

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

Научно-теоретический журнал  
Издается с марта 1958 г.  
Выходит один раз в месяц

**№ 1 (649)**  
Январь 2013 г.

Главный редактор В.Г. Себешев  
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,  
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,  
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.  
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),  
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,  
Ю.П. Панибратов, Ю.П. Правдинец, В.Г. Себе-  
шев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов, Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:  
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.  
Тел./факс 266-28-59.  
[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 25.01.13. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 10,92+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 2457.

ООО «Партнеры Сибири»,  
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Вохмянин И.Т., Немировский Ю.В. Динамика жесткопластического многоэтажного здания .....	3
Потапов А.Н., Уфимцев Е.М. Динамика конструкций с выключающимися связями при запроектных воздействиях .....	12
Крылова Е.Ю., Жигалов М.В., Папкова И.В., Крысько В.А. Математическое моделирование и прогнозирование характера нелинейных колебаний гибких балок .....	20

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Лесовик В.С., Савин А.В., Алфимова Н.И. Степень гидратации композиционных вяжущих как фактор коррозии арматуры в бетоне .....	28
Хархардин А.Н., Сулейманова Л.А. Реверс водонапорного отделения ячеистобетонных смесей .....	34

Безбородов В.А., Кудоманов М.В. Использование отходов промышленности для производства сухих строительных смесей .....	39
---	----

Логанина В.И., Аристкин М.А., Акжигитова Э.Р., Петухова Н.А. Оценка трещиностойкости отделочного штукатурного слоя на основе сухих строительных смесей .....	45
--	----

<b>Угляница А.В., Хмеленко Т.В., Солонин К.Д.</b> Структурообразование твердеющих закладочных смесей на основе доменных граншлаков .....	49
<b>Шахов С.А., Рудая Т.Л., Кожемяченко А.С.</b> Изучение возможности применения осадка водоочистки при производстве строительной керамики .....	54
<b>ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА</b>	
<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Калугин Ю.Б.</b> Выбор рациональной организационной схемы строительства линейно-протяженного объекта .....	62
<b>Анферов В.Н., Кузнецов С.М., Васильев С.И.</b> Имитационная модель оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов .....	70
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А.</b> Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Собщение 3. Численный эксперимент и результаты исследований .....	79
<b>Самарин О.Д., Азивская С.С.</b> Оценка расчетных теплопоступлений в помещение при автоматизации климатических систем .....	88
<b>Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М.</b> Регенерация синтетической загрузки в биореакторе.....	92
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Кадыров А.С., Глотов Б.Н., Бестембек Е.С.</b> Определение параметров нагружения фрезерного рабочего органа большого диаметра.....	101
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Вольская Л.Н., Кулигина О.А.</b> Модели среды городов Западной Сибири XVII — начала XX в. ....	107
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Болотин С.А., Гуринов А.И., Дадар А.Х., Оолакай З.Х.</b> Совершенствование организации ресурсосберегающего проектирования в строительстве на основе информационного моделирования .....	113
<b>Ижендеев А.В.</b> Формирование матрицы начальных напряжений тонкостенного стержня открытого профиля .....	119
<b>НАШИ ЮБИЛЯРЫ</b>	
<b>Алексею Игнатьевичу — 75</b> .....	126

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**УДК 539.3**

**И.Т. ВОХМЯНИН, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ**

## **ДИНАМИКА ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ\***

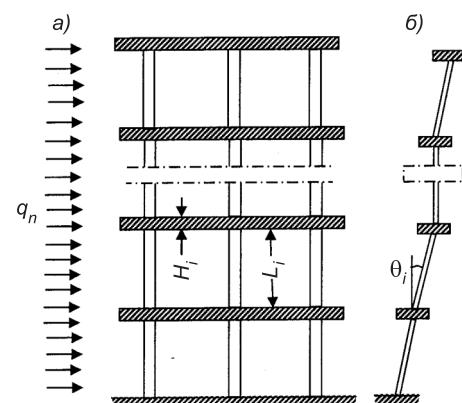
Проведено исследование динамического деформирования и предельных состояний жесткопластического многоэтажного здания под воздействием взрывных и сейсмических нагрузений. Определены критические инерционные амплитуды и несущая способность десятиэтажного высотного сооружения.

**Ключевые слова:** этаж, стойка, предельное состояние, жесткопластический материал, скорость, ускорение, сила инерции, деформирование, динамическое нагружение.

Исследования динамического деформирования высотных зданий до настоящего времени проводились главным образом методами теории упругости [1, 2]. Однако исследования динамического деформирования многоэтажных высотных зданий на основе модели идеального жесткопластического материала практически отсутствуют [3].

В настоящей работе проведено исследование динамического деформирования жесткопластического высотного здания под воздействием взрывных и сейсмических нагрузений. Определены критические инерционные амплитуды и несущая способность десятиэтажного высотного сооружения.

Рассмотрим здание, состоящее из фундамента, жестких междуэтажных перекрытий, кровли и междуэтажных жесткопластических несущих элементов (стоеч, колонн, стен) с высотой  $L_i$  и общей площадью поперечного сечения  $S_i$   $i$ -го этажа,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  (рис. 1, a). На здание действует поперечное давление, зависящее от времени и высоты. Фундамент совершают сейсмическое поперечное движение, зависящее от времени и вызывающее инерционные нагрузки на здание. Предположим также, что междуэтажные перекрытия представляют собою жесткие пластинки высотой  $H_i$ , совершающие поступательные горизонтальные движения. В таких предположениях здание можно рассматривать как плоский стержневой механизм, каждый модельный жесткопластический стержень (стойка) которого жестко закреплен в междуэтажное перекрытие и в предельном состоянии может со-



*Рис. 1.*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-00186а).

вершать поворот на угол  $\theta_i$  вокруг нижней точки крепления с образованием пластического шарнира, где испытывает предельный изгибающий момент (рис. 1, б). На жесткий стержень действует поперечное давление, а в верхней точке крепления — изгибающий момент, создаваемый встроенным демпфером, вызывающий затухание движения.

Воспользуемся известными уравнениями движения стержня-балки в локальной системе координат  $x_i O_i \bar{z}_i$  с началом в нижней точке  $O_i$  крепления каждого стержня, отсчетная ось  $x_i$ , которой направлена вверх по срединной оси стержня, а ось  $\bar{z}_i$  — в горизонтальном направлении. Для здания в целом воспользуемся глобальной системой координат  $x_2 O_1 \bar{z}$  с осью  $x_2$ , начало которой расположено в нижней точке крепления нижнего стержня.

$$\begin{aligned} N'_i + q_{1i}(x_i, t) &= \iint_{S_i} \rho_i \dot{U}_i dS_i, \quad Q'_i - (N_i W_i)' - q_n(x_2, t) = \iint_{S_i} \rho_i \ddot{W}_i dS_i, \\ M'_i - Q_i(x_i, t) &= \alpha_i \iint_{S_i} \rho_i \ddot{\theta}_i \bar{z}_i^2 dS_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $S_i$  — площадь поперечного сечения  $i$ -го стержня,  $N_i$  — осевое усилие,  $Q_i$  — перерезывающая сила,  $M_i$  — изгибающий момент;  $U_i, W_i$  — осевое и поперечное перемещения; поперечное давление определяется выражением  $q_n(x_2, t) = q_0 \varphi_1(t) \varphi_2(x_2)$ , где  $q_0$  — постоянный множитель;  $\alpha_i = 1$ , если учитывается инерция вращения сечения, и  $\alpha_i = 0$  в противном случае, штрих означает частную производную по времени  $t$ ;  $q_{1i}, \rho_i$  — погонные удельный вес и плотность материала.

Для жесткого стержня

$$W_i(x_i, t) = W_{0i}(t) + \theta_i(t)x_i, \quad \theta_i = W'_i, \quad (N \geq i \geq 1), \quad (2)$$

где  $W_{0i}$  — перемещения нижних точек крепления стержней.

Для определения перемещений стержня по высоте воспользуемся гипотезой Кирхгофа

$$U_i(x_i, \bar{z}_i, t) = U_{0i}(x_i, t) - \theta_i(t)\bar{z}_i, \quad (3)$$

где  $U_{0i}$  — перемещения точек на отсчетной оси, которые далее предполагаем малыми величинами и принимаем  $U_{0i} = 0$ .

Уравнения (1)–(3) в безразмерных величинах имеют вид

$$\begin{aligned} n'_i &= -(g_i + \mu_{si} \ddot{\theta}_i) / (2h), \quad q'_i - (n_i \theta_i)' - g_n / (2h) = \\ &= \mu_{qi} (\beta_i \ddot{w}_{0i} + \ddot{\theta}_i \xi_i) / (2h), \quad m'_i - 2q_i / h = \alpha_i \mu_{ri} \ddot{\theta}_i \xi_i / h, \end{aligned} \quad (4)$$

$$w_i(\xi_i, t) = w_{0i}(t) + \theta_i(t)\xi_i, \quad w_{0i+1} = w_{0i}(t) + \theta_i(t)l_i, \quad (5)$$

$$u_i(z_i, t) = -\theta_i(t)z_i, \quad g_n(x_2, t) = g_0 \varphi_1(t) \varphi_2(x_{22}). \quad (6)$$

Здесь

$$n_i = N_i / (2\sigma_0 H_0^2), \quad q_i = Q_i / (2\sigma_0 H_0^2), \quad m_i = M_i / (\sigma_0 H_0^3),$$

$$g_i = q_{1i} / (\sigma_0 H_0) = -m_{Ai}, \quad \mu_{si} = m_{si} / (\sigma_0 H_0), \quad \mu_{ri} = m_{ri} / (\sigma_0 H_0),$$

$$w_{0i} = W_{0i} / L_0, \quad w_i = W_i / L_0, \quad u_i = U_i / L_0, \quad u_{0i} = U_{0i} / L_0, \quad x_{22} = x_2 / L_0,$$

$$l_i = L_i / L_0, \quad z_i = \bar{z}_i / L_0, \quad g_n = q_n / \sigma_0, \quad g_0 = q_0 / \sigma_0, \quad q_{1i} = g \iint_{S_i} \rho_i dS_i,$$

$$\xi_i = x_i / L_0, \quad 0 \leq \xi_i \leq l_i, \quad \mu_{qi} = m_{qi} / (\sigma_0 H_0), \quad m_{si} = \iint_{S_i} \rho_i z_i dS_i,$$

$$m_{qi} = l_0 \iint_{S_i} \rho_i dS_i, \quad m_{li} = \iint_{S_i} \rho_i z_i^2 dS_i, \quad z = \bar{z} / L_0, \quad h = H_0 / L_0,$$

$g$  — ускорение свободного падения,  $L_i$  — длины стержней,  $H_0, L_0$  — величины с размерностью длины,  $\sigma_0$  — предел текучести, штрих означает производную по  $\xi_i$ , второе равенство (5) выражает условие непрерывности поперечного перемещения на междуэтажном перекрытии.

После интегрирования уравнений (4) с учетом равенств (5), (6) и граничных условий  $n_i(0, t) = p_{0i}$ ,  $q_i(0, t) = q_{0i}(t)$ ,  $m_i(0, t) = -m_{0i}$  получим

$$\begin{aligned} n_i(\xi_i, t) &= p_{0i} + \xi_i (m_{Ai} - \mu_{si} \ddot{\theta}_i(t)) / (2h), \\ q_i(\xi_i, t) &= q_{0i}(t) + \xi_i (m_{Ai} - \mu_{si} \dot{\theta}_i(t)) \theta_i(t) / (2h) + \frac{g_0}{2h} \varphi_1(t) \varphi_q(\xi_{0i}, \xi_{0i} + \xi_i) + \\ &\quad + \mu_{qi} [\xi_i \beta_i \ddot{\omega}_{0i}(t) + \ddot{\theta}_i \xi_i^2 / 2] / (2h), \\ m_i(\xi_i, t) &= -m_{0i} + 2q_{0i}(t) \xi_i / h + \xi_i^2 (m_{Ai} - \mu_{si} \dot{\theta}_i(t)) \theta_i(t) / (2h^2) + \\ &\quad + g_0 \varphi_1(t) \varphi_m(\xi_{0i}, \xi_{0i} + \xi_i) / h^2 + \mu_{qi} [\xi_i^2 \beta_i \ddot{\omega}_{0i}(t) / 2 + \\ &\quad + \ddot{\theta}_i \xi_i^3 / 6] / h^2 + \alpha_i \mu_{li} \ddot{\theta}_i \xi_i / h, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \xi_{0i} &= \sum_{j=1}^{j=i} (j-1)(l_{j-1} + h_{j-1}), \quad h_i = H_i / H_0, \quad \varphi_q(\xi_{0i}, \xi_{0i} + \xi_i) = \int_{\xi_{0i}}^{\xi_{0i} + \xi_i} q_n(x_{22}) dx_{22}, \\ \varphi_m(\xi_{0i}, \xi_{0i} + \xi_i) &= \int_{\xi_{0i}}^{\xi_{0i} + \xi_i} \left( \int_0^{x_{22}} q_n(x_{22}) dx_{22} \right) dx_{22}, \quad p_{0i} = P_{0i} / (2\sigma_0 H_0^2), \\ P_{0i} &= \sum_{j=i}^{j=N} P_{cj} + \sum_{j=i}^{j=N} P_{pj}, \end{aligned}$$

причем величина  $P_{0i}$  — осевое усилие в  $i$ -м стержне, равное весу здания над нижним сечением  $i$ -го стержня,  $P_{ci}$  — вес стержня,  $P_{pi}$  — вес перекрытия  $i$ -го этажа.

На основании равенств (7) для усилий и момента в верхней точке крепления  $\xi_i = l_i$  с заданным демпфирующим моментом  $m_i(l_i, t) = m_i^*(t)$  получим выражения

$$\begin{aligned} n_i(l_i, t) &= p_{0i} + l_i (m_{Ai} - \mu_{si} \dot{\theta}_i(t)) / (2h), \\ q_i(l_i, t) &= q_{0i}(t) + l_i (m_{Ai} - \mu_{si} \dot{\theta}_i(t)) \theta_i(t) / (2h) + \frac{g_0}{2h} \varphi_1(t) \varphi_q(\xi_{0i}, \xi_{0i} + l_i) + \\ &\quad + \mu_{qi} [l_i \beta_i \ddot{\omega}_{0i}(t) + \ddot{\theta}_i l_i^2 / 2] / (2h), \\ m_i(l_i, t) &= -m_{0i} + 2q_{0i}(t) l_i / h + l_i^2 (m_{Ai} - \mu_{si} \dot{\theta}_i(t)) \theta_i(t) / (2h^2) + \\ &\quad + g_0 \varphi_1(t) \varphi_m(\xi_{0i}, \xi_{0i} + l_i) / h^2 + \mu_{qi} [l_i^2 \beta_i \ddot{\omega}_{0i}(t) / 2 + \ddot{\theta}_i l_i^3 / 6] / h^2 + \\ &\quad + \alpha_i \mu_{li} \ddot{\theta}_i l_i / h. \end{aligned} \quad (8)$$

Из равенства (8) нетрудно определить  $m_{0i} = -m_i(0, t)$ . Если в некоторый момент времени  $t_*$  выполнено равенство  $m_{0i} = -1$ , то для моментов

времени  $t \geq t_*$  примем  $m_{0i} = -1$ . Время  $t_*$  соответствует началу перехода  $i$ -го стержня от поступательного движения или от состояния покоя, когда  $\theta_i = 0$ , к вращательному движению. При  $t \geq t_*$  проверим неравенство  $|m_i(\xi_i, t)| < 1$  на основании равенств (7).

Из последнего равенства (8) получим дифференциальное уравнение для угла поворота  $\theta_i$

$$\dot{\theta}_i(d_{0i} + d_{1i}\theta_i) + d_{2i}\theta_i = \psi_i. \quad (9)$$

Здесь

$$d_{0i} = \mu_{qi}l_i^3/(6h^2) + \alpha_i\mu_{hi}l_i/h, \quad d_{1i} = -\mu_{si}l_i^2/(2h^2),$$

$$d_{2i} = m_{Ai}l_i^2/(2h^2), \quad m_{0i} = -1,$$

$$\psi_i(t) = m_i^*(t) + m_{0i} - 2q_{0i}(t)l_i/h - g_0\varphi_1(t)\varphi_m(\xi_{0i}, \xi_{0i} + l_i)/h^2 -$$

$$-\mu_{qi}l_i^2\beta_i\ddot{w}_{0i}(t)/(2h^2).$$

В уравнении (9) перерезывающая сила  $q_{0i}(t)$  является неизвестной функцией времени, зависящей от перерезывающей силы  $q_{01}(t)$  в сечении крепления нижнего стержня.

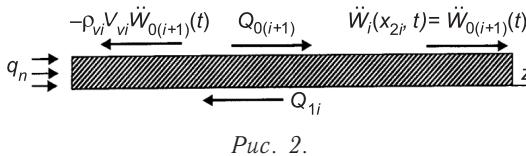


Рис. 2.

Из уравнения движения пластиинки междуэтажного перекрытия и условия непрерывности поперечного перемещения получим (рис. 2)

$$Q_{0(i+1)}(t) = Q_i(L_i, t) - \rho_{vi}V_{0i}\ddot{W}_i(x_{2i}, t) + \int_{L_0}^{L_0+H_i} q_n dx_{22}, \quad (10)$$

$$\text{где } L_{0i} = \sum_i i(L_i + H_i) - H_i, \quad x_{2i} = L_i.$$

В безразмерных величинах равенство (10) с учетом выражения (2) примет вид

$$q_{0(i+1)}(t) = q_i(l_i, t) - m_{vi}(\ddot{w}_{0i}(t) + l_i\ddot{\theta}_i) -$$

$$-\frac{g_0}{2h}\varphi_1(t)\varphi_q(\xi_{0i} + l_i, \xi_{0i} + l_i + h_i), \quad (11)$$

где

$$m_{vi} = \rho_{vi}V_{0i}L_0/(2\sigma_0H_0^2),$$

причем  $\rho_{vi}$  — удельная плотность материала,  $V_{0i}$  — объем пластины перекрытия  $i$ -го этажа.

