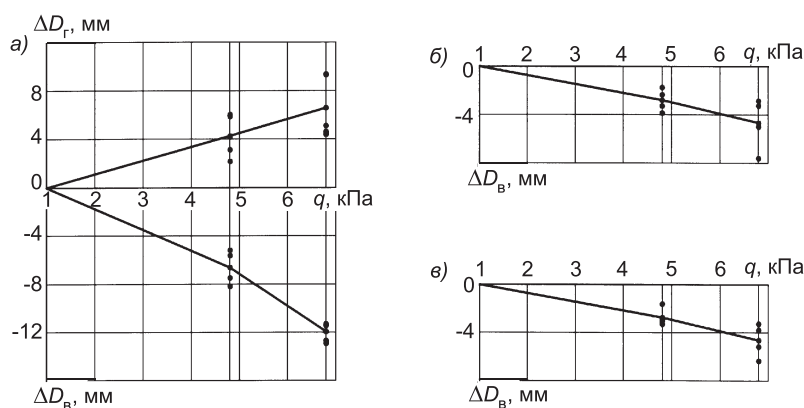


Рис. 2. Деформации поперечных сечений моделей труб
а — круглая труба; б — свод комбинированной трубы, тип 1; в — то же, тип 2

и в табл. 2, вертикальных давлений на рис. 3 и в табл. 3. Значения давлений приняты как средние по показаниям мессдоз в данной точке во всех опытах каждой серии (4–10 измерений). Графики на рис. 3 иллюстрируют качественный характер изменения давления засыпки в трубах разных типов по мере удаления от оси трубы (больше-меньше) и его величину в отдельных точках, но из-за малого количества мессдоз не отражают действительного очертания эпюр давления в засыпке поперек трубы.

Таблица 2

Деформации поперечных сечений моделей труб

Ступени нагрузки, кПа	Круглая труба						Комбинированные трубы	
	Изменение диаметров: вертикального ΔD_B и горизонтального ΔD_G						Изменение высоты свода ΔR_B	
	по данным опытов			по расчету			тип 1	тип 2
	ΔD_B	ΔD_G	$\frac{\Delta D_B}{\Delta D_G}$	ΔD_B	ΔD_G	$\frac{\Delta D_B}{\Delta D_G}$	ΔR_B	ΔR_B
	$\frac{мм}{\%}$	$\frac{мм}{\%}$		$\frac{мм}{\%}$	$\frac{мм}{\%}$		$\frac{мм}{\%}$	$\frac{мм}{\%}$
4,8	$\frac{-6,62}{4,41}$	$\frac{4,26}{2,84}$	1,55	$\frac{-7,67}{5,11}$	$\frac{2,18}{1,45}$	3,52	$\frac{-2,80}{3,73}$	$\frac{-2,68}{3,57}$
6,8	$\frac{-11,94}{7,96}$	$\frac{6,56}{4,37}$	1,82	$\frac{-14,19}{9,46}$	$\frac{4,04}{2,69}$	3,52	$\frac{-4,59}{6,12}$	$\frac{-4,55}{6,07}$

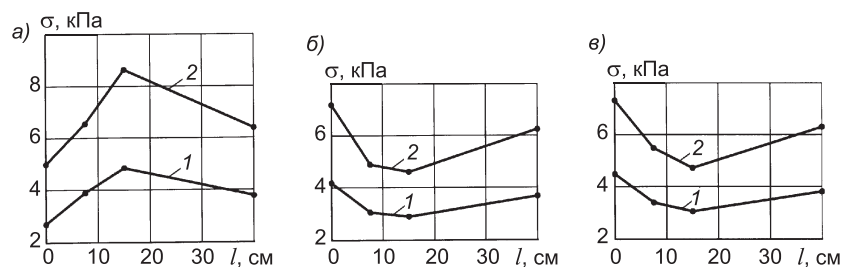


Рис. 3. Характер изменения вертикального давления по мере удаления от оси труб разных типов

а, б, в — то же, что и на рис. 2; 1, 2 — при ступенях нагрузки на поверхности соответственно 4,8 и 6,8 кПа

Таблица 3

Величины давлений, полученные в опытах

Тип модели трубы	Ступени нагрузки кПа	Давление по мессдозам, кПа/в долях от h , на расстоянии от оси модели трубы, см			
		0	7,5	15,0	40,0
Круглая МГТ	4,8	2,70/0,71	3,75/0,99	4,86/1,29	3,78/1,0
	6,8	5,00/0,78	6,33/0,99	8,63/1,35	6,39/1,0
КТ, тип 1	4,8	4,19/1,14	3,06/0,83	2,90/0,79	3,69/1,0
	6,8	7,20/1,15	4,91/0,79	4,62/0,74	6,25/1,0
КТ, тип 2	4,8	4,50/1,18	3,47/0,91	3,06/0,80	3,82/1,0
	6,8	7,33/1,16	5,50/0,87	4,73/0,75	6,31/1,0

Для приведения показаний мессдоз, уложенных в уровне основания за пределами модели трубы, к давлению на уровне верха трубы произведен расчет вертикальных давлений в засыпке с учетом потерь от влияния стенок лотка по формуле, приведенной в работе Н. А. Цытовича [6]

$$\sigma_v = \frac{1}{A} [\gamma - (\gamma - A \cdot p) \cdot e^{-Az}], \quad (5)$$

где $A = \frac{\xi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot u}{F}$;

ξ — коэффициент бокового давления, равный для песков 0,35 [6];

φ — угол внутреннего трения резиновой крошки, равный $27,67^\circ$;

u — периметр стенок лотка;

F — площадь поперечного сечения лотка в плане;

— объемный вес резиновой крошки (см. табл. 1);

p — давление на поверхности засыпки;

e — основание натуральных логарифмов;

z — расстояние от поверхности засыпки до места расположения мессдоз.

Согласно расчету давление в уровне основания модели трубы меньше, чем в уровне верха трубы, при первой и второй ступенях нагрузки соответственно на 0,06 и 0,35 кПа. Для приведения показаний всех мессдоз к одному уровню — уровню верха трубы — показания мессдоз № 1, 2, 3 и 4 по всем сериям откорректированы путем их увеличения на указанные величины. На рис. 3 и в табл. 3 приведены откорректированные значения показаний мессдоз.

Сопоставление измеренных и расчетных давлений в основании на расстоянии 40 см от оси трубы показало, что при второй ступени нагрузки они полностью совпадают (отклонения не превышают 2,5%). При первой ступени нагрузки измеренные давления в указанных местах оказались несколько меньше расчетных. Но это распространяется и на все остальные мессдозы, т. е. характер изменения давления по мере удаления от оси трубы по результатам измерений и по расчету примерно одинаков.

Давление по мессдозам на расстояние 40 см от оси трубы, близкое по всем сериям (отклонения от среднего значения от 1,1 до минус 2,0%), принято за величину давления засыпки в уровне верха трубы вне ее влияния, равную h .

Остановимся на результатах опытов с моделью круглой трубы.

Как видно из рис. 2, *a* и табл. 2, деформации поперечного сечения моделей круглой трубы — уменьшение вертикального ΔD_v и увеличение горизонтального ΔD_g диаметров — составили соответственно 6,62 и 4,26 мм (4,41 и 2,84%) при нагрузке 4,8 кПа и 11,94 и 6,56 мм (7,96 и 4,37%) при нагрузке 6,8 кПа. Значения $\Delta D_v/\Delta D_g$ равны при первой ступени нагрузки 1,55, при второй — 1,82. Соотношения между вертикальными и горизонтальными деформациями качественно согласуются с данными натурных наблюдений, проведенных на более жестких круглых МГТ диаметром 1,5 м под насыпями высотой 5–7 м, но разность между величинами ΔD_v и ΔD_g в натурных условиях была меньше: $\Delta D_v/\Delta D_g \approx 1,1\div 1,4$, преимущественно 1,2.

В табл. 2 кроме опытных данных приведены деформации поперечных сечений модели круглой трубы, определенные расчетом по Приложению 11 ВСН 176-78 [7], для условий опытов. Можно видеть, что опытные данные по изменениям вертикальных диаметров количественно довольно удовлетворительно согласуются с расчетными. Соотношения между изменениями вертикального и горизонтального диаметров качественно также совпадают: $\Delta D_v > \Delta D_g$, но количественно отношения $\Delta D_v/\Delta D_g$ в опытах существенно меньше. Измеренные деформации горизонтальных диаметров в 1,5–2 раза больше, чем полученные по расчету и ближе к натурным данным. Выполнен также расчет деформаций вертикального диаметра трубы по формуле Спенглера [8]. Получено, что при ступенях нагрузки 4,8 и 6,8 кПа деформации вертикального диаметра равны соответственно 6,37 и 11,80 мм (4,25 и 7,87%), что практически полностью совпадает с данными опытов.