Начальные условия для интегрирования уравнений (9) имеют вид

$$\theta_i(0) = 0, \quad \dot{\theta}_i(0) = 0. \quad (12)$$

Если все стержни совершают вращательное движение, то полученная система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений  $2N$ -го порядка кроме задаваемых функций  $w_{0i}(t)$ ,  $\varphi_1(t)$ ,  $\varphi_2(x_{22})$  содержит неизвестную функцию — перерезывающую силу в нижней точке крепления нижнего стержня  $q_{01}(t)$ . Для определения последней воспользуемся равенством, выражающим отсутствие перерезывающей силы на наружной поверхности перекрытия верхнего этажа

$$q_{0(N+1)} = 0. \quad (13)$$

Из равенств (8) и (11) получим рекуррентное соотношение

$$q_{0(i+1)}(t) = q_{0i} + A_i, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} A_i &= l_i(m_{Ai} - \mu_{si}\ddot{\theta}_i(t)\theta_i(t)/(2h) + \mu_{qi}(l_i\beta_i\dot{\omega}_{0i}(t) + \ddot{\theta}_i l_i^2/2)/(2h) - \\ &- m_{vi}(\dot{\omega}_{0i}(t) + l_i\ddot{\theta}_i) + \frac{g_0}{2h}\varphi_1(t)\varphi_q(\xi_{0i} + l_i, \xi_{0i} + l_i + h_i), \quad (i \geq 1), \\ \dot{\omega}_{0i} &= \dot{\omega}_{01} + \sum_{j=1}^{j=i-1} l_j \ddot{\theta}_j, \quad (i > 1). \end{aligned}$$

Из соотношения (13) получим

$$q_{0i}(t) = q_{01} + \sum_{j=1}^{j=i-1} A_j, \quad (i > 1), \quad (15)$$

откуда на основании равенства (14) определим перерезывающую силу  $q_{01}(t)$

$$q_{01}(t) = - \sum_{j=1}^{j=N} A_j. \quad (16)$$

С помощью равенств (14)–(16) определим перерезывающие силы  $q_{0i}(t)$  в нижних точках крепления стержней и затем по равенствам (7) зависимости усилий  $n_i(\xi_i, t)$ ,  $q_i(\xi_i, t)$  и изгибающего момента  $m_i(\xi_i, t)$ , при этом на основании равенств (15)–(16)

$$q_{0i}(t) = - \sum_{j=i}^{j=N} A_j. \quad (17)$$

Система дифференциальных уравнений (9) с учетом найденного выражения для перерезывающих сил (17) примет вид

$$Ay = f, \quad (18)$$

где  $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_{2N}, y_{2N+1})'$  — вектор-столбец искомых функций,

$$y_i = \dot{\theta}_i, \quad y_{j_1} = \theta_i, \quad j_1 = i + N, \quad y_{2N+1} = t, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N,$$

$A$  — матрица коэффициентов с элементами  $a_{ij}$ ,  $f = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_{2N}, f_{2N+1})'$  — вектор-столбец правых частей дифференциальных уравнений (18).

Для элементов матрицы  $A$  и вектора правых частей получим на основе равенств (9), (14)–(17) следующие выражения:

$$a_{ij} = d_{rij} - b_{ij} + c_{ij} - d_{dij} + c_{cij} - b_{bij}, \quad d_{rij} = d_{0i} + d_{li} y_{j_1} \quad (\text{при } i = j),$$

$$b_{ij} = \frac{l_i}{h^2} l_j \sum_{i_2=k}^{i_2=N} \mu_{qi2} l_{i_2} \beta_{i_2} \quad (k = i \text{ при } j < i, k = j+1 \text{ при } j \geq i, i < N);$$

$$c_{ij} = \frac{2l_i}{h^2} l_j \sum_{i_2=k}^{i_2=N} m_{vi2} \mu_{qi2} l_{i_2} \beta_{i_2} \quad (k = i \text{ при } j \leq i, k = j+1 \text{ при } j > i);$$

$$d_{dij} = -\frac{l_i}{h^2} l_j \mu_{si} y_{j_1}, \quad c_{cij} = -\frac{l_i^2}{2h^2} l_j \mu_{qj} \beta_i \quad (i > 1, j \leq i-1);$$

$$b_{bij} = -\frac{1}{2h^2} l_j^2 \mu_{qj}, \quad (j \geq i);$$

$$\begin{aligned}
\ddot{l}_i = & -d_{2i}y_{j_1} + m_i^* + m_{0i} - 2g_0\varphi_1(t)\varphi_m(\xi_{0i}, \xi_{0i} + l_i) / h^2 + \\
& + w_{0i}(t) \left[ 2l_i \sum_{j=i}^{j=N} \mu_{qj} - \mu_{qi} l_i^2 \right]; \\
\dot{l}_{j_1} = & y_i, \quad \dot{l}_{2N+1} = 1.
\end{aligned} \tag{19}$$

Начальные условия (12) в новых переменных имеют вид

$$y_i(0) = y_{j_1}(0) = y_{2N+1} = 0. \tag{20}$$

При малых, изменяющихся в зависимости от времени нагрузках здание остается в недеформированном состоянии, т. е. жестким. Зависимости  $q_{01}(t), q_{0i}(t), q_i(t), n_i(\xi_i, t), q_i(\xi_i, t), m_i(\xi_i, t)$  также определим с учетом равенств (7), (14)–(17), полагая  $w_{0i}(t) = \theta_i(t) = \dot{\theta}_i(t) = \ddot{\theta}_i(t) = 0$ . При этом значения  $m_{0i}(t) \neq \text{const}$ , согласно равенству (8), также определим с учетом граничных условий  $q_i(0, t) = q_{0i}(t), m_i(l_i, t) = m_i^*(t)$ . Здание начинает движение, когда действующие силы достигают предельных значений и реализуется предельное напряженно-деформированное состояние. Для рассматриваемой модели жесткопластического здания предельное состояние характеризуется образованием пластических шарниров с предельными изгибающими моментами  $m_{0i}(t) = -1$  в некоторых сечениях и превращением конструкции в стержневой механизм. В общем случае при произвольных нагрузках (сейсмических, взрывных и др.) пластические шарниры возможны в любом сечении стержня, в том числе между этажами здания. Возможно также образование областей, затрудняющих решение пластических деформаций в стержнях. Исследование динамического деформирования здания в такой общей постановке представляет сложную задачу. В рассматриваемой постановке задачи принято предположение, что пластические шарниры образуются в нижних креплениях стержней с предельными моментами  $m_{0i}(t) = -1$ .

В примерах рассмотрим десятиэтажное здание ( $N = 10, i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) под действием сейсмической инерционной нагрузки, вызванной движением фундамента в течение полупериода тригонометрической функции, согласно уравнению

$$w_{01}(t) = -a(1 - \cos(kt)), \quad \ddot{w}_{01}(t) = -ak^2 \cos(kt), \tag{21}$$

где  $a$  — амплитуда,  $k$  — круговая частота, период  $T = 2\pi/k, 0 \leq t \leq T/2$ .

Предположим, что геометрические и механические характеристики соответствующих элементов модели здания, кроме значений  $\mu_{qi}$ , однаковы, причем

$$l_i = 1, q_n = \varphi_1(t) = \varphi_2(x_2) = 0, h_i = 0,05, m_{Ai} = 0,3, \mu_{si} = 0,002, \mu_{li} = 0,01,$$

$$\alpha_i = 1, p_{ci} = 0,2 \cdot 10^{-2}, p_{pi} = 0,1 \cdot 10^{-2}, m_{vi} = 0,2 \cdot 10^{-3}, h = 0,1,$$

$$h_t = 0,5 \cdot 10^{-4}, h_x = 0,1, g_0 = 0, m_i^*(t) = 0, k = 0,5\pi,$$

$h_t$  — шаг по времени,  $h_x$  — шаг по координате.

В первом примере примем  $\mu_{qi} = 1,5$ , во втором  $\mu_{qi} = 0,5$  и в третьем примере  $\mu_{qi} = 0,1$ . Определим предельную амплитуду  $a = a_*$  в равенстве (21), предполагая, что здание находится в недеформированном состоянии, т.е.  $\theta_i(t) = \dot{\theta}_i(t) \equiv 0$ .

Зависимости предельной амплитуды от высотности здания  $N$  в первом, втором и третьем примерах приведены на рис. 3 линиями 1, 2, 3 соответственно. Из вычислений следует, что изгибающий момент достигает предельного значения в нижнем сечении стержня первого этажа здания (первое предельное состояние). При этом изгибающие моменты в других сечениях всех стержней на всех верхних этажах меньше предельного значения.

В первом предельном состоянии инерционная амплитуда достигает значения в первом примере  $a_{*1} = 0,285 \cdot 10^{-3}$ , во втором  $a_{*2} = 0,86 \cdot 10^{-3}$  и в третьем примере  $a_{*3} = 0,429 \cdot 10^{-3}$ . Движение здания, следовательно, начинается с поворота  $\theta_1$  стержня первого этажа и поступательного движения всех верхних этажей,  $\theta_i = 0, i \neq 1$ . С увеличением инерционной амплитуды и с течением времени происходит увеличение изгибающего момента до его предельного значения в нижнем сечении стержня второго этажа (второе предельное состояние) без превышения предельного значения в других сечениях стоек всех этажей. Во втором предельном состоянии инерционная амплитуда достигает значения в первом примере  $a_{*1} = 1,35 \cdot 10^{-3}$ , во втором  $a_{*2} = 3,05 \cdot 10^{-3}$  и в третьем примере  $a_{*3} = 1,03 \cdot 10^{-2}$ . Времена достижения второго предельного состояния соответственно равны  $t_{*1} = 0,8$ ,  $t_{*2} = 0,8$ ,  $t_{*3} = 0,6$ . Зависимости  $\theta_1(t)$  от первого до второго предельного состояния получим решением системы дифференциальных уравнений второго порядка (18)–(20), когда  $i=1$  и  $\theta_i(t) \equiv 0$  при  $i \neq 1$ . После достижения второго предельного состояния происходят повороты  $\theta_1$  и  $\theta_2$  стержней первого и второго этажей соответственно, причем  $\theta_i \equiv 0$  при  $i \neq 1, 2$ . Зависимости  $\theta_1(t)$  и  $\theta_2(t)$  в таком случае получим решением системы дифференциальных уравнений четвертого порядка (18)–(20), когда  $i=1, 2$  и  $\theta_i(t) \equiv 0$  при  $i \neq 1, 2$ . В рассмотренных первых двух примерах с дальнейшим увеличением инерционной амплитуды  $a$  не происходит переход к повороту ( $\theta_3 \neq 0$ ) стержня третьего этажа. Изгибающие моменты в окрестностях их предельных значений в заделках стержней первого этажа с течением времени начинают превышать предельные значения. Это обстоятельство может свидетельствовать о возникновении пластической зоны. Зависимости  $\theta_i(t), \dot{\theta}_i(t), m_i(\xi_i)$  в таких особых состояниях динамического деформирования здания приведены на рис. 4, 5 соответственно первому и второму примерам, причем инерционные амплитуды равны  $a_1^* = 1,4 \cdot 10^{-2}$  и  $a_2^* = 2,4 \cdot 10^{-2}$ .

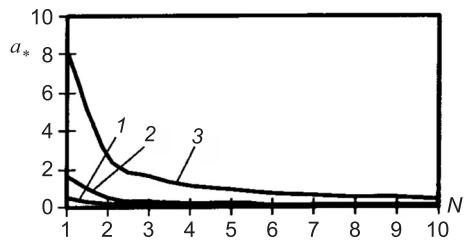


Рис. 3.

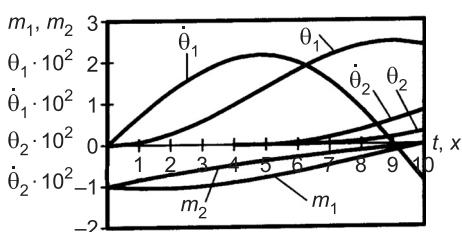


Рис. 4.

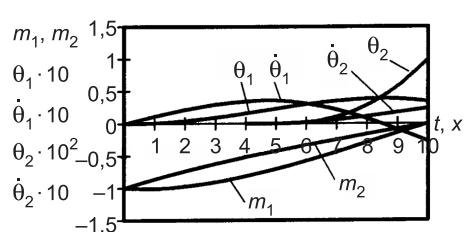


Рис. 5.

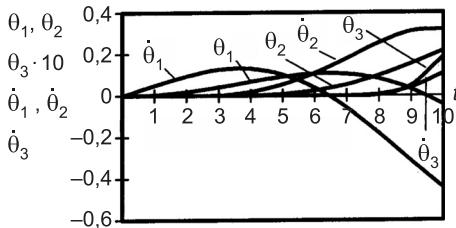


Рис. 6.

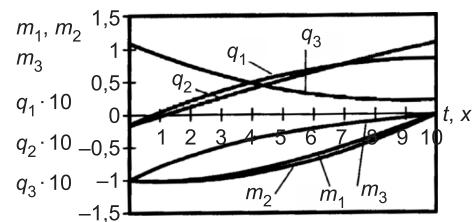


Рис. 7.

В третьем примере с увеличением инерционной амплитуды и течением времени происходит увеличение изгибающего момента до его предельного значения в нижнем сечении стержня третьего этажа (третье предельное состояние) без превышения предельного значения в других сечениях стоек всех этажей. В третьем предельном состоянии инерционная амплитуда достигает значения  $a_{*3} = 3 \cdot 10^{-2}$ . Время достижения третьего предельного состояния равно  $t_3^* = 0,7$ . После достижения третьего предельного состояния происходят повороты  $\theta_1, \theta_2$  и  $\theta_3$  стоек первого, второго и третьего этажей соответственно, причем  $\dot{\theta}_i \equiv 0$  при  $i \neq 1, 2, 3$ . Зависимости  $\theta_1(t), \theta_2(t)$  и  $\theta_3(t)$  в таком случае получим решением системы дифференциальных уравнений шестого порядка (18)–(20), когда  $i = 1, 2, 3$  и  $\dot{\theta}_{i^*}(t) \equiv 0$  при  $i \neq 1, 2, 3$ . Достижение инерционной амплитуды значения  $a_1 = 10,5 \cdot 10^{-2}$  сопровождается образованием пластической зоны в стойке второго этажа при  $t = t_2^* = 0,95$ .

Зависимости  $\theta_i(t), \dot{\theta}_i(t), m_i(\xi_i), q_i(\xi_i), (i=1, 2, 3)$  показаны на рис. 6 и 7. На рис. 4–7 цена деления шкалы по времени  $t$  равна 0,2 и 0,1 по координате  $x = \xi_i$ .

Таким образом, в зависимости от параметров здания, возможен переход в плоское движение части или всех этажей здания, исследования которого сопряжено с решением систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка. В примерах зависимости углов поворота от времени  $\theta_i(t)$  характеризуются точками перегиба в моменты времени, близкие к четверти периода косинусоиды, когда сила инерции изменяет знак, и монотонно возрастают, за исключением небольшого интервала времени в конце полупериода. Углы поворота стоек второго и третьего этажей  $\theta_2(t), \theta_3(t)$  монотонно возрастают до конца полупериода. Рассмотренная простейшая жесткопластическая стержневая модель может послужить для определения начального динамического деформирования здания, а также в некоторых случаях для определения критической инерционной амплитуды по допускаемым углам поворота стоек этажей здания. Кроме того, инерционную амплитуду, соответствующую началу образования пластических областей (складок), можно принять в качестве критической для жесткопластической стержневой модели здания. Критическая инерционная амплитуда может быть определена также из ограничения количества стержней этажей, в нижних сечениях которых изгибающие моменты достигают предельных значений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Немировский, Ю.В. Расчет и исследование поперечного деформирования несущей колонны высотного здания при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождения поверхностных волн. Сообщение 1. Постановка задачи [Текст] / Ю.В. Немировский, А.П. Янковский // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 9. — С. 17–26.

2. Немировский, Ю.В. Расчет и исследование поперечного деформирования несущей колонны высотного здания при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождения поверхностных волн. Сообщение 2. Метод расчета [Текст] / Ю.В. Немировский, А.П. Янковский // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 29–42.
3. Немировский, Ю.В. Предельное динамическое деформирование высотных сооружений [Текст] / Ю.В. Немировский // Труды Всерос. науч.-техн. конф. «Наука, промышленность, оборона», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос (г. Новосибирск, 20–22 апреля 2011 г.). — С. 456–460.

*ВОХМЯНИН Иван Тимофеевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: vokhmyanin@bk.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*НЕМИРОВСКИЙ Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru*

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск*

Получено 14.11.12

**Vokhmyanin Ivan Timofeevich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: vokhmyanin@bk.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Nemirovsky Yuriy Vladimirovich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

## DINAMIC OF RIGIDPLASTIC MYLTYSTORY BUILDING

The dynamic deformation and limited states of rigidplastic multistory building under the influence of explosive and seismic loads are investigated. The critical inertial amplitudes and load carrying capacity of the ten-storied high-rise buildings are defined.

**Key words:** storey, beam, limited state, rigidplastic material, speed, acceleration, inertia, deformation, dynamic loading.

## REFERENCES

1. Nemirovsky, Yu.V. Calculation and research of transverse deformation of supporting column of high-rise building at horizontal seismic oscillation of basis and passage of surface waves. Message 1. Problem definition [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 9. — P. 17–26.
2. Nemirovsky, Yu.V. Calculation and research of transverse deformation of supporting column of high-rise building at horizontal seismic oscillation of basis and passage of surface waves. Message 2. Method of calculation [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 29–42.
3. Nemirovsky, Yu.V. Limited dynamic deformation of high-rise building [Text] / Yu.V. Nemirovsky // Proc. All-Russian scientific-technical conference «Science, industry, defence», devoted 50-year of Gagarin cosmic flight (c. Novosibirsk, 20–22 April 2011 y.) — P. 456–460.

УДК 624.04 : 539.3 : 534

А.Н. ПОТАПОВ, Е.М. УФИМЦЕВ

**ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ  
С ВЫКЛЮЧАЮЩИМИСЯ СВЯЗЯМИ  
ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

В рамках теории временного анализа разработан алгоритм построения динамической реакции конструкции при выключении (разрушении) несущего элемента. Наряду с динамическим воздействием учитывается статическое нагружение конструкции. Приведен расчет плоской стальной фермы при внезапном выключении раскоса, вызванного действием импульсной нагрузки.