Давление над моделью круглой гибкой трубы по ее оси (см. рис. 3, *a*) составляет $(0,71\div 0,78) h$, что качественно и количественно хорошо согласуется со сложившимся представлением о давлении грунта на гибкие трубы. Вертикальное давление на границе контура трубы равно $0,99 h$. По бокам от трубы рядом с ней происходит дополнительное нагружение основания.

Таким образом, опыты с круглой трубой качественно и количественно вполне удовлетворительно отражают работу гибкой трубы в грунтовой среде. Это свидетельствует о правильном назначении критериев подобия и выборе элементов модельной системы и позволяет с определенной уверенностью распространить этот вывод на опыты с комбинированными трубами. Результаты опытов с круглой гибкой трубой могут быть использованы как эталон для сравнительной оценки особенностей работы гибких сводов комбинированных труб.

Сопоставляя величины деформаций поперечных сечений круглой трубы и сводов комбинированных труб (см. рис. 2 и табл. 2), можно видеть, что относительные изменения вертикального размера сводов меньше, чем круглой трубы на 15–24%, что является следствием меньшей вертикальной податливости свода под нагрузкой по сравнению с круглой трубой. При одинаковой высоте отверстия круглой и комбинированной труб абсолютная вертикальная деформация комбинированной трубы, обусловленная только деформацией свода, в опытах в зависимости от величины нагрузки была в 1,75–2,5 раза меньше (см. табл. 2). Горизонтальные диаметры сводов практически не менялись. Изменения горизонтальных размеров с выпором в сторону засыпки наблюдались в нижней поло-

вине сечения свода на угле до 30–45° к горизонту. Величины изменений незначительны — до 2–3 мм.

Все это, естественно, приближает работу комбинированной трубы к работе жестких труб, приводя к существенному изменению характера распределения и величины вертикального давления засыпки на нее. В трубах со сводами, в отличие от круглых, наибольшее давление наблюдалось по оси трубы, составляя $(1,14 \div 1,18) \cdot h$. Давление над трубой по краям ее контура составляло $(0,79 \div 0,91) \cdot h$. По бокам от трубы рядом с ней происходила разгрузка основания (см. рис. 3, табл. 3).

Из полученного в опытах характера распределения давления следует вывод, что давление грунта засыпки на комбинированные трубы нужно определять с коэффициентом вертикального давления $C > 1$. Очевидно, что величина C зависит от соотношения высот гибкого свода и жесткой нижней части и будет увеличиваться или уменьшаться соответственно при увеличении или уменьшении доли жесткой части в общей высоте сечения трубы.

Относительно влияния конструкции заделки пят сводов на величину вертикальных деформаций сводов и давления на трубу отмечено, что в общем деформации несколько меньше, а давление больше для бесшарнирной арки. Однако эти различия незначительны (до 5,5%).

Указания СНиП 2.05.03-84* [1] в отношении определения коэффициента C применимы для жестких труб. Применительно к податливым в вертикальном направлении трубам с разной степенью податливости они требуют доработки с проведением специальных исследований.

На основании результатов опытов и с учетом изложенного на данном этапе для определения коэффициента C для комбинированных труб рассматриваемых конструкций нами предлагается следующий инженерный подход, основанный на использовании указаний СНиП 2.05.03-84* [1].

Поперечное сечение трубы высотой a состоит из двух частей: жесткой нижней лотковой части высотой a_1 и гибкого свода. Дополнительное вертикальное давление засыпки на трубу возникает только за счет жесткой нижней части. Для гибкого свода согласно [1] $C = 1,0$.

С учетом изложенного и указаний Приложения 4* [1] коэффициент вертикального давления C для КТ предлагается определять по формуле

$$C_v = 1 + \frac{a_1}{a} B_1 \left(2 - B_1 \frac{d}{h} \right) \tau_n \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (6)$$

Здесь величина B_1 , аналогичная B по формуле (2) Приложения 4* [1], определяется для нижней части сечения трубы с заменой расстояния a от основания насыпи до верха трубы на расстояние a_1 от основания насыпи до пят свода

$$B_1 = \frac{3}{\tau_n \operatorname{tg} \varphi_n} \cdot \frac{S a_1}{h}. \quad (7)$$

Влияние второго слагаемого на величину C в формуле (6) учитывается пропорционально доле высоты жесткой части a_1 от общей высоты трубы a .

Остальные обозначения по тексту Приложения 4* [1].

В табл. 4 приведены значения коэффициента вертикального давления грунта засыпки на комбинированные трубы, полученные в опытах и расчетом для тех же условий с переводом на натуру по предложенной рекомендации (6), (7). Здесь же показаны расчетные по формулам (1) и (2) Приложения 4* [1] значения C для жестких труб тех же размеров.

Таблица 4

Опытные и расчетные значения коэффициента C

Ступени нагрузки, кПа	Коэффициент вертикального давления C на трубы			
	жесткие	комбинированные		
	расчетные по формулам		из опытов	
	(1) и (2) [1]	(6), (7)	тип 1	тип 2
4,8	1,81	1,28	1,14	1,18
6,8	1,72	1,20	1,15	1,16

Согласно расчетам, значения C для исследуемых комбинированных труб на грунтовом основании составляли при первой и второй ступенях внешней нагрузки соответственно 1,28 и 1,20, что достаточно близко совпадает

с опытными данными. Причем расчетные значения несколько выше опытных. Расчетные значения C для комбинированных труб примерно на 30% меньше, чем для жестких.

Таким образом, реализация предложенной рекомендации позволяет определять величину вертикального давления достаточно близко к фактическим условиям работы трубы рассматриваемой конструкции при различных вариантах отверстия трубы, высоты гибкой и жесткой частей и высоты засыпки над трубой, избегая излишних запасов. Расчеты показывают, что при меньших высотах засыпки в зависимости от величины и сочетания этих параметров значения C уменьшаются с высотой засыпки и могут приближаться к значениям C для жестких труб.

Схема заделки пят сводов по данным опытов не имеет существенного значения с точки зрения деформаций поперечных сечений свода и величины вертикального давления засыпки на него. Влияние ее может сказаться на напряженном состоянии свода и армировании лотковой части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы/Минстрой России.— М.: ГП ЦПП, 1996.— 214 с.
2. Кузнецов Г. Н. Моделирование проявлений горного давления./Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько, Ю. И. Васильев и др.— Л.: Недра, 1968.— 280 с.
3. Виноградов С. В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки/С. В. Виноградов.— М.: Стройиздат, 1980.— 135 с.
4. Галеркин Б. Г. Напряженное состояние цилиндрической трубы в упругой среде/Б. Г. Галеркин// Труды ЛИПС.— 1929.— Вып. 100.
5. Касандрова О. Н. Обработка результатов наблюдений/О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев.— М.: Наука, 1970.— 104 с.
6. Цытович Н. А. Механика грунтов/Н. А. Цытович.— М.: Госстройиздат, 1963.— 636 с.
7. ВСН 176-78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб/Минтрансстрой СССР, МПС СССР. Введ. 01.01.78.— М.: Оргтрансстрой, 1979.— 130 с.
8. Колоколов Н. М. Металлические гофрированные трубы под насыпями/Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина и др.— М.: Транспорт, 1973.— 120 с.

© Бокарев С. А., Просекон С. А., Потапов А. С., 2008

Получено после доработки 18.03.08

ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ КАМНЕДРОБЛЕНИЯ

Сырьевыми материалами для получения неавтоклавного газобетона в основном являются: портландцемент, кварцевый песок-наполнитель, вода, газообразователь и различные добавки. Для обеспечения требуемой прочности и низкой средней плотности обязательной в технологии является энергоемкая операция помола кварцевого песка. Специалистами НГАСУ (Сибстрин) впервые предложено использовать в производстве ячеистых бетонов в качестве наполнителя дисперсные попутные продукты из систем пылеулавливания, образующиеся при дроблении альбитофировых и диабазовых горных пород на щебень для бетонов. Альбитофировые и диабазовые отходы через систему пылеулавливания поступают в запасные бункера в мелкодисперсном виде и могут использоваться в качестве наполнителя в ячеистых бетонах без дополнительного помола.