**Ключевые слова:** уравнение, матрица, перемещение, динамическая реакция, колебание, временной анализ, разрушение, ферма.

**1. Введение.** Проблема расчета строительных конструкций при запроектных воздействиях (в виде ударов, импульсов, взрывов и т.д.) является необычайно острой и привлекает к себе все большее внимание инженерных и научных работников. Повышенный интерес специалистов к данной проблеме вызван требованиями надежности и безопасности сооружений, в связи с чем вопросы живучести конструкций и оценок их безопасной работы широко обсуждаются в научно-технической литературе [1–4].

Сложность задач по обеспечению конструктивной безопасности зданий и сооружений состоит в том, что для их решения на сегодняшний день пока еще не создано строго обоснованной теории, позволяющей с единых научных позиций объяснять происходящие процессы при колебаниях поврежденной конструкции. Специалисты сходятся во мнении, что в нормативных документах практически отсутствуют методы расчета сооружений при внезапном запроектном воздействии [1]. При анализе проектных требований по предотвращению прогрессирующего обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений профессором П.Г. Еремеевым высказана мысль о трудности «теоретического определения возможности лавинообразного обрушения здания». Также отмечено, что на сегодняшний день «...отсутствуют аналитические методы определения начальных повреждений и прогнозирования вероятности последующего лавинообразного обрушения сооружения из-за предполагаемых аварийных воздействий» [2]. К этому стоит добавить, что аналогичные трудности характерны для несущих конструкций не только уникальных сооружений, но и любых других сооружений.

Поэтому разработка аналитических методов построения динамической реакции системы, учитывающих эффект разрушения связей (при частичном или полном разрушении узла, опоры, связей между несущими элементами и т.д.), представляется исключительно важной и актуальной задачей для оценки безопасной работы сооружений.

---

© Потапов А.Н., Уфимцев Е.М., 2013

В данной статье приведены результаты анализа колебаний конструкции при запроектном воздействии при внезапном разрушении (выключении) несущего элемента от импульсного воздействия. Эта работа является продолжением исследования, начатого в [4], где динамическая реакция строилась на основе метода временного анализа для поврежденного состояния статически нагруженной конструкции как дискретной диссипативной системы (ДДС).

**2. Основные уравнения.** Решение динамической задачи с учетом упруговязкого сопротивления связано с анализом матричного квадратного уравнения [4]:

$$MS^2 + CS + K = 0, \quad (1)$$

где  $S \in M_n(C)$  — матрица внутренних динамических параметров ДДС;  $M = M^T$ ,  $C = C^T$ ,  $K = K^T \in M_n(R)$  — матрицы масс, демпфирования и жесткости.

Полная реакция упругой ДДС при действии синусоидальных импульсов  $P(t) = P_0 \sin(\theta t)$ , где  $\theta = \pi/(t_a - t_0)$ , на интервале  $t \in [t_0; t_a]$  имеет вид [4]:

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= 2\operatorname{Re}\{Z(t)\}, \dot{Y}(t) = 2\operatorname{Re}\{S \cdot Z(t)\}, \\ \ddot{Y}(t) &= 2\operatorname{Re}\{S^2 \cdot Z(t)\} + M^{-1}P(t), Z(t) = Z_0(t) + Z_1(t) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$Z_0(t) = \Phi(t - t_0)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0], \quad (3)$$

$$Z_1(t) = U^{-1}[(S^T)^2 + E \cdot \theta^2]^{-1}H(t) \cdot P_0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H(t) &= S^T[\Phi(t - t_0)^T \sin(\theta t) - E \cdot \sin(\theta t)] + \\ &+ [\Phi(t - t_0)^T \cos(\theta t) - E \cdot \cos(\theta t)] \cdot \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Phi(t) = e^{st}$ ;  $U = MS + S^T M + C$ ;  $Y_0 = Y(t_0)$ ,  $\dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_0)$  — векторы начальных условий;

$t_0$ ,  $t_a$  — время начала и конца действия импульсов;

$P_0$  — вектор амплитуд динамической нагрузки;

$E$  — единичная матрица.

При учете деформированного состояния конструкции, вызванного действием постоянной нагрузки, в (3) необходимо положить  $Y_0 = Y_{st}$ ,  $\dot{Y}_0 = 0$ , где  $Y_{st} = K^{-1}Q$ ,  $Q$  — векторы статических перемещений и нагрузки. Тогда вектор-функция  $Z_0(t)$  представляется выражением:

$$Z_0(t) = -\Phi(t - t_0)U^{-1}M\bar{S}Y_{st} + [\Phi(t - t_0) - E](US)^{-1}Q. \quad (6)$$

Второе слагаемое в правой части (6) соответствует реакции системы при действии постоянной нагрузки  $Q$ .

Выражение (6) можно упростить. Группируя слагаемые вокруг матричной функции  $\Phi(t)$ , получаем

$$Z_0(t) = \Phi(t - t_0)[-U^{-1}M\bar{S}K^{-1} + (US)^{-1}]Q - (US)^{-1}Q. \quad (7)$$

Учитывая, что  $U^{-1}M\bar{S} = (US)^{-1}K$  и  $K^{-1} = -2\operatorname{Re}\{(US)^{-1}\}$ , первое слагаемое в правой части (7) за счет выражения в квадратных скобках обращается в нуль. Отсюда для вектора  $Z_0(t) = -(US)^{-1}Q$ , учитывая предыдущее выражение и формулы (2)

$$2\operatorname{Re}\{Z_0(t)\} = 2\operatorname{Re}\{-(US)^{-1}\}Q = Y_{st}.$$

После исчезновения импульсов при  $t \geq t_a$  вектор  $Z(t)$  в (2) описывает свободные колебания:

$$Z(t) = \Phi(t - t_a)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0] + [\Phi(t - t_a) - E](US)^{-1}Q. \quad (8)$$

Векторы начальных условий формируются при  $t_a$  из соотношений (2) и (4)–(6):  $Y_0 = Y(t_a)$ ,  $\dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_a)$ .

**3. Уравнения реакции системы при разрушении связей.** Приведем вариант построения уравнений реакции системы, когда выключение связи в статически нагруженной конструкции вызвано действием синусоидальных импульсов. Рассмотрим случай разрушения связи в момент времени  $t_1 < t_a$ . Обозначим через  $K(t_1)$  матрицу жесткости поврежденной системы.

На интервале времени  $t \in [t_0, t_1]$  реакция ДДС вычисляется по зависимостям (2), (4)–(6). При  $t_1$  вследствие внезапного изменения элементов матрицы жесткости выполняется корректировка параметров расчетной модели. Для этого проводится решение уравнения (1) при новом значении матрицы  $K(t_1)$  и в результате полученного матричного корня  $S$  формируются необходимые матрицы  $U$  и  $\bar{S}$ , включая матрицу  $\Phi(t)$ , построение которой осуществляется в ходе временного анализа. Эти параметры позволяют вычислить полную реакцию (2) на интервале  $t \in [t_1, t_a]$ . Причем реакция  $Z_1(t)$  при вынужденных колебаниях в (4), (5) строится с учетом замены  $t_0$  на  $t_1$  в матричной функции  $H(t)$ , а реакция при свободных колебаниях определяется вектором:

$$Z_0(t) = \Phi(t - t_1)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0] + [\Phi(t - t_1) - E](US)^{-1}Q. \quad (9)$$

Здесь вектор  $Q = K(t_1) \cdot Y_{st}(t_1)$ , где  $Y_{st}(t_1)$  — вектор статических перемещений системы в поврежденном состоянии. Векторы начальных условий  $Y_0$ ,  $\dot{Y}_0$  формируются в конце временного интервала  $[t_0, t_1]$  из уравнений (2), (4)–(6):  $Y_0 = Y(t_1)$ ,  $\dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_1)$ .

Важно отметить, что дополнительный эффект, возникающий после разрушения несущего элемента, проявляется в виде внезапного изменения (уменьшения) общей жесткости конструкции, что эквивалентно внезапному силовому воздействию.

На это указывает наличие второго слагаемого в выражении (8), в котором, как уже отмечалось, содержатся измененные параметры реакции  $S$ ,  $U$ ,  $\Phi(t-t_1)$ . Даный теоретический результат (уравнение (8)) не подтверждает мнение авторов [1] о том, что дополнительный эффект, возникающий от разрушения несущего элемента, имеет вид импульсного воздействия.

При  $t \geq t_a$  в (2) будет содержаться только реакция при свободных колебаниях  $Z(t) = Z_0(t)$ , по структуре совпадающая с записью уравнения (8). В отличие от (8) входящие в выражение этого вектора матрицы  $U$ ,  $\bar{S}$ ,  $\Phi(t)$  соответствуют поврежденной системе.

Силовые параметры реакции — инерционные  $I(t)$ , диссипативные  $F(t)$  и восстанавливающие  $R(t)$  силы определяются на основе кинематических характеристик (2):

$$I(t) = -M\ddot{Y}(t), F(t) = C\dot{Y}(t), R(t) = KY(t).$$

**4. Расчет стальной фермы на импульсное воздействие при внезапном выключении раскоса.** Исходные данные по задаче приве-

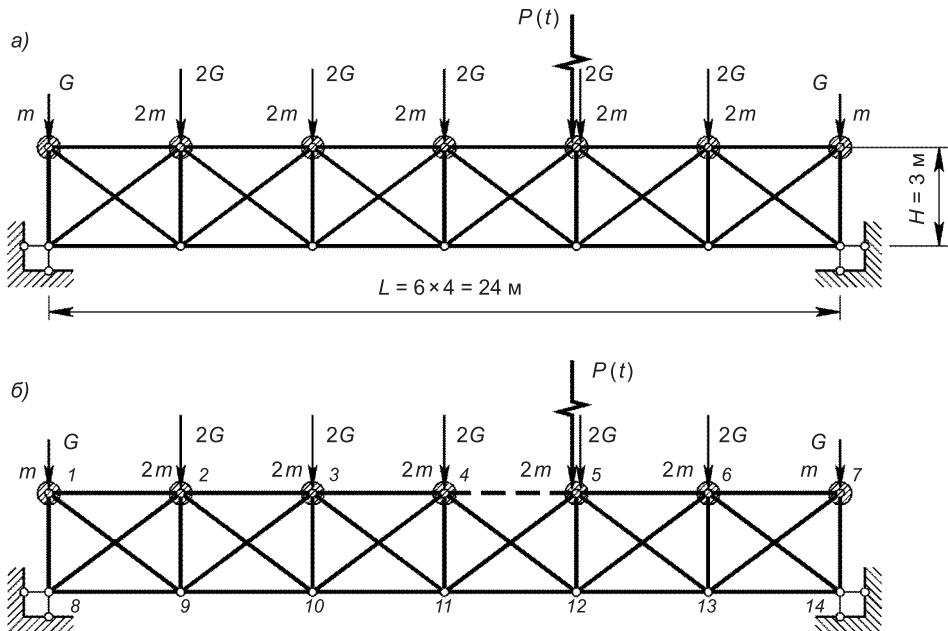


Рис. 1. Расчетная схема фермы

*a* — до разрушения; *б* — после разрушения элемента верхнего пояса

дены в работах [2, 4]. Расчетная схема фермы показана на рис. 1, *а*. Число динамических степеней свободы конструкции  $n = 14$ . На рис. 1, *б* изображена поврежденная ферма с выключенным элементом верхнего пояса 4-5 в 4-й панели.

Векторы узловых перемещений  $Y(t)$  и узловой статической нагрузки  $Q$  имеют вид:  $Y(t) = [x_1(t), y_1(t), x_2(t), y_2(t), \dots, x_7(t), y_7(t)]^T$ ,  $Q = [0, 1, 0, 2, \dots, 0, 2, 0, 1]^T \cdot G$ , где  $G = mg = 70$  кН. Импульсная нагрузка действует в 5-м узле фермы, ее амплитуда составляет 3200 кН. Вектор амплитуд динамической нагрузки  $P_0$  содержит нулевые значения, кроме элемента  $P_{0,10} = 3200$  кН. Матрица масс  $M = \text{diag}(1, 1, 2, 2, \dots, 2, 1, 1) \cdot m$ . Матрицы жесткости фермы  $K$  и  $K(t_1)$ , соответственно до и после выключения элемента 4-5, были сформированы средствами программного комплекса «Лира». Затухание учитывалось с помощью модели неоднородного демпфирования [4].

В соответствии с постановкой задачи проводилась реализация уравнений (2), (4), (5), (8), (9) на интервале времени  $[0; 10]$  с при шаге интегрирования  $\Delta t = 0,001$  с. Время действия синусоидального импульса равно  $t_a = 0,2$  с, разрушение элемента верхнего пояса происходит при  $t_1 = 0,173$  с вследствие его потери устойчивости.

Графики кинематических параметров реакции фермы с выключенным элементом верхнего пояса представлены на рис. 2. Согласно полученному вектору  $Y_{st}(t_1) = K(t_1)^{-1} \cdot Q$  узловые перемещения на осцилограммах (рис. 2, *а*) асимптотически стремятся к новому уровню статического равновесия.

На рис. 2, *б* показаны горизонтальные и вертикальные перемещения соответственно 1-го и 4-го узлов (см. рис. 1, *б*), где пунктиром изображены перемещения тех же узлов для неповрежденной фермы. Вследствие понижения жесткости конструкции осциллографмы перемещений узлов поврежденной системы оказываются смещенными относительно соответствующих кривых для неповрежденной системы.

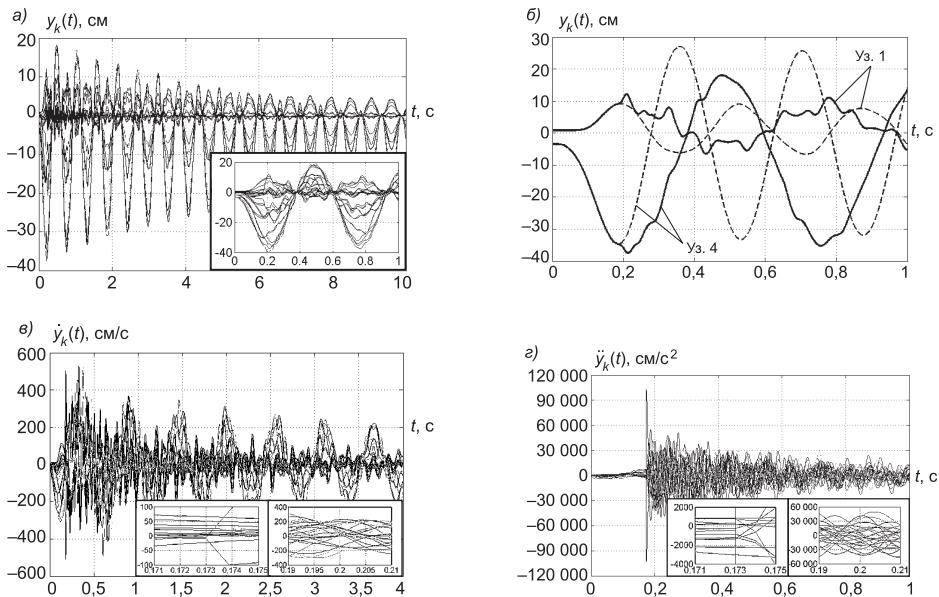


Рис. 2. Кинематические параметры реакции фермы

*а* — общий характер перемещений узлов поврежденной системы; *б* — фрагмент осциллограммы перемещений узлов поврежденной и неповрежденной системы; *в* — скорости узлов фермы поврежденной системы; *г* — ускорения узлов фермы поврежденной системы

На осциллограммах скоростей в момент времени  $t_1 = 0,173$  с наблюдается перелом, что видно из фрагмента на рис. 2, *в*. Осциллограммы ускорений (рис. 2, *г*) в тот же момент времени терпят разрывы, а при  $t_a$  разрывы, равные по величине ускорению свободного падения  $g$ , возникают только на тех кривых, которые соответствуют колебаниям масс в вертикальном направлении.

Характер изменения силовых параметров реакции представлен на рис. 3. Анализ графиков показывает, что в момент выключения элемента пояса при  $t_1$  эти параметры терпят разрывы. Скачки на осциллограммах силовых параметров и ускорений связаны с внезапным изменением элементов матрицы жесткости расчетной модели, а наибольшие по величине скачки наблюдаются на кривых, которые соответствуют параметрам для узлов 4 и 5 (см. рис. 1, *б*), примыкающих к выключенному элементу. Кроме того, на осциллограммах инерционных сил (рис. 3, *б*) скачки возникают в момент окончания действия импульса при  $t_a$ , но только на кривых, соответствующих перемещениям масс в вертикальном направлении.

Восстанавливающие силы (см. рис. 3, *а*), действующие в вертикальном направлении (кривые 2 и 4), асимптотически стремятся к значениям

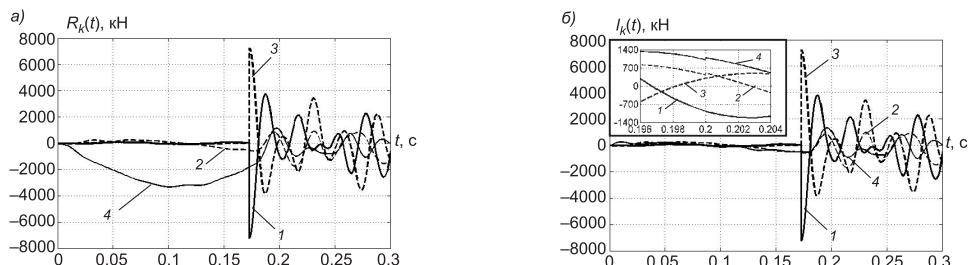


Рис. 3. Восстанавливающие (*а*) и инерционные (*б*) силы:

1 — вдоль оси  $X$  в узле 4; 2 — вдоль оси  $Y$  в узле 4; 3 — вдоль оси  $X$  в узле 5; 4 — вдоль оси  $Y$  в узле 5

узловой статической нагрузки  $Q$ , а восстанавливающие силы, соответствующие горизонтальному направлению (кривые 1 и 3), — к нулю. Также к нулю стремятся и инерционные силы (рис. 3, б).

По результатам определения динамических усилий фермы в ее стержнях построены осциллограммы нормальных напряжений. На рис. 4 показаны напряжения в стержнях наиболее нагруженной 4-й панели. После выключения стержня напряжения резко изменяют свои значения и в процессе колебаний стремятся к новым асимптотам.

Выключение элемента 4-5 происходит при критическом значении напряжения  $\sigma_z = -24 \text{ кН}/\text{см}^2$  из-за потери устойчивости. Вследствие перераспределения усилий в элементах фермы в стойках 4-й панели — элементах 4-11 и 5-12 — возникают растягивающие напряжения  $\sigma_z = 29 \text{ кН}/\text{см}^2$ . Эти напряжения по своему значению могут превысить предел прочности на растяжение для некоторых марок сталей, вызвав тем самым разрыв этих элементов. Но этот сценарий в данной работе не рассматривался.

На столбчатой диаграмме (рис. 5) представлены максимальные напряжения в стержнях неповрежденной и поврежденной ферм при учете [4] и без учета демпфирования, взятые по абсолютному значению. Из анализа рис. 5 видно, что в поврежденной ферме напряжения в большинстве стержней выше, чем в неповрежденной системе. Максимальные отличия доходят до 330 %. При этом наибольшие расхождения возникают в стержнях 3-11, 4-11, 4-12, 11-12, 5-12, 7-14, для которых отличия составляют от 170 до 330 %. В стержнях 2-8, 2-3, 10-11, 3-4, 4-5 усилия в неповрежденной системе выше, чем в поврежденной. В этом случае расхождение доходит до 10 %.

Отличия связаны с перераспределением усилий и напряжений в элементах фермы при ее внезапном ослаблении.

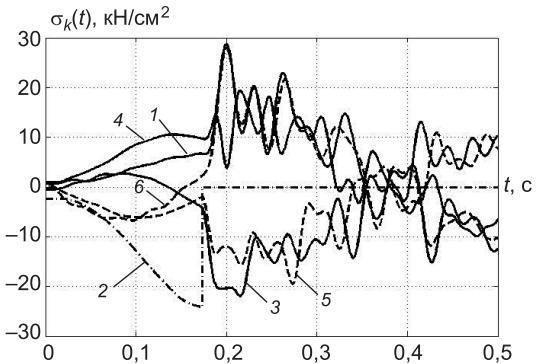


Рис. 4. Нормальные напряжения в стержнях фермы

1 — 4-11; 2 — 4-5; 3 — 4-12; 4 — 5-11; 5 — 11-12; 6 — 5-12

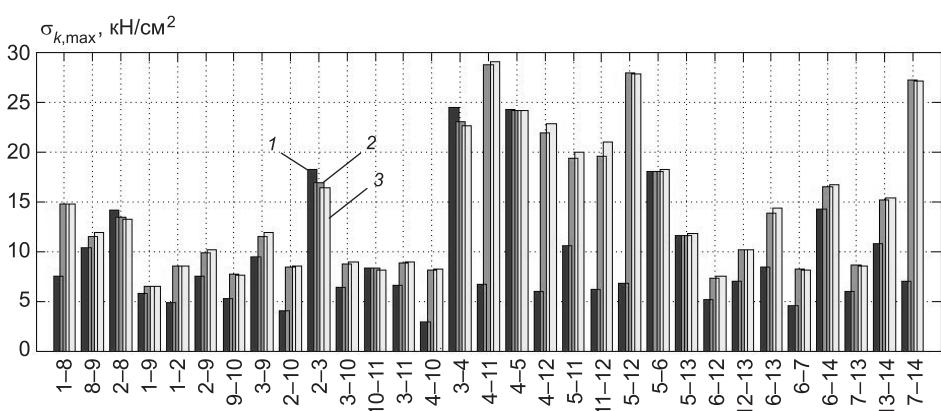


Рис. 5. Максимальные нормальные напряжения в стержнях фермы

1 — неповрежденная система с учетом трения; 2, 3 — поврежденная система с учетом и без учета трения

**Выводы.** 1. Показана возможность построения динамической реакции поврежденной системы в аналитическом виде.

2. Из приведенных зависимостей следует, что при внезапном разрушении несущего элемента колебания узлов конструкции совершаются относительно нового статического положения равновесия.

3. Внезапное выключение несущего элемента конструкции, сопровождающееся резким изменением (уменьшением) ее общей жесткости, приводит к дополнительному эффекту, эквивалентному внезапному силовому воздействию.

4. Открывается возможность оценки последствий разрушения несущего элемента конструкции. Результаты исследований позволяют в рамках теории временного анализа делать прогноз относительно состояния поврежденной системы на основе моделирования сценариев разрушений в последующих элементах, а также для оценки конструктивной безопасности сооружения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андросова, Н.Б. Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений [Текст] / Н.Б. Андросова, Н.В. Клюева, В.И. Колчунов // Вестник отделения строительных наук. — М.; Орел; Курск : РААСН, 2011. — Вып. 15. — С. 17–25.
2. Бондарев, Ю.В. Расчет стержневых систем при внезапном удалении отдельных связей [Текст] / Ю.В. Бондарев, Нгуиен Тханх Суан // Строительная механика и расчет сооружений. — 2010. — № 4. — С. 43–48.
3. Еремеев, П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях [Текст] / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2006. — № 2. — С. 65–72.
4. Потапов, А.Н. Колебания систем с обрушающимися связями [Текст] / А.Н. Потапов, Е.М. Уфимцев // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. — М. : МГСУ, 2011. — С. 292–301.

*ПОТАПОВ Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: potapov.alni@gmail.com*

*Южно-Уральский государственный университет (Научно-исследовательский университет), г. Челябинск*

*УФИМЦЕВ Евгений Михайлович, ассист.; E-mail: comtech606@yandex.ru*

*Южно-Уральский государственный университет (Научно-исследовательский университет), г. Челябинск*

Получено после доработки 26.11.12

**Potapov Alexander Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: potapov.alni@gmail.com, South-Ural State University (Research Institute), Chelyabinsk, Russia

**Ufimtsev Evgeniy Mikhailovich**, assistant; E-mail: comtech606@yandex.ru, South-Ural State University (Research Institute), Chelyabinsk, Russia

#### **DYNAMICS OF THE CONSTRUCTIONS WITH DISCONNECTED TIES UNDER UNDESIGNED INFLUENCES**

The algorithm of building of parameters of dynamic reaction of construction by disconnection of bearing elements was developed within the scope of theory of time analysis. The static loading was taken into account along with dynamical influence. Computation of

static loaded flat steel truss by unexpected disconnection of diagonal rod under dynamic load was given.

**Key words:** equation, matrix, displacement, dynamic reaction, vibrations, time analysis, breakdown, truss.

#### REFERENCES

1. Androsova, N.B. Some suggestions for standardization of the parameters of survivability of the constructions [Text] / N.B. Androsova, N.V. Klueva, V.I. Kolchunov // Bulletin of the branch of building sciences. — M.; Orel; Kursk : RAABS, 2011. — Issue 15. — P. 17–25.
  2. Bondarev, Yu.V. Computation of bar systems by sudden failure of sudden ties [Text] / Yu.V. Bondarev, Nguien Tkhanh Suan // Building mechanics and computation of constructions. — 2010. — N 4. — P. 43–48.
  3. Eremeev, P.G. Prevention of avalanche-like (progressive) breakdown of bearing constructions of unique large-span structures by abnormal influences [Text] / P.G. Eremeev // Building mechanics and calculation of structures. — 2006. — N 2. — P. 65–72.
  4. Potapov, A.N. Vibrations of systems with disconnecting ties [Text] / A.N. Potapov, E.M. Ufimtsev // Theory and practice of computation of buildings, constructions and elements. Analytical and numerical methods. — M. : MGSU, 2011. — P. 292–301.
-

УДК 539.3:534.1

Е.Ю. КРЫЛОВА, М.В. ЖИГАЛОВ, И.В. ПАПКОВА, В.А. КРЫСЬКО

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРА  
НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ БАЛОК\*

Приводится математическая модель нелинейных диссипативных колебаний балки, построенная на основе гипотезы Бернулли–Эйлера, с учетом нелинейной зависимости между деформациями и перемещениями в форме Кармана.

Для исследования поведения геометрических нелинейных балок, под действием знакопеременной поперечной нагрузки разработан пакет программ, позволяющий на основе решения дифференциальной задачи получать: сигнал, фазовый портрет, сечение Пуанкаре, спектр мощности Фурье, двумерный и трехмерный вейвлет-спектр, старший показатель Ляпунова и автокорреляционную функцию.

Прогнозировать характер колебаний балочных конструкций в работе предлагается на основании карт характера колебаний балки, построенных с учетом различных вариантов приложения нагрузки. Впервые в строительной механике рассматривается явление пространственно-временного хаоса в задачах колебаний механических систем. Также показано, что сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим существенно меняется в зависимости от характера приложения локальной знакопеременной нагрузки.

Ключевые слова: балки, нелинейные колебания, странный аттрактор, хаос, диссипативные системы, потеря устойчивости, балки Бернулли – Эйлера, вейвлет-анализ.

Балки являются одним из ключевых несущих элементов едва ли не всех современных инженерно-технических сооружений. Английский профессор Д.Э. Гордон говорил: «...поскольку при разрушении инженерных конструкций возможны человеческие жертвы, поведение элементов подобных конструкций должно исследоваться с предельной тщательностью». Таким образом, перед наукой стоит задача следить за тем, чтобы элементы конструкции в процессе их эксплуатации работали лишь в безопасных для себя режимах. То есть важнейшим вопросом является изучение откликов механических систем в виде балок на различного рода нагрузки. В рамках данной работы рассматривается влияние локальной знакопеременной поперечной нагрузки на поведение шарнирно опертой гибкой упругой балки. Прогнозировать характер колебаний балочных конструкций в работе предлагается на основании карт характера колебаний, построенных для многообразия комбинаций управляющих параметров  $\{q_0, \omega_p\}$  с учетом различных вариантов приложения нагрузки ( $q_0$  и  $\omega_p$  — амплитуда и частота внешней нагрузки соответственно). Карты построены на базе качественной теории дифференциальных уравнений. При исследовании колебаний наряду с аппаратом Фурье-анализа используется аппарат вейвлет-преобразований, строятся сигналы, фазовые и модальные портреты, спектры мощности Фурье, вейвлет-спектры Морле для произвольной точки балки. Анализируются знаки ляпуновских показателей.

\* Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ №12-01-31204.

© Крылова Е.Ю., Жигалов М.В., Папкова И.В., Крысько В.А., 2013

В механике сплошных сред серьезное внимание уделено исследованию явления временного хаоса. Этому вопросу посвящено много работ<sup>1–3</sup> [1–4].

Цель настоящего исследования — изучение принципиально нового явления — пространственно-временного хаоса. Впервые на него существование было обращено внимание при изучении уравнений Гинзбурга–Ландау.

Приведем математическую модель нелинейных диссипативных колебаний балки, построенную на основе гипотезы Бернулли–Эйлера<sup>4</sup>, с учетом нелинейной зависимости между деформациями и перемещениями в форме Кармана<sup>5</sup> в безразмерном виде:

$$\begin{cases} u'' + L_3(w, w) - \dot{u} = 0; \\ 1/\lambda^2 \{L_2(w, w) + L_1(u, w) - 1/12w^{IV}\} - \ddot{w} - \varepsilon\dot{w} + q = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Безразмерные параметры введены по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= w/(2h), \bar{u} = ua/(2h)^2, \bar{x} = x/a, \lambda = a/(2h), \bar{q} = (qa^4)/(2h)^4 E, \\ \bar{t} &= t/\tau, \tau = a/c, c = \sqrt{Eg/\vartheta}, \bar{\varepsilon} = \varepsilon a/c, \end{aligned}$$

черточки над ними для простоты опущены. Производные по времени обозначены точкой, а производные по координате  $x$  — штрихом;  $L_1(u, w) = u''w' + u'w''$ ,  $L_2(w) = (3/2)w''(w')^2$ ,  $L_3(w) = w''w'$  — нелинейные операторы;  $\varepsilon$  — коэффициент диссипации;  $E$  — модуль Юнга;  $\vartheta$  — удельный вес материала балки;  $g$  — ускорение свободного падения,  $q$  — по-перечная нагрузка, имеющая вид:  $q = q_0(x)\sin(\omega_p t)$ ,  $\omega_p$  — частота внешней нагрузки,  $q_0(x)$  — ее амплитуда.

Границные и начальные условия в общем случае могут быть произвольными.

Данная математическая модель детально описана, приведены аналитические и численные методы ее решения и дана оценка достоверности получаемых результатов<sup>6, 7</sup>.

В численных экспериментах, приведенных в данной статье, выбраны нулевые начальные условия:

$$w(x, t)|_{t=0} = u(x, t)|_{t=0} = 0; \dot{w}(x, t)|_{t=0} = \dot{u}(x, t)|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Awrejcewicz J., Krysko A.V., Papkova I.V., Krysko V.A. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 3 // The Lyapunov exponents, hyper, hyper-hyper and spatial-temporal chaos. Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 45 (2012), 721–736.

<sup>2</sup> Крысько В.А., Жигалов М.В., Салтыкова О.А., Крысько А.В. Об учете влияния по-перечных сдвигов на сложные нелинейные колебания упругих балок // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 5. С. 186–193.

<sup>3</sup> Крысько В.А., Koch M.I., Жигалов М.В., Крысько А.В. Фазовая хаотическая синхронизация колебаний многослойных балочных структур // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 3. С. 166–175.

<sup>4</sup> Euler L. Sur la force des colonnes // Memories de L'Academie de Berlin. 1757. Vol. 13. P. 252–282.

<sup>5</sup> Kargman Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau // Encyklop. D. Math. Wiss. 1910. Vol. 4, N 4. P. 311–385.

<sup>6</sup> Крысько В.А., Жигалов М.В., Десятова А.С., Салтыкова О.А. Диссипативная динамика геометрических нелинейных балок Бернулли–Эйлера // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 6. С. 128–136.

<sup>7</sup> Крысько В.А., Жигалов М.В., Крылова Е.Ю. Нелинейная динамика балок Эйлера–Бернулли. (Математическая модель, сценарии перехода колебаний из гармонических в хаотические) // Изв. вузов. Строительство. № 2. 2011. С. 15–21.

и граничные, соответствующие шарнирному закреплению концов балки:

$$w(0,t) = w(1,t) = u(0,t) = u(1,t) = w''_{xx}(0,t) = w''_{xx}(1,t) = 0; \quad (3)$$

использовались следующие параметры:

$\lambda = a/(2h) = 50$ , коэффициент диссипации среды —  $\epsilon = 1$ , количество отрезков разбиения  $n = 40$ ,  $x \in [0; 1]$ .

Здесь и далее под полосой нагрузки будем понимать количество отрезков разбиения, в точках которых приложена нагрузка. В рамках численного эксперимента рассматривались следующие варианты приложения нагрузки:

— нагрузка распределена по всей длине балки ( $n_q = 40$ ,  $n_q$  — ширина полосы приложения нагрузки);

— нагрузка прилагалась к четырем отрезкам симметрично относительно середины балки ( $n_q = 4$ , отрезок с 18 по 22), т.е.

$$q(x,t) = \begin{cases} 0, & x \in [0; 18/n] \cup (22/n; 1], \\ q_0(x)\sin(\omega_p t), & x \in [18/n; 22/n]; \end{cases}$$

— нагрузка прилагалась к четырем отрезкам не симметрично центра балки ( $n_q = 4$ , отрезок с 8 по 12),

$$q(x,t) = \begin{cases} 0, & x \in [0; 8/n] \cup (12/n; 1], \\ q_0(x)\sin(\omega_p t), & x \in [8/n; 12/n]. \end{cases}$$

Исследовано явление временного хаоса и показано, что сценарии перехода колебаний рассматриваемой балки от гармонических к хаотическим существенно изменяются в зависимости от набора управляющих параметров и характера приложения нагрузки<sup>6</sup>. Однако математическая модель колебаний, построенная на основании уравнений движения в частных производных, позволяет также провести исследования явления пространственного хаоса. То есть следить за эволюцией пространственно-временного сигнала балки, построенного на том или ином временном интервале. Для качественного изучения пространственно-временного хаоса в работе вводятся в рассмотрение модальные портреты, характеризующие изменение во времени произвольной точки поверхности балки с помощью прогиба, первой и второй производной (приближенно равной значению кривизны) по пространственным координатам. В табл. 1 приведены характеристики колебаний балки, отвечающие набору управляющих параметров, вызывающих гармонические колебания системы. На спектре мощности Фурье и вейвлет-спектре одна частота — частота вынуждающей нагрузки, фазовый портрет без петель, сечение Пуанкаре сходится к одной точке, пространственно-временной сигнал соответствует гармоническим колебаниям.

В табл. 2 приведены характеристики колебаний балки, отвечающие набору управляющих параметров, вызывающих хаотические колебания системы. Следует отметить, что сигнал и вейвлет-спектр иллюстрируют резкую смену характера колебаний балки с течением времени. Разрушение аттрактора в сечении Пуанкаре также указывает на то, что колебания не на всем временном интервале нерегулярны. Следует отметить, что анализ нестационарных сигналов на основе преобразования Фурье не дает возможности в полной мере исследовать их локальные особенности. Мощной альтернативой анализу Фурье является теория вейвлетов, которая дает более глубокую технику обработки сигнала, позволяя следить за его эволюцией с течением времени.

Таблица 1

**Нагрузка приложена по всей длине балки,  $\omega_p = 1$ ,  $q_0 = 30000$**

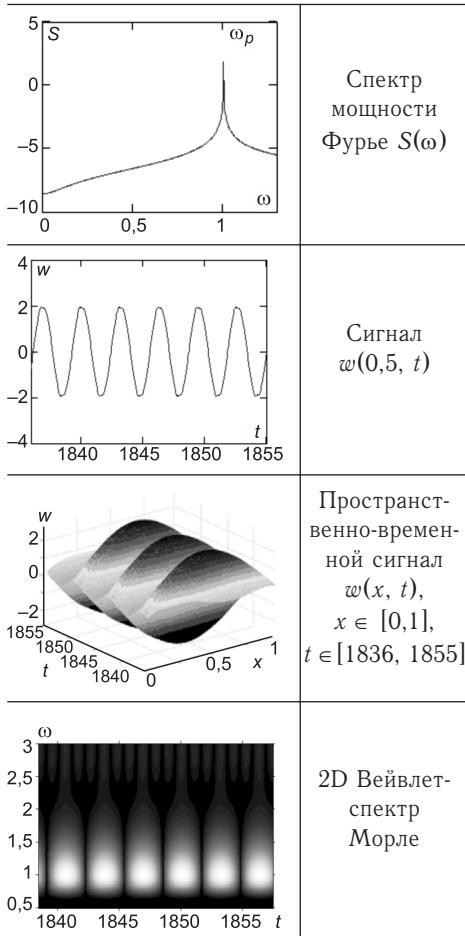
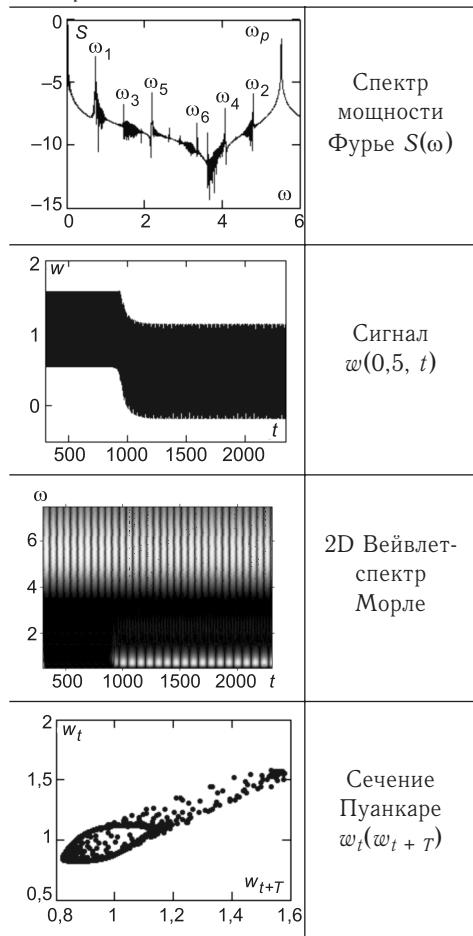


Таблица 2

**Нагрузка приложена по всей длине балки,  $\omega_p = 5,5$ ,  $q_0 = 30000$ ,  $t \in [300, 2348]$**



Рассмотрим характеристики системы на каждом из временных интервалов, где ее поведение различно. Табл. 3 отвечает начальному временно му интервалу, на котором колебания гармонические. Все построенные характеристики это подтверждают.

В табл. 4 приведены характеристики, построенные при  $t > 950$ . На спектре мощности Фурье присутствуют серии линейно зависимых частот  $\omega_{i+1} = \omega_p - \omega_i$ ,  $i = 1,3$  ( $\omega_1 = 0,721$ ;  $\omega_2 = 1,442$ ;  $\omega_3 = 2,166$ ;  $\omega_4 = 4,779$ ;  $\omega_5 = 4,058$ ;  $\omega_6 = 3,334$ ;  $\omega_p = 5,5$ ).

Стоит отметить, что в основе исследований<sup>7</sup> были рассмотрены лишь узкие области из всего многообразия комбинаций управляемых параметров.

В данной работе, следуя идеи А. Пуанкаре, построены карты характера колебаний, позволяющие изучить все многообразие поведения конструкции на всем поле управляемых параметров и выявить наиболее благоприятные параметры воздействия. Идентификация типа колебаний при построении данных карт для каждого сигнала  $w(t)$  проводилась с помощью анализа спектра мощности  $S(\omega_p)$ . В работе были построены карты характера колебаний размером  $300 \times 300$  для управляемых параметров  $\{q_0, \omega_p\}$  с учетом каждого из четырех случаев приложения нагрузки (рис. 1–3). При построении каждой карты приходилось анализировать

Таблица 3

**Нагрузка приложена по всей длине балки,  $\omega_p = 5,5$ ,  $q_0 = 30000$ ,  $t \in [500, 520]$**

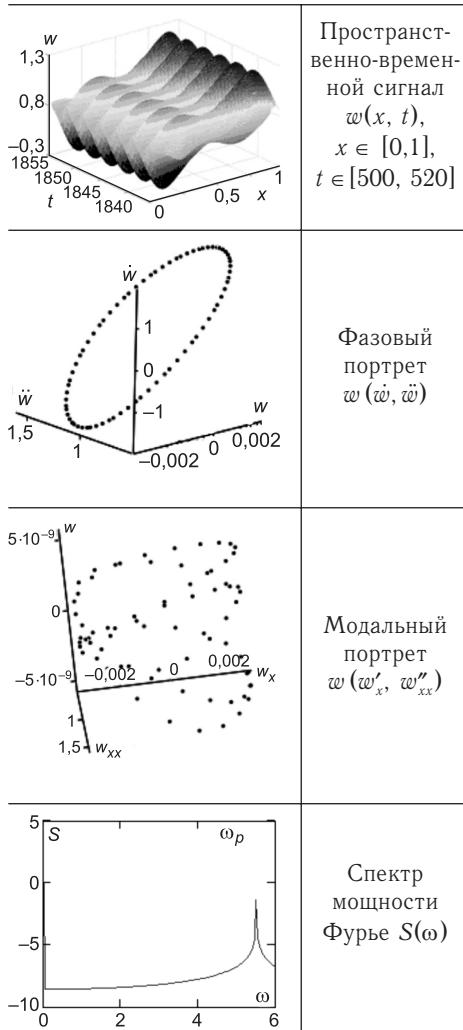
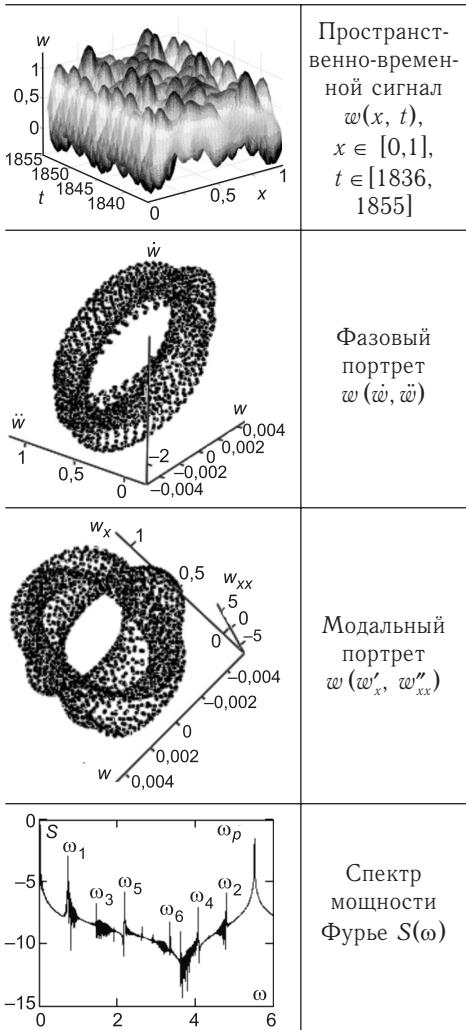


Таблица 4

**Нагрузка приложена по всей длине балки,  $\omega_p = 5,5$ ,  $q_0 = 30000$ ,  $t \in [1836, 1855]$**



спектр мощности  $S(\omega_p)$  для каждого набора управляющих параметров  $\{q_0, \omega_p\}$ , т.е. решать  $9 \cdot 10^4$  задач.

Амплитуда внешнего воздействия менялась при этом на интервале  $(0; 10^5)$ , частота на интервале  $(3; 9)$ , колебания рассматривались на следующем временном интервале  $[0, 2348]$  для всех вариантов.

Анализируя карту характера колебаний (см. рис. 1), соответствующую нагрузке, приложенной по всей длине балки, мы можем заметить, что при малых значениях амплитуды ( $q_0 \leq 10000$ ) и частоты локальной знакопеременной поперечной нагрузки, не превышающей частоты собственных колебаний ( $\omega_0 = 5,8$ ), поведение системы носит гармонический характер, что соответствует безопасному режиму воздействия на исследуемую конструкцию. В том же диапазоне амплитуды с ростом частоты внешнего воздействия система переходит в неустойчивое состояние, т.е. появляются зоны независимых частот и зоны бифуркаций Андронова–Хопфа, таким образом, такие наборы параметров внешнего воздействия соответствуют переходным зонам.

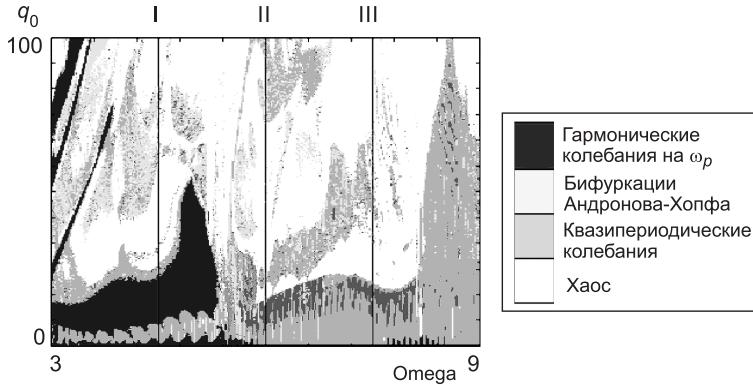


Рис. 1. Карта характера колебаний. Нагрузка приложена по всей длине балки  $n_q = 40$

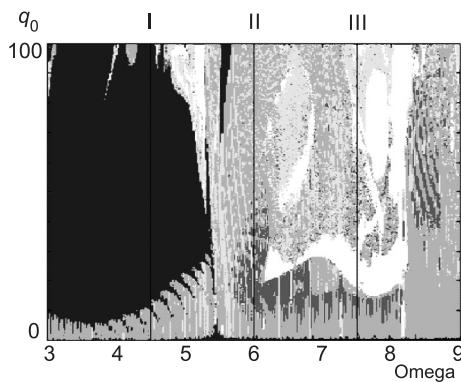


Рис. 2. Карта характера колебаний. Нагрузка приложена к четырем центральным отрезкам балки

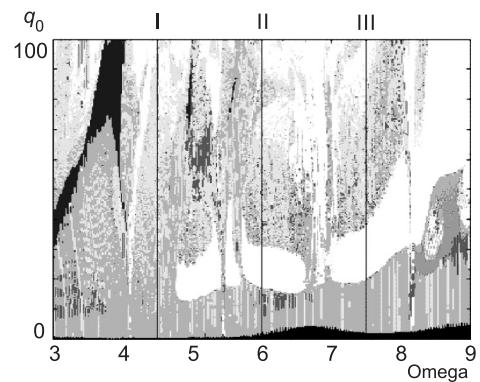


Рис. 3. Карта характера колебаний. Нагрузка приложена к четырем отрезкам балки, смещенным относительно ее центра (отрезки приложения с 8 по 12)

При дальнейшем движении по амплитуде внешнего воздействия обнаружены обширные области хаотических колебаний, следовательно, увеличение амплитуды внешнего динамического воздействия приводит систему в нестабильное состояние.

Карта характера колебаний (см. рис. 2) для нагрузки, приложенной к четырем центральным отрезкам балки, показывает, что подобное воздействие более благоприятно влияет на ее поведение.

Так, при частоте внешнего воздействия, меньшей собственной частоты, лишь при небольших значениях амплитуды возбуждающей силы  $0,5 < q_0 \leq 10\,000$  наблюдается неустойчивое поведение системы (появляются зоны независимых частот). В остальном колебания системы носят гармонический характер для всех значений амплитуды внешнего воздействия. С увеличением частоты нагрузки появляются зоны независимых частот и зоны бифуркаций Андронова–Хопфа. С ростом амплитуды в данном диапазоне частот возбуждающей силы обнаруживаются зоны хаотических колебаний, но они заметно меньше хаотических зон при нагрузке балки по всей длине.

Рассмотрим далее карту характера колебаний системы, соответствующую нагрузке, приложенной к четырем отрезкам балки, смещенным относительно ее центра. Такой метод приложения нагрузки приводит к нестабильным режимам работы системы уже при небольших значениях амплитуды и частоты внешней знакопеременной силы. Лишь при значе-

ниях амплитуды возбуждающей силы, не превышающих  $q_0 = 2,5$ , колебания системы носят затухающий характер. Дальнейший рост управляющего параметра приводит к появлению зоны независимых частот, зоны бифуркаций Андронова–Хопфа. Также обнаруживаются значительные зоны хаотических колебаний.

Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение количества отрезков, к которым приложена внешняя знакопеременная нагрузка, влечет скорейший переход системы к нестабильным режимам работы. Также пагубно на характер колебаний системы влияет смещение зон приложения внешней возбуждающей силы относительно ее центра.

Анализ карт характера колебаний подтверждает вывод<sup>7</sup> о том, что сценарии перехода колебаний балки от гармонических к хаотическим существенно изменяются в зависимости от набора управляющих параметров. В работе показано, что явление турбулентности имеет место не только для задач гидродинамики, но и для задач строительной механики. При численном моделировании колебаний шарнирно опертой балки был обнаружен пространственно-временной хаос. Также с помощью аппарата вейвлет-анализа было показано, что пространственно-временной хаос может наступать в системе не только при изменении управляющих значений (амплитуды и частоты локальной знакопеременной внешней нагрузки в нашем случае), но и при их фиксированном значении с течением времени.

Построенные в работе карты характера колебаний позволяют выявлять наиболее благоприятные режимы работы динамической системы зависимости от амплитудно-частотных характеристик нагрузки. Это дает возможность подбора управляющих параметров нагрузки для стабилизации динамических характеристик колебательных процессов, что в свою очередь позволяет избежать негативных последствий вплоть до разрушения строительных конструкций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Krysko, V.A. Nonlinear dynamics of continuous elastic systems [Текст] / V.A. Krysko, J. Awrejcewicz, A. Vakakis // Springer. — 2004. — 341 с.
2. Krysko, V.A. Chaos in Structural Mechanics [Текст] / V.A. Krysko, J. Awrejcewicz // Springer. — 2008. — 400 p.
3. Awrejcewicz, J. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 1 [Текст] / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, I.V. Papkova, V.A. Krysko // Mathematical models and solution methods, Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 45 (2012), 687–708.
4. Awrejcewicz, J. Routes to chaos in continuous mechanical systems: Part 2 [Текст] / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, I.V. Papkova, V.A. Krysko // Modelling transitions from regular to chaotic dynamics. Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 45 (2012), 709–720.

КРЫЛОВА Екатерина Юрьевна, асп.; E-mail: kat.krylova@bk.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина  
ЖИГАЛОВ Максим Викторович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ZhigalovM@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина  
ПАПКОВА Ирина Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, доц.; E-mail: ikravzova@mail.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

КРЫСЬКО Вадим Анатольевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tak@sus.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

**Krylova Ekaterina Yur'evna**, post-graduate student; E-mail: kat.krylova@bk.ru, Saratov State Technical University, Russia  
**Zhigalov Maksim Viktorovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ZhigalovM@yandex.ru, Saratov State Technical University, Russia  
**Papkova Irina Vladislavovna**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor; E-mail: ikravzova@mail.ru, Saratov State Technical University, Russia  
**Krysko Vadim Anatol'evich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: tak@sun.ru, Saratov State Technical University, Russia

## **MATHEMATICAL MODELING AND PREDICTION OF CHARACTER OF NONLINEAR FLUCTUATIONS OF FLEXIBLE BEAMS**

Mathematical model of nonlinear dissipative beams oscillations is based on the hypothesis of Bernoulli–Euler in consideration of nonlinear dependence between deformations and displacements in the Karman's form. The software package is developed for investigation of the behavior of geometrically nonlinear beams under influence of alternating cross loading. Which allows to get a signal, the phase portrait, Poincaré section, the Fourier power spectrum, two-dimensional and three-dimensional wavelet spectrum, high Lyapunov exponent and autocorrelation function on basis of solution of the differential problem. In the article we propose to predict beams oscillations on the basis of oscillations character maps which are constructed with a glance of different options of control parameters.

In article considered the phenomenon of space-time chaos in oscillations of mechanical systems for the first time in structural mechanics. Also shown that scenarios of transition oscillations from harmonic to chaotic vary considerably depending on the applications character of locally alternating loading.

**Key words:** beams, nonlinear oscillations, strange attractor, chaos, dissipative systems, loss of stability, beam Bernoulli-Euler, the wavelet analysis.

### REFERENCES

1. Krysko, V.A. Nonlinear dynamics of continuous elastic systems [Text] / V.A. Krysko, J. Awrejcewicz, A. Vakakis // Springer. — 2004. — 341 c.
2. Krysko, V.A. Chaos in Structural Mechanics [Text] / V.A. Krysko, J. Awrejcewicz // Springer. — 2008. — 400 p.
3. Awrejcewicz, J. Routes to chaos in continuous mechanical systems. Part 1 [Text] / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, I.V. Papkova, V.A. Krysko // Mathematical models and solution methods, Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 45 (2012), 687–708.
4. Awrejcewicz, J. Routes to chaos in continuous mechanical systems: Part 2 [Text] / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, I.V. Papkova, V.A. Krysko // Modelling transitions from regular to chaotic dynamics. Chaos, Solitons & Fractals. Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 45 (2012), 709–720.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:620.194

В.С. ЛЕСОВИК, А.В. САВИН, Н.И. АЛФИМОВА

### СТЕПЕНЬ ГИДРАТАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ КАК ФАКТОР КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ\*

В последние годы в России разработана широкая номенклатура высокоэффективных малоклинкерных композиционных вяжущих (КВ), где в качестве кремнеземсодержащего компонента (КСК) используется сырье различного генезиса. Повышение в процессе помола активности КСК способствует связыванию портландита, что в свою очередь приводит к снижению рН жидкой фазы бетона, изготовленного на основе композиционных вяжущих и его защитных свойств по отношению к арматуре.

В связи с чем были рассмотрены особенности проявления реакционной активности кремнеземсодержащих компонентов различного генезиса с точки зрения применения их в железобетонных конструкциях в составе композиционных вяжущих и влияния их на сохранность арматурной стали и долговечность бетонов.

**Ключевые слова:** композиционные вяжущие, техногенное сырье, гидравлическая активность, коррозия арматуры.

В последние годы в России разработана широкая номенклатура высокоэффективных малоклинкерных композиционных вяжущих (КВ). Анализ работ В.Г. Батракова, Ш.Т. Бабаева, Н.Ф. Башлыкова, Ю.М. Баженова, В.С. Лесовика, Л.А. Малининой, М. Кокубу, В.М. Мальхотры, Р.В. Лесовика и др. показывает, что применение КВ позволяет радикально снизить расход клинкера при сохранении его активности либо значительно улучшить свойства бетона при сохранении расхода вяжущего.

Принцип получения композиционных вяжущих основан на тонком измельчении товарных портландцементов или клинкера с суперпластификаторами и минеральными кремнеземсодержащими добавками как природного (кварцевый песок, трепел, опока, перлит и т.д.), так и техногенного происхождения (шлаки, золы, отсевы дробления и т.д.). При этом установлено, что качественные характеристики кремнеземсодержащего компонента (КСК) оказывают существенное влияние на процессы структурообразования, протекающие в вяжущем, и свойства изделий на их основе<sup>1</sup> [1–4].

Одним из критериев оценки эффективности КСК является гидравлическая и пущолановая активность, которая возрастает с повышением степени дисперсности, дефектности кристаллической решетки минера-

\* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, грант № 14.B37.21.1487 и гранта Президента Российской Федерации МК-5667.2013.8.

<sup>1</sup> Строкова В.В., Жерновский И.В., Фоменко Ю.В. О влиянии размерных параметров полиморфных модификаций кварца на его активность в композиционных вяжущих // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2007. № 3. С. 72–73.

лов, наличием газовых включений, содержания аморфного кремнезема и др. Пуццолановая реакция характерна тем, что уже при комнатной температуре наблюдается отвердение смеси из пуццолана, гидроксида кальция и воды. Хотя в природных и техногенных песках пуццоланы как таковые отсутствуют, при высокой степени дисперсности и механохимической активации происходит переход части минерального кристаллического материала в аморфное. В результате в силу приобретенного запаса свободной энергии и термодинамической неустойчивости аморфизированные частицы неклинкерных компонентов могут проявлять активность.

А.В. Волженский установил<sup>2</sup>, что основные факторы, определяющие гидравлическую активность песков, — дисперсность, гранулометрия частиц материала и содержание в них стеклофазы. Данные показатели становятся значимыми величинами их гидравлической активности. Кроме этого существенную роль играет наличие в составе КВ сухого суперпластификатора, так как присутствие последнего в гидратирующихся цементных системах способно каталитически трансформировать кинетику взаимодействия гидроксида кальция и активных составляющих минеральной добавки. Однако помимо указанных выше факторов большое значение имеет генезис кремнеземсодержащего компонента. Анализ изменения свойств композиционных вяжущих на основе различных генетических видов кварцевого сырья показал, что причину существенного различия реакционной активности кварца необходимо искать в его фазовой гетерогенности, которая может проявляться в присутствии различных полиморфных модификаций кристаллического кремнезема [2].

Повышение активности кварцсодержащих компонентов КВ способствует связыванию выделяющегося в процессе гидратации портландита с образованием дополнительных гидросиликатов кальция, что в свою очередь приводит к снижению pH жидкой фазы бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре.

В связи с этим и были рассмотрены особенности проявления реакционной активности кремнеземсодержащих компонентов различного генезиса с точки зрения применения их в железобетонных конструкциях в составе композиционных вяжущих и влияния их на сохранность арматурной стали и долговечность бетонов. В качестве объектов исследования выступали отсевы дробления кварцитопесчаника Лебединского ГОК зеленосланцевой степени метаморфизма и кварцевого песка осадочного происхождения.

С целью выявления природы и кинетики связывания гидроксида кальция тонкодисперсными природными и техногенными песками была определена их гидравлическая активность. Сущность методики заключалась в определении количества несвязанной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в насыщенном растворе извести титрованием, по данным анализа кривых сорбции—десорбции, а также путем подсчета остаточных негидратированных зерен в полированных шлифах образцов мелкозернистого бетона по окулярной сетке под микроскопом (табл. 1).

Определение гидравлической активности исследуемых материалов показало, что природные и техногенные пески относятся к группе слабоактивных модификаторов.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что активность песков по связыванию  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  сильнее проявляется при пропаривании проб (ускоренная методика) при  $t = 85^\circ\text{C}$ . Очевидно, для расчета нецеле-

<sup>2</sup> Волженский А.В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетона // Бетон и железобетон. 1990. № 10. С. 16–17.

Таблица 1  
Гидравлическая активность тонкомолотых песков

Наименование кремнеземсодержащего компонента	Удельная поверхность $S_{уд}$ , $\text{м}^2/\text{г}$	Гидравлическая активность, $\text{м}^2/\text{г}$	
		по ускоренной методике НИИЖБ	титрование
Кварцевый песок Сычевского карьера	480	33,8	23,5
Отсев дробления кварцитопесчаника Лебединского месторождения	337	34,1	22,2
	420	39,5	28,3
	508	48,7	36,1

сообразно использовать эту характеристику активности, так как, с одной стороны, диффузионное торможение процесса связывания минимально, а с другой — он ограничен временем испытания (1 мес). Полученные значения активности не коррелируют с результатами изменения pH жидкой фазы бетонов на КВ, полученными в других работах В.Н. Юнга, Г.М. Рущука, П.И. Барыкина. Кроме количественных характеристик активности минеральных модификаторов, большую роль играют и качественные характеристики, т.е. продукты новообразований, так как высокие и среднеосновные гидросиликаты ( $\text{Ca}/\text{Si} > 1,5$ ), в отличие от низкоосновных ( $\text{Ca}/\text{Si} < 1,5$ ), формируют высокощелочную среду,  $\text{pH} \geq 11,80$  даже при отсутствии в системе запаса свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , об этом свидетельствуют результаты, приведенные ниже.

Степень гидратации является одним из важных критериев оценки состояния бетона в контексте его защитных свойств по отношению к арматуре, так как позволяет количественно зафиксировать запас клинкерного фонда в сформировавшемся цементном камне бетона. Она определялась с помощью рентгенометрического анализа. Для испытаний были подготовлены образцы из ТМЦ-50, ВНВ-50 с использованием отсева дробления кварцитопесчаника и кварцевого песка, в качестве контрольного выступал ЦЕМ I 42,5 Н. Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях и в условиях тепловлажностной обработки (по режиму 3+6+3 при  $t = 80^\circ\text{C}$ ). Степень гидратации для образцов, прошедших тепловлажностную обработку, определялась сразу после нее, затем через 28 сут, 3 и 6 мес хранения в камере нормального твердения и для образцов без пропаривания — через 7, 28 сут, 3 и 6 мес хранения в нормальных условиях.

Сущность рентгенометрического определения степени гидратации заключается в установлении уменьшения высоты дифракционной линии с  $d = 1,76 \text{ \AA}$  алита в цементном камне по сравнению с этой линией в негидратированном цементе. Степень гидратации определялась двумя способами:

- по интегральной интенсивности линии алита  $\text{C}_3\text{S}$ ;
- по максимуму интенсивности линии  $1,76 \text{ \AA}$ , принадлежащей алиту —  $\text{C}_3\text{S}$ .

Анализ полученных данных (табл. 2) показал, что степень гидратации образцов после пропаривания выше, чем при твердении в нормальных условиях для всех видов вяжущих во все сроки испытания. Наиболее активными по степени гидратации алита являются составы ТМЦ-50. ВНВ-50 несколько уступают в активности остальным рассматриваемым вяжущим. Процесс гидратации всех исследуемых вяжущих идет активно

Таблица 2

## Результаты определения степени гидратации (%) композиционных вяжущих

Условия твердения	Возраст	ЦЕМ I 42,5 Н	Вид вяжущего			
			ТМЦ-50	ВНВ-50	ТМЦ-50	ВНВ-50
			Отсев дробления кварцитопесчаника		Кварцевый песок	
Нормальное твердение	7 сут	57/40	68/47	54/52	68/39	63/48
	28 сут	72/48	74/51	61/54	83/51	80/52
	3 мес	73/51	78/65	70/57	86/60	81/64
	6 мес	83/55	81/69	84/66	92/61	82/65
ТВО	1 сут	71/47	76/55	66/59	76/36	80/58
	28 сут	83/57	85/57	70/64	79/38	81/64
	3 мес	84/70	87/64	83/67	84/56	82/68
	6 мес	85/78	93/68	84/68	93/58	84/70

П р и м е ч а н и е. Над чертой — значения степени гидратации, определенные по интегральной интенсивности линии  $1,76 \text{ \AA C}_3\text{S}$ , под чертой — то же, по максимуму интенсивности линии.

в начальные сроки твердения до 28 сут, после чего интенсивность процесса существенно снижается и в 3, и 6 мес изменения очень незначительны. Наибольшая активность процессов гидратации образцами из ТМЦ-50, видимо, связана с эффектом раздвижки частиц клинкерных минералов, что инициирует увеличение площади соприкосновения клинкерных минералов и воды, результатом которого является расширение пространства, в котором накапливаются продукты гидратации. Это в конечном результате усиливает кинетический процесс углубления степени гидратации алита и цемента в целом. Особенности процессов гидратации ВНВ-50 объясняются наличием в их составах водорастворимых органических соединений (в нашем случае СП-1). Последние, адсорбируясь на поверхности гидратационно-активных частиц клинкерных минералов и других аморфных кремнеземистых веществ, временно препятствуют химическому взаимодействию их с водой затворения, т.е. замедляют процесс смачивания сильно развитой поверхности вяжущего. В результате уменьшается количество воды затворения, необходимой для получения нормальной концентрации теста на основе суперпластификатора. Максимальное сближение гидратирующихся частиц вяжущего в единице объема создает условия для протекания химических и физико-химических процессов в стесненном объеме.

Тем не менее за счет повышения вязкости воды в тонких прослойках ее подвижность и, следовательно, скорость миграции к поверхностным слоям частиц вяжущего снижается, что, в свою очередь, сопровождается замедлением процессов их химического взаимодействия, т.е. изменяется кинетическая закономерность процессов гидратации. Кроме этого необходимо отметить, что расстояние между частицами в системе «суперпластификатор — вода» минимально и свободное пространство заполняется ультрамелкими частицами минеральной добавки, взаимодействующими с продуктами гидратации клинкерных минералов с образованием дополнительных порций низкоосновных гидросиликатов кальция типа  $\text{C-S-H(I)}$ .

В целом значения степени гидратации КВ сопоставимы со степенью гидратации обычного портландцемента, однако негидратированный запас клинкерного фонда в них значительно меньше, чем представлено в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты определения негидратированного запаса клинкерного фонда в композиционных вяжущих**

Возраст	Вид вяжущего				
	ЦЕМ I 42,5 Н	ТМЦ-50	ВНВ-50	ТМЦ-50	ВНВ-50
		Отсев дробления кварцитопесчаника	Кварцевый песок		
Нормальное твердение	17/45	9,5/15,5	8/17	4/19,5	5,4/10,5
ТВО	15/22	8,5/16	8/16	3,5/21	4,8/9

П р и м е ч а н и е. Над чертой — значения негидратированного запаса, определенные по интегральной интенсивности линии  $1,76 \text{ \AA C}_3\text{S}$ , под чертой — то же, по максимуму интенсивности линии.

Анализируя полученные данные, можно констатировать, что белгородский портландцемент и исследованные композиционные вяжущие по запасу клинкерного фонда способны длительно сохранять защитные свойства бетонов на их основе по отношению к арматуре.

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что композиционные вяжущие, изготовленные с использованием кварцевого песка и отсевов дробления кварцитопесчаника, способны пассивировать стальную арматуру, если степень гидратации после раннего инкубационного периода стабилизируется к шести месяцам и достигнет значений 80–85 % с остаточным запасом клинкерного фонда 5–6 %. Система с такими количественными гидратационными характеристиками способна к самовосстановлению против деструктивных явлений. Превышение системой этих предельных значений, очевидно, приводит к заметной деградации бетона с исчерпанием клинкерного фонда и, в конечном счете, к потере бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лесовик, Р.В. Характеристика матрицы вяжущих в зависимости от состава ТМЦ и ВНВ [Текст] / Р.В. Лесовик, В.В. Стрекова, Ю.Н. Черкашин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2006. — № 1. — С. 26.
- Лесовик, Р.В. Выбор кремнеземсодержащего компонента композиционных вяжущих веществ [Текст] / Р.В. Лесовик, И.В. Жерновский // Строительные материалы. — 2008. — № 8. — С. 78–79.
- Лесовик, В.С. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих [Текст] / В.С. Лесовик, Н.И. Алфимова, Е.А. Яковлев, М.С. Шейченко // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2009. — № 1. — С. 30–33.
- Бондаренко, А.И. Оценка влияния кварца различного происхождения на свойства ВНВ [Текст] / А.И. Бондаренко, Ю.В. Фоменко, И.В. Жерновский, В.В. Стрекова // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2012. — № 3. — С. 41–44.

**ЛЕСОВИК** Валерий Станиславович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**САВИН** Алексей Владимирович, инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**АЛФИМОВА** Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 16.11.12

**Lesovik Valery Stanislavovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Savin Aleksey Vladimirovich**, engineer, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Alfimova Nataliya Ivanovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **THE DEGREE OF HYDRATION COMPOSITE BINDING AS A FACTOR OF CORROSION REINFORCEMENT IN CONCRETE**

The last years, Russia has developed a wide range of high-performance composite binding containing few clinker, where the raw materials are used components containing silica of various genesis. Increase in grinding component containing silica promotes ligature of portlandite, which in turn leads to a decrease in the pH of the liquid phase of the concrete made on the basis of composite binding and its protective properties with respect to the armature.

In connection with what were considered features of display reactivity silica components of different genesis from the point of view of their application in reinforced concrete structures in the composite binding and their impact on the safety of reinforcing steel and concrete durability.

**Key words:** compositional binding agent, technogenic raw materials, hydraulic activity, reinforcement corrosion.

### REFERENCES

1. Lesovik, R.V. Characteristic matrix binders depending on the composition of inventories and VNV [Text] / R.V. Lesovik, V.V. Strokova, Yu.N. Cherkashin // Building materials, equipment, technologies of XXI century. — 2006. — N 1. — P. 26.
  2. Lesovik, R.V. Choice of containing silica component composite binders [Text] / R.V. Lesovik, I.V. Zhernovsky // Building materials. — 2008. — N 8. — P. 78–79.
  3. Lesovik, V.S. To the problem of increasing the efficiency of composite binders [Text] // V.S. Lesovik, N.I. Alfimova, E.A. Yakovlev, M.S. Sheychenko // Bulletin of the Belgorod Shukhov State Technological University. — 2009. — N 1. — P. 30–33.
  4. Bondorenko, A.I. Assessing the impact of quartz of different origin on the properties VNV [Text] / A.I. Bondorenko, Yu.V. Fomenko, I.V. Zhernovsky, V.V. Strokova // Bulletin of the Belgorod Shukhov State Technological University. — 2012. — N 3. — P. 41–44.
-

УДК 691.327:666.973.6.001

А.Н. ХАРХАРДИН, Л.А. СУЛЕЙМАНОВА

## РЕВЕРС ВОДООТДЕЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Дается решение задачи о водоотделении ячеистобетонных смесей при выдержке после перемешивания в поле гравитации и выталкивающей силы Архимеда с целью оптимизации состава и структуры ячеистых бетонов.

Ключевые слова: ячеистобетонные смеси, ячеистые бетоны, водоотделение, структура.

Опыт получения ячеистых бетонов показывает, что выдержка после приготовления портландцементных ячеистобетонных смесей в течение некоторого времени сопровождается образованием жестких пространственных структур. Процесс коагуляции частиц твердой дисперсной фазы в это время приводит к вытеснению микрообъемов и к уменьшению толщины прослоек воды, располагаемых между ее частицами, и на конечной стадии — к непосредственному контакту частиц твердой фазы с образованием объемных конденсационно-кристаллизационных жестких обратимых структур. Наряду с этим может протекать и процесс «ложного» схватывания цемента, который характеризуется загустеванием или потерей пластичности смеси сразу же после перемешивания. «Ложное» схватывание, по мнению большинства исследователей, связано с дегидратацией двухводного гипса при хранении или при помоле цемента, когда температура его достигает 120 °С и выше. При этом двухводный гипс переходит в полуводный, который при затворении цемента водой значительно быстрее ведет к пересыщению сульфатом кальция [1]. Повторное перемешивание приводит к разрушению структур и к разжижению таких систем до исходного однородного состояния ячеистобетонных смесей. В поле гравитации и выталкивающей силы Архимеда избыточное содержание воды отделяется от структурного каркаса твердых фаз. Если гравитационная сила структурного каркаса больше выталкивающей силы, то его поверхность покрывается водным слоем, если она меньше выталкивающей силы, то структурный каркас всплывает и располагается над поверхностью избыточного содержания воды.

Чаще всего в момент получения пены количество жидкости в ней обычно значительно превосходит то, которое должно соответствовать гидростатическому равновесию пены. Поэтому уже при образовании пены (или сразу после формирования) происходит выделение жидкости из пены — синерезис пены. Избыточная жидкость из пленок пены вытекает в каналы и по каналам стекает из верхних слоев пены в нижние в направлении поля силы тяжести до тех пор, пока градиент капиллярного давления не уравновесит действия силы тяжести [2].

Запишем баланс по массе компонентов в 1 м<sup>3</sup> ячеистобетонной строительной смеси с учетом коэффициента взаимодействия фаз  $k_{\text{в}}$  [3] и коэффициента  $k = 1,1$ , учитывающего усадку структурного каркаса и содержание трудноудаляемой влаги (до 10 % от массы цемента) при суш-

ке изделий, находящейся между тоберморитовыми слоями [4] в цементном камне, исключая незначительную массу добавок и воздушных пор:

$$m_{\text{ц}} + m_{\text{в}} + m_3 = k \cdot k_{\text{в}} (1,25 m_{\text{ц}} + m_3) + (m_{\text{в}} - 0,25 m_{\text{ц}}) / k \cdot k_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{ц}}$ ,  $m_{\text{в}}$ ,  $m_3$  — содержание по массе в 1 м<sup>3</sup> ячеистобетонной смеси соответственно цемента, воды затворения при данном водоцементном отношении (В/Ц) и наполнителя;

$(0,2 \dots 0,25) \cdot m_{\text{ц}}$  — расход воды на гидратацию цемента, в ячеистобетонных смесях расход воды на гидратацию цемента с учетом воды, содержащейся между тоберморитовыми слоями в цементном камне, составляет  $(0,15 + 0,1) \cdot m_{\text{ц}}$ ;

$1,25 m_{\text{ц}}$  — суммарный расход цемента и воды, необходимой для его гидратации;

$k_{\text{в}}$  — коэффициент взаимодействия фаз — коэффициент водоудерживающей способности твердой дисперсной фазы в ячеистобетонных смесях; коэффициент  $k = 1,1$ , а объем ячеистого бетона  $V_b = V_p / k = V_p / 1,1$ .

Коэффициент водоудерживающей способности  $k_{\text{в}}$  зависит от содержания твердой дисперсной фазы (цемента и наполнителя) в ячеистобетонной смеси, ее дисперсности и адсорбционной способности, водоцементного отношения (В/Ц), рыхлого или плотного состояния его объемной конденсационно-кристаллизационной структуры и других менее значимых факторов. Чем больше отношение массы воды к массе цемента (В/Ц) в строительном растворе, тем меньше коэффициент  $k_{\text{в}}$ . Основываясь на результатах исследования структурообразующих элементов и состава портландцементного пенобетона, величина коэффициента взаимодействия в нем твердой и жидкой фазы [3]  $k_{\text{в}} = 1,124$  получена для состояния цементного геля при В/Ц = 0,38, а при В/Ц = 0,28 величина  $k_{\text{в}} = 1,2486$  и находится в соответствии с результатом  $k_{\text{в}} = 1,25$  для относительной плотности воды в адсорбционном слое<sup>1</sup>. Выражение коэффициента взаимодействия в зависимости от В/Ц отношения для высоких и низких его значений соответственно можно получить в виде:

$$k_{\text{в}} = 1 + 0,124 \cdot 0,38 / (\text{В/Ц}) = 1 + 0,04712 / (\text{В/Ц}),$$

$$k_{\text{в}} = 1 + 0,253 \cdot 0,28 / (\text{В/Ц}) = 1 + 0,0696 / (\text{В/Ц}).$$

Первое слагаемое в правой части выражения (1) представляет массу твердой фазы и воды, необходимой на гидратацию цемента, и воды, удерживаемой структурой ячеистобетонного каркаса. Второе слагаемое — количество несвязанной, избыточной воды, отделяемой от структурного массива ячеистого бетона.

Разделим обе части равенства (1) на объем ячеистобетонной смеси  $V_p$ :

$$V_p = \frac{m_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{m_3}{\rho_3} + \Pi = 1 \text{ м}^3,$$

где  $\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_3$  — соответственно плотность цемента, воды, наполнителя;  $\Pi$  — объемная доля (пористость), либо объем пор в 1 м<sup>3</sup> ячеистобетонной

смеси, тогда  $\frac{m_{\text{ц}} + m_{\text{в}} + m_3}{V_p} = \frac{(1,25 \cdot m_{\text{ц}} + m_3)}{V_p / (1,1 \cdot k_{\text{в}})} + \frac{(m_{\text{в}} - 0,25 \cdot m_{\text{ц}})}{1,1 \cdot k_{\text{в}} \cdot V}$ .

<sup>1</sup> Поверс Т.С. Физическая структура цементной пасты. Химия цемента / Под ред. Х.Ф. Тейлора. М., 1969. 247 с.

В процессе коагуляции твердой фазы и образования структурного каркаса ячеистого бетона в левой части этого выражения остаются только лишь показатели для массы и объема воды, где  $\rho_p \rightarrow \rho_b$ . Упростим это выражение с учетом, что первое слагаемое в правой части равенства представляет среднюю плотность ячеистого бетона, примерный объем которого:  $V_b = V_p / 1,1$ , а  $V_p = 1 \text{ м}^3$ .

Тогда

$$\rho_p = k_b \cdot \gamma_6 + \frac{(B / \Gamma - 0,25) \cdot m_u}{1,1 \cdot k_b}, \quad (2)$$

где  $\rho_p$  — плотность ячеистобетонной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$m_u$  — расход цемента в кг на  $1 \text{ м}^3$  ячеистобетонной смеси.

Из выражения (2) следует, что плотность ячеистобетонной смеси определяется средней плотностью жесткого структурного каркаса твердых фаз и избытка воды, которые создают условия для реверса ее водоотделения.

Для получения условий реверса водоотделения ячеистобетонного структурного массива (квазитвердой фазы) распределим силы, действующие на него в водной среде (см. рисунок).

На квазитвердую фазу в ячеистобетонной смеси (в воде при ее отделении) действуют выталкивающая сила Архимеда —  $f_{Ap}$ , гравитационная сила оседания структурного каркаса —  $f_{rb}$  и  $f_{rw}$  — гравитационная сила воды при его выталкивании (подъеме),  $\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$ :

$$F = f_{Ap} - f_{rb} - f_{rw}.$$

Раскрывая каждый член этого равенства, получим

$$F = \rho_b \cdot g \cdot V_b - k_b \cdot \gamma_6 \cdot g \cdot V_b - \frac{g \cdot V_b \cdot (B / \Gamma - 0,25) \cdot m_u}{k_b \cdot k_b},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения тел,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\rho_b$  — плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Упрощая полученное выше выражение, приходим к уравнению (2), которое можно записать в виде равновесной относительной силы:

$$F / g \cdot V_b = \rho_b - \left[ k_b \cdot \gamma_6 + \frac{(B / \Gamma - 0,25)m_u}{1,1 \cdot k_b} \right]. \quad (3)$$

Это выражение можно привести к виду

$$f = \rho_b - [k_b \cdot \gamma_6 + \Delta B]. \quad (4)$$

Анализ полученного уравнения (4) показывает:

если  $\rho_b = [k_b \cdot \gamma_6 + \Delta B]$  — водоотделение отсутствует;

если  $\rho_b > [k_b \cdot \gamma_6 + \Delta B]$  — происходит водоотделение вниз под поверхность ячеистобетонного структурного каркаса и выталкивание его над поверхностью слоя воды;

если  $\rho_b < [k_b \cdot \gamma_b + \Delta B]$  — происходит водоотделение вверх над поверхностью ячеистобетонного структурного каркаса, где  $B$  — избыточное содержание воды в ячеистобетонной смеси, необходимое для дополнительного создания пор, его подвижности, пористости и влажности.

Так, например, для газобетона со средней плотностью 700 кг/м<sup>3</sup>, имеющего в своем составе цемента — 350 кг/м<sup>3</sup>, воды — 350 л, определим расход кварцевого песка с модулем крупности менее 1,2.

Найдем массу цементного камня без учета трудноудаляемой влаги:

$$m_{цк} = \left( \frac{m_u}{\rho_u} + \frac{m_b}{\rho_b} \right) \rho_{цк} = \left( \frac{350 \text{ кг}}{3150 \text{ кг/м}^3} + \frac{0,25 \cdot 350 \text{ л}}{1000 \text{ л/м}^3} \right) 2100 \text{ кг/м}^3 = 417 \text{ кг},$$

где  $\rho_u$  — плотность портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н,  $\rho_u = 3150 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{цк}$  — плотность цементного камня, согласно [3, 4],  $\rho_{цк} = 2000\dots 2200 \text{ кг/м}^3$ .

С учетом трудноудаляемой воды, находящейся между тоберморитовыми слоями в цементном камне,  $m_{цк} = 1,1 \cdot 417 \text{ кг} = 458 \text{ кг}$ .

Расход кварцевого песка при этом составит  $m_3 = 700 - 458 = 242 \text{ кг/м}^3$ .

Коэффициент водоудерживающей способности

$$k_b = 1 + 0,04712 / (350 / 350) = 1,04712.$$

Равновесная относительная сила

$$f = 1000 - [1,04712 \cdot 700 + (1 - 0,25) \cdot 350 / (1,04712 \cdot 1,1)] = 39 \text{ кг/м}^3.$$

Так как  $\rho_b > [k_b \cdot \gamma_b + \Delta B]$  на 39 кг/м<sup>3</sup>, то произойдет водоотделение вниз и выталкивание влажного структурного каркаса ячеистого бетона над поверхностью слоя воды.

Полученные результаты и выводы могут быть использованы для оптимизации структуры и состава ячеистого бетона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Пашенко, А.А. Вяжущие материалы [Текст] / А.А. Пашенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская. — Киев : Вища школа, 1975. — С. 255–256.
- Кругляков, П.М. Пены и пенные пленки [Текст] / П.М. Кругляков, Д.Р. Ексерова. — М. : Химия, 1990. — 432 с.
- Хархардин, А.Н. Расчет структурообразующих элементов и состава портландцементного пенобетона. Ч. 1 [Текст] / А.Н. Хархардин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 31–39.
- Рамачандран, В.С. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение [Текст] / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, Дж. Дж. Бодуэн // пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой ; под ред. В.В. Ратинова. — М. : Стройиздат, 1986. — С. 10–70.

**ХАРХАРДИН Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.**

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

**СУЛЕЙМАНОВА Людмила Александровна, канд. техн. наук, проф.**

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

Получено 29.11.12

**Kharkhardin Anatoly Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Suleimanova Lyudmila Alexandrovna**, candidate of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **WATER SEPARATION REVERSE OF CELLULAR CONCRETE MIXTURES**

The solution of a problem connected with water separation of cellular concrete mixtures at exposure after mixing in the field of gravitation and Archimedes pushing out force for the purpose of optimization of composition and structure of cellular concrete is given.

**Key words:** cellular concrete mixtures, aerated concrete, water separation, structure.

### REFERENCES

1. Pashchenko, A.A. Knitting materials [Text] / A.A. Pashchenko, V.P. Serbin, E.A. Starchevskya. — Kiev : High school, 1975. — P. 255–256.
  2. Kruglyakov, P.M. Foams and foam membranes [Text] / P.M. Kruglyakov, D.E. Ekserova. — M. : Chemistry, 1990. — 432 p.
  3. Kharkhardin, A.N. Calculation of gel-forming elements and the composition of cement foam concrete. Part 1 [Text] / A.N. Kharkhardin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 31–39.
  4. Ramachandran, V.S. Science about concrete. Physical and chemical study of concrete [Text] / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, Y.Y. Beaudoin ; Translation from English T.I. Rosenberg, Yu.B. Ratinova ; edited V.V. Ratinova. — M. : Stroyizdat, 1986. — P. 10–70.
-

УДК 691.55 : 666.914.5

В.А. БЕЗБОРОДОВ, М.В. КУДОМАНОВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Статья посвящена вопросам использования отходов промышленности для производства сухих строительных смесей. В качестве отходов применялись некондиционные и не используемые в настоящее время в строительстве пески.

Установлено, что улучшение данных песков доменным гранулированным шлаком позволяет получить сухие штукатурные смеси с достаточными прочностными характеристиками. Кроме того, использование некондиционного сырья позволяет расширить сырьевую базу в строительной промышленности.

**Ключевые слова:** заполнители, сухая строительная смесь, доменный гранулированный шлак, штукатурка.

В качестве заполнителей строительных смесей (как готовых к употреблению, так и сухих) служат минеральные (природные или искусственно полученные) материалы определенного гранулометрического состава.

Наиболее распространеными и наиболее часто используемыми в составах строительных растворных смесей, в том числе и сухих, являются кварцевые пески. Пригодны также полевошпатовые, известняковые, доломитовые, гранитные, диоритовые и другие пески, которые отвечают требованиям ГОСТ 8736 «Пески для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Заполнители занимают до 80 %, а в некоторых случаях и более объема строительных растворных смесей и позволяют сократить расход минерального вяжущего и уменьшить усадочные деформации цементного камня, которые могут достигать 6...10 мм/м. Заполнители и наполнители в растворе способствуют ослаблению механических напряжений, возникающих в цементном камне вследствие его усадки. Деформации твердеющих смесей цемента при этом снижаются примерно в 10 раз по сравнению с собственными деформациями цементного камня.

Существуют различные мнения по поводу оптимального зернового состава заполнителя. Большинство исследователей считают более эффективным непрерывный зерновой состав заполнителей. Смеси с прерывистым зерновым составом склонны к расслоению [1–3].

Для выбора непрерывного зернового состава заполнителя предлагались различные «идеальные» гранулометрические кривые. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом межзерновых пустот и наименьшей идеальной поверхностью зерен (минимизация может быть выполнена только по одному параметру), то идеальная кривая подбирается из условия, чтобы объем пустот в смеси и суммарная поверхность зерен обеспечивали требуемую подвижность растворной (бетонной) смеси при минимальном расходе вяжущего.

Пустотность заполнителя непосредственно связана с его зерновым составом. Теоретически объем пустот в заполнителе не зависит от крупности его зерен. В действительности, наиболее плотные, как и наименее

плотные упаковки мало вероятны, и на практике имеет место некоторое промежуточное состояние, определяемое степенью уплотнения [4]. Теоретически наиболее плотная упаковка (укладка) шаров характеризуется пустотностью 26,2 %, а наименее плотная — 47,6 %.

Содержание зерен песка крупностью более 2,5 мм для штукатурных работ и более 1,25 мм для отделочных работ не допускается. Аналогичные ограничения на крупность зерен заполнителя для штукатурных растворов содержит и «Свод правил» СП 82-101-98 Госстроя России «Приготовление и применение растворов строительных». Эти ограничения применительно к некоторым составам штукатурных растворов, в частности, к декоративным, требуют корректирования.

В ходе работы были рассмотрены месторождения сырья Тюменской области, используемые в производстве железобетона, и возможность использования сырья для других сопутствующих изделий, а в частности для производства сухих строительных смесей.

Основной проблемой природных запасов юга Тюменского региона является сильная заболоченность, длительные паводки, отсутствие путей сообщения. Разработка месторождений в данных условиях требует значительных капитальных вложений. Поэтому производители сухих строительных смесей в Тюмени вынуждены закупать песок в соседних регионах.

Наличие отходов промышленности давно беспокоит экологов и прочие инстанции, но применение данных материалов ограничено. Поэтому для исследовательской работы были приняты следующие месторождения песка, которые расположены на юге Тюменской области, а именно:

1) песчано-гравийная смесь (пос. Кулаковский), где объем залежи смеси составляет 179 тыс. м<sup>3</sup> с модулем крупности 2,2, но содержащего в своем составе до 7 % глины;

2) песок строительный месторождения (пос. Верхне-Камский) с модулем крупности 2,9, но сильно обводнено и в данный период не разработано и месторождение (пос. Переваловский) с модулем крупности 1,47...1,78, а высота вскрышных работ составит до 4 м;

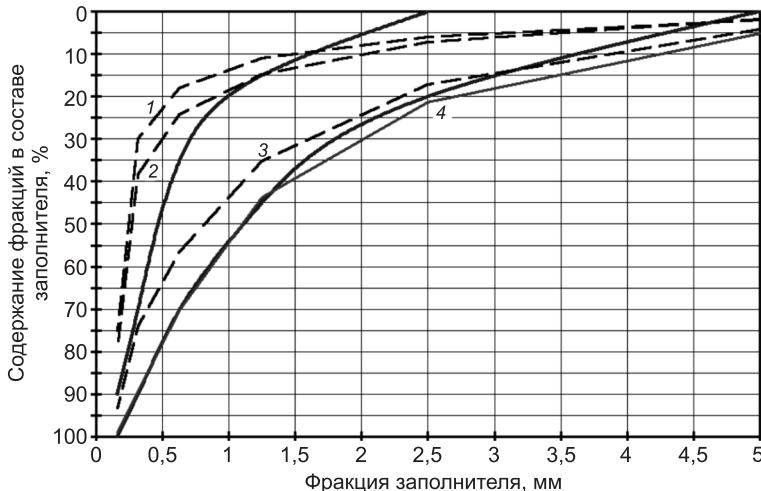
3) песок строительный месторождения оз. Андреевское с модулем крупности 1,8, имеющего в своем составе до 3...4 % ила;

4) песок для силикатных изделий месторождений (пос. Винзили и Боровский) с низким модулем крупности и содержанием пылеватых, илистых и глинистых на 2 % более, чем по нормам.

По предварительным результатам исследований для получения строительных смесей наиболее целесообразно принимать пески месторождения оз. Андреевское. Но для улучшения качества его зернового состава в исследовательской работе были разработаны составы со смешанным заполнителем, используя для этих целей доменный гранулированный шлак.

На рисунке представлен результат рассева смешанного заполнителя при разных соотношениях песка и доменного шлака. Применение доменного гранулированного шлака в качестве одного из компонентов в смешанном заполнителе способствует улучшению качества зернового состава песка, повышая его модуль крупности с 0,9...1,1 до 2,4...2,6, при этом насыпная плотность смеси составляла 1280 кг/м<sup>3</sup>.

Опытным путем доказано, что смесь песка с доменным гранулированным шлаком (ДГШ) г. Нижнего Тагила в соотношении 1:4 имеет соотношение  $d_n/d_{n-1}$ , равное 0,222, что достаточно близко к величине 0,226, полученной многими авторами (И.И. Кандауров, В.С. Лесовик и др.), при



котором выполняется условие получения минимального объема пустот заполнителя.

Ранее в работе Ю.М. Баженова также установлено, что наибольшую плотность имеет смесь при соотношении в ней массовых долей песка крупной и мелкой фракции, равной 70:30, что согласуется с данными других авторов.

Зерновой состав полученной ССС относится к прерывистой гранулометрии. В таких смесях исключены зерновые составы фракций средних размеров 2,5 и 1,25 мм, что обеспечивает меньшую пустотность заполнителя.

Кроме того, подвижность мелких зерен, защемленных между другими более крупными, ограничена и для получения определенной подвижности готовой смеси толщина обмазки цементным тестом должна быть больше, чем у смеси с непрерывистым составом.

В работах П.И. Боженова доказано, что для заполнения пустот нередко затрачивается более 60 % цементного теста от общего его расхода. Причем если меньшая «пленочная» составляющая цементного теста активно участвует в формировании эксплуатационных свойств готового материала, то доля цементного теста, израсходованного на заполнение пустот, практически выполняет механические функции заполнителя. Для более полного использования прочностного потенциала цементного теста структуру материала необходимо формировать с большей долей «пленочной» составляющей цементного теста и, соответственно, меньшей объемной, т.е. меньшим объемом пустот заполнителя.

ДГШ по модулю основности является нейтральным, в котором содержится стеклофазы от 90 до 95 %. Кроме того, использование ДГШ в качестве активного наполнителя в смеси заполнителя способствует повышению качества вяжущего, уменьшает расход дорогостоящих добавок, повышает прочность. Смесь ДГШ с песком позволяет добиться оптимального гранулометрического состава и максимальной упаковки, а кроме того ДГШ является активным минеральным наполнителем.

Второй компонент (кварцевый песок) в строительных смесях в долевом участии превышает содержание всех вместе взятых компонентов, поэтому его качество будет оказывать значительное влияние на строитель-

но-технические свойства растворных смесей и растворов. Доля мелкого песка зависит от назначения и строительно-технических характеристик сухой смеси.

Применяемый мелкий компонент по фракционному составу в зависимости от марки раствора составлял:

— для марки 50 — фр. 0...0,63 — 50...52 %; фр. 0,63...1,25 — 18...20 % и фр. 1,25...2,5 — 28...32 %;

— для марки 100 — фр. 0...0,63 — 27 %; фр. 0,63...1,25 — 36 % и фр. 1,25...2,5 — 37 %.

Распределение частиц по размерам считается оптимальным, так как при таком соотношении получается максимальная упаковка и прочность строительного раствора при этом повышается без увеличения расхода вяжущего.

Кроме компонентов смешанного заполнителя в составе сухих смесей при разработке оптимальных составов использовались также вяжущее и различного рода добавки.

В качестве вяжущего в работе применялся цемент ОАО «Сухоложск-цемент» следующих марок: ШПЦ 400, ПЦ 400 D0 и ПЦ 500 D0, отвечающих требованиям ГОСТ, а также смешанные вяжущие, разработанные в лаборатории ТюмГАСУ и внедренные на производственном комплексе ОАО «Инвест-силикат-строй-сервис» и обладающие следующими характеристиками:

— тонкость помола — остаток на сите № 008 14,8 % и удельная поверхность — 300 м<sup>2</sup>/кг;

— сроки схватывания — начало 2,15 и конец 4,0 ч;

— предел прочности в возрасте 28 сут — при изгибе 0,9 и при сжатии 3,7 МПа.

Возможность получения низкомарочного вяжущего с частичной или полной заменой цемента на ИКС имеется и экономически целесообразна.

В качестве добавок для получения сухих смесей использовались пластифицирующая добавка С-3 и армирующий компонент на основе полипропиленового волокна.

Пластифицирующая добавка С-3 вводилась в состав смесей в количестве 0,25...0,3 % от массы цемента, которая позволяет повысить подвижность смеси, а также снизить водопотребность на 15...20 % без изменения ее подвижности, а для повышения водостойкости штукатурных смесей применялась добавка Лигнопан Б-1 в количестве 0,2 % от массы цемента.

Водоудерживающая способность растворных смесей достигалась за счет введения в ее состав метилцеллюлозы в количестве 0,2 % от массы цемента.

Одним из направлений решения проблемы снижения образования трещин в растворах, а также повышению прочности при растяжении и изгибе является армирование цементного камня волокнистым материалом как органического, так и неорганического происхождения.

В качестве армирующей добавки использовалось полимерное волокно — продукт переработки тары и упаковки. Таким волокнистым материалом является пропиленовое волокно (фибры) гидрофобного характера, имеющее длину волокна 0,3...12 мм, диаметр — 3,0...30,0 мкм, у которого удлинение при разрыве составляет от 15 до 50 %.

Из рассмотренных составных компонентов были подобраны составы для производства сухих штукатурных смесей, которые обладают следующими технологическими свойствами:

— водоудерживающая способность — 98 %;

Контролируемые параметры	Результаты испытаний, сут				
	3	7	14	28	90
Прочность при сжатии, МПа	—	—	12,3	13,5	14,1
Прочность при изгибе, МПа	3,0	3,2	3,4	3,9	4,2
Прочность сцепления, МПа	0,48	0,5	0,52	0,52	0,53

П р и м е ч а н и е. Контрольными характеристиками принимались результаты в 28-суточном возрасте. В период испытаний и по настоящее время на поверхности штукатурки трещины не обнаружены.

- жизнеспособность — не менее 2 ч;
- время высыхания — начало не ранее 6 ч и конец — не позднее 24 ч;
- наносимый слой на отделяемую поверхность составлял 10...15 мм.

Прочностные результаты испытания представлены в таблице.

Штукатурные смеси наполненной композиции позволяют снизить внутренние и внешние (наружные) трещины на поверхности покрытий, снизить концентрацию напряжений, что способствует повышению их трещиностойкости.

Таким образом, на разрабатываемом месторождении оз. Андреевское песок может быть использован для получения штукатурных композиций с использованием армирующих волокон отечественного производства.

В результате исследований установлено, что введение армирующего компонента в состав сухой смеси способствует улучшению качества штукатурного раствора, а именно:

— штукатурный раствор без волокна имеет предел прочности при изгибе 2,6 МПа; предел прочности при сжатии — 13,3 МПа и предел прочности сцепления — 0,35 МПа;

— штукатурный раствор с армирующим волокном имеет предел прочности при изгибе 3,6 МПа; предел прочности при сжатии — 13,0 МПа и предел прочности сцепления — 0,55 МПа.

Опытная партия такой сухой строительной смеси была применена на территории ООО «Зуммер» для проведения штукатурных работ в подземном переходе гостиничного комплекса. Смесь была нанесена на бетонную поверхность перехода, которая в течение ряда лет находится в эксплуатации, при этом нанесенное покрытие периодически подвергается испытанию приборами неразрушающего контроля. На данный период отделанные поверхности перехода находятся в хорошем состоянии и имеют следующие прочностные характеристики: прочность при сжатии — 14,1 МПа; прочность при изгибе — 4,0 МПа и прочность сцепления — 0,54 МПа.

Кроме того, на предприятии ОАО «Инвест-силикат-строй-сервис» по предложенной рецептуре получено смешанное вяжущее, включающее до 60 % портландцемента и известково-кремнеземисто-шлакового вяжущего до 40 % (по объему), что позволяет снизить стоимость вяжущего вещества на 10...15 %. Введение в эти смеси армирующих добавок также приводит к снижению стоимости на 25...30 %, и предлагаемые смеси по своим техническим свойствам не уступают существующим на рынке смесям. Снижение стоимости ССС за счет введения армирующих волокон связано с использованием отходов производств (переработки тары и упаковки), так как в производстве современных ССС используются импортные волокна, цена которых значительно выше, чем армирующие материалы, получаемые на наших предприятиях. Использование отходов полимерной продукции способствует получению ССС с более повышенными требованиями к деформативным свойствам, а именно при использовании полипропиленового волокна в количестве 3 % по массе ведет к сниже-

нию объемной деформации на 20 % по сравнению с контрольными без добавок этого волокна (коэффициент деформации при использовании предлагаемого армирующего материала составляет 0,252, что больше на 10...15 % по сравнению с использованием импортных материалов).

Таким образом, цена разработанных смесей по сравнению с торговыми марками других стран, полученных при одинаковых технологических параметрах, на 25 % дешевле. Поэтому в настоящее время в г. Тюмени возник вопрос о целесообразности производства сухих строительных смесей для штукатурных работ с использованием песков месторождения оз. Андреевское, а также использование отходов полимерной промышленности за счет их утилизации, идущих для производства армирующих материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. — М. : Стройиздат, 1984. — 672 с.
2. Боженов, П.И. Технология автоклавных материалов [Текст] / П.И. Боженов. — Л.: Стройиздат, 1978. — 368 с.
3. Дьяченко, Е.И. Роль зернового состава заполнителя в сухих строительных смесях [Текст] / Е.И. Дьяченко, А.Н. Сушенков // 3-я Междунар. НТК «Современные технологии сухих строительных смесей в строительстве». — СПб., 2001. — С. 83–87.
4. Безбородов, В.А. Сухие смеси в современном строительстве [Текст] / В.А. Безбородов, В.И. Белан и др. — Новосибирск, 1998. — 94 с.

*БЕЗБОРОДОВ Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КУДОМАНОВ Максим Валерьевич, ассист.*

*Тюменский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 27.11.12

**Bezborodov Vladimir Alekseevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kudomanov Maxim Valerievich**, assistant, Tyumen State Architecturally Building University, Russia

#### USE OF THE INDUSTRY FOR MANUFACTURE OF DRY BUILDING VIXES

Clause is devoted to questions of use of waste of the industry for manufacture of dry building mixes. As waste sand sub-standard and not now in use in construction were applied. It is established that improvement of the given sand by the domain granulated slag allows to receive dry plaster mixes with sufficient durability characteristics. Except for that use of sub-standard raw material allows to expand a raw-material base in a building industry.

Key words: fillers, a dry building mix, the domain granulated slag, plaster.

#### REFERENCES

1. Bagenov, Yu.M. Technology of concrete and ferro-concrete products [Text] / Yu.M. Bagenov, A.G. Komar. — M. : Stroyizdat, 1984. — 672 p.
2. Bogenov, P.I. Technology avtoklavnye materials [Text] / P.I. Bogenov. — L. : Stroyizdat, 1978. — 368 p.
3. Djachenko, E.I. Role of grain structure of a filler in dry building mixes [Text] / E.I. Djachenko, A.N. Suchenkov // 3-ja International NTK «Modern technologies of dry building mixes in construction». — SPb., 2001. — P. 83–87.
4. Безбородов, В.А. Dry mixes in modern construction [Text] / В.А. Безбородов, В.И. Белан и др. — Новосибирск, 1998. — 94 p.

УДК 691.56:666.9:620.191.33

В.И. ЛОГАНИНА, М.А. АРИСКИН, Э.Р. АКЖИГИТОВА,  
Н.А. ПЕТУХОВА

## ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОТДЕЛОЧНОГО ШТУКАТУРНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Приведены сведения о результатах расчета напряжений в отделочном штукатурном слое на основе сухой строительной смеси с применением органоминеральной добавки на основе смешанослойных глин. Показано, что значения растягивающих напряжений не превышают когезионную прочность отделочного слоя.

**Ключевые слова:** отделочный штукатурный слой, напряжение, растрескивание.

Для регулирования реологических, технологических свойств покрытий на основе сухих строительных смесей (ССС) в рецептуру вводят тонкодисперсные органоминеральные добавки. В промышленности нашла применение добавка — органобентонит, получаемая модификацией бентонита катионактивной добавкой [1]. Учитывая ограниченность выпуска органобентонита, нами предложена технология получения органоминеральной добавки, заключающаяся в адсорбции органического вещества на смешанослойной глине с повышенным содержанием монтмориллонита [2]. В качестве органического компонента применяли добавки ОП-7 и ОП-10.

Результаты проведенных исследований показали, что отделочный слой на основе ССС с применением органоминеральной добавки обладает устойчивостью к сползанию при нанесении на вертикальную поверхность [3]. На основании проведенных исследований нами разработан состав ССС, содержащий известь-пушонку, кварцевый песок фракций 0,63–0,315 и 0,315–0,14 мм в соотношении соответственно 80:20 %, органоминеральную и полимерную добавки и предназначенный для отделки стен зданий.

В продолжение дальнейших исследований оценена усадочная трещиностойкость отделочного слоя. Известно, что растрескивание покрытий происходит, когда внутренние растягивающие напряжения достигнут значения когезионной прочности материала покрытия, т.е.

$$\sigma = R_{kog}. \quad (1)$$

Таким образом, для оценки монолитности отделочного слоя необходимо изучение напряженного состояния покрытий. В работах Г.И. Горчакова, Л.П. Орентлихер приведена расчетная схема оценки расщепления отделочного слоя [4]. Данная схема была применена для оценки растрескивания отделочного слоя на основе разработанного состава ССС (рис. 1).

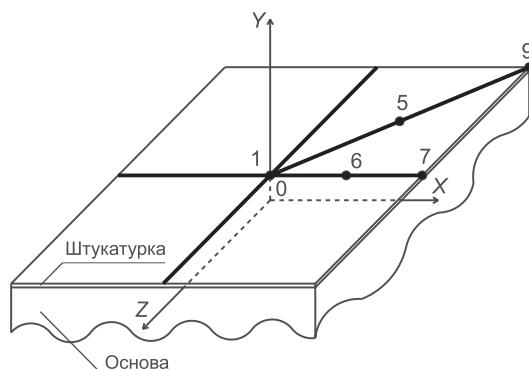


Рис. 1. Расчетная модель отделочного слоя

Был выполнен расчет напряжений, возникающих при усадке отделочного слоя, нанесенного на бетонное основание с помощью программного модуля ANSYS 13.0. Число конечных элементов по высоте отделочного слоя при его толщине 5 мм составляло 10, а при высоте 10 мм — 20. По ширине и длине число конечных элементов — 16.

Рассмотрим случай, когда усадочные проявления основы, на которую нанесен отделочный слой, полностью завершены, т.е. перемещения в зоне контакта отсутствуют. Результаты оценки усадочных деформаций и деформативных свойств образцов штукатурки свидетельствуют, что они составляют  $\varepsilon_{yc} = 0,00027 \text{ мм/мм}$ , модуль упругости  $E_{упр} = 40 \text{ МПа}$ , модуль деформации  $E_{деф} = 24 \text{ МПа}$ , предельная растяжимость  $\varepsilon_{пред} = 0,015 \text{ мм/мм}$ , прочность при растяжении  $R_p = 0,36 \text{ МПа}$ . Расчет выполнен для толщины отделочного слоя 5 и 10 мм. Размеры расчетной модели в плане приняты равными  $800 \times 800 \text{ мм}$ . По результатам расчета в программе ANSYS 13.0 построены графики распределения напряжений (рис. 2–4).

Как показывают результаты расчетов, при толщине отделочного слоя 5 мм напряжения на отрыв по высоте отделочного слоя в краевой зоне (точка 9) в контактном слое составляют  $\sigma_y = 489,15 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$ , а на

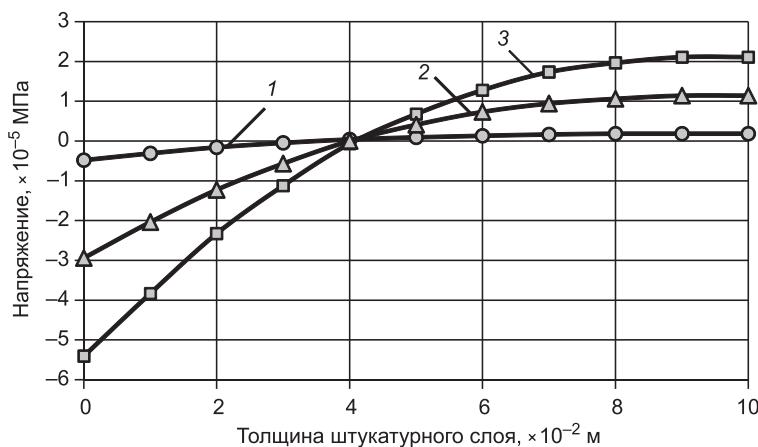


Рис. 2. Напряжения на отрыв  $\sigma_y$

1 — в точке 1; 2 — в точке 6; 3 — в точке 5

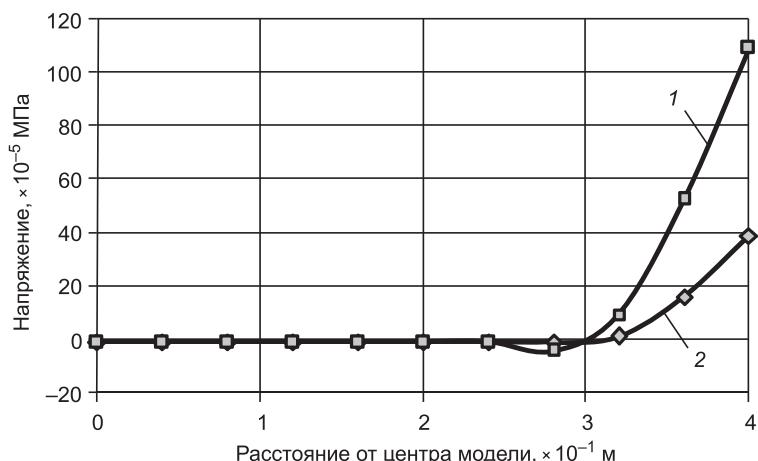


Рис. 3. Нормальные напряжения по поверхности штукатурки по линии

1–7: 1 —  $\sigma_x$ ; 2 —  $\sigma_z$

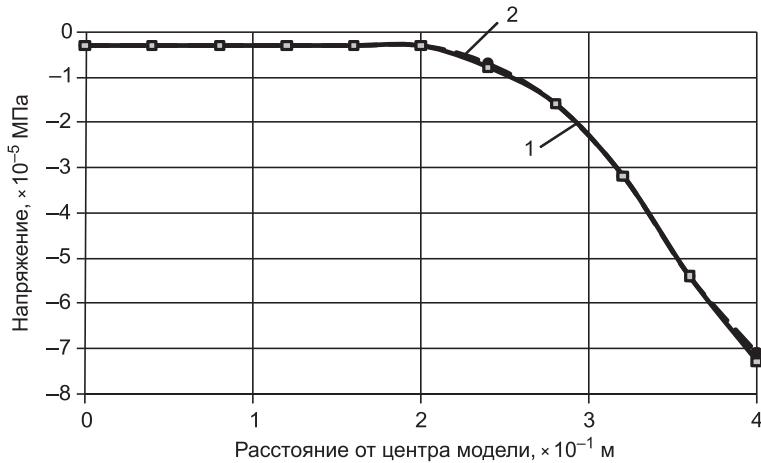


Рис. 