Разработаны составы ячеистого бетона на дисперсных отходах камнедробления альбитофировых и диабазовых горных пород, на основе которых получен газобетон по плотности марок D600, D700 и по прочности классов B1,5 B2 при использовании в качестве вяжущего портландцемента M400, D20. Также возможно изготовление теплоизоляционных газобетонных изделий марки D400.

Преимуществом предлагаемой технологии является использование отходов промышленности и отсутствие операции помола наполнителя, что уменьшает расходы на производство газобетонных изделий.

Газобетон на дисперсных отходах камнедробления альбитофировых и диабазовых горных пород рекомендуется для изготовления мелких конструктивно-теплоизоляционных стеновых блоков и теплоизоляционных изделий.

Автор разработки Н. А. МАШКИН, д-р техн. наук, проф.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

E-mail: itc@sibstrin.ru

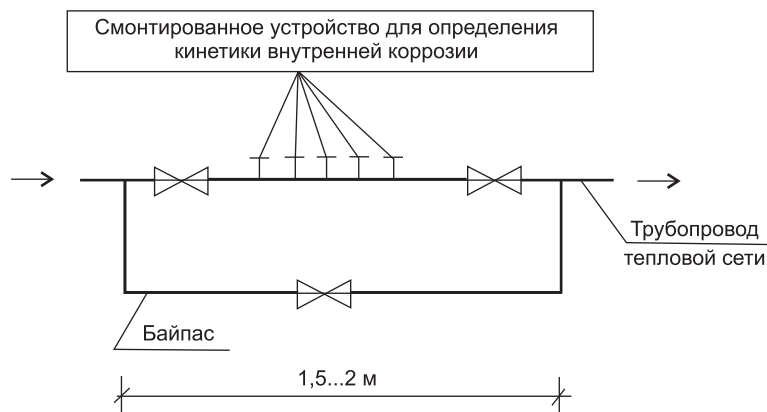
Internet: www.sibstrin.ru

Тел./факс: (8-383)-266-28-89

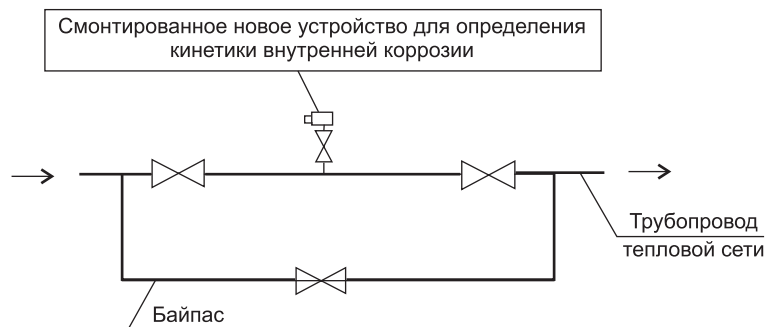
НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА ТРУБ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

В связи с высокой аварийностью теплосетей по причине коррозии трубопроводов исследование локального и среднего по длине изменения толщины стенки теплосетевых труб в реальных условиях эксплуатации является весьма актуальным.

Несмотря на низкую скорость коррозии теплосетевых труб частота измерения один раз в год недостаточна для исследования кинетики внутренней коррозии в целях прогнозирования ресурса трубопроводов конкретных теплосетей.



Для ускорения таких исследований специалистами НГАСУ (Сибстрин) предложено новое устройство, позволяющее производить монтаж-демонтаж индикаторов без остановки потока теплоносителя, т.е. через любые промежутки времени. На трубопроводах диаметром D_y 500 мм вместо пяти устройств на контрольном участке достаточно установить только одно новое устройство. На стержне нового устройства закрепляются все индикаторы коррозии, причем соединение смежных групп индикаторов из различных материалов осуществляется через диэлектрические вставки. В данном случае байпас необходим только для отключения участка трубопровода на время ремонта устройства.



Авторы разработки: А. С. БАСИН, д-р техн. наук, проф.,
Д. Б. ЧАПАЕВ, канд. техн. наук, доц.
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

E-mail: itc@sibstrin.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел./факс: (8-383)-266-28-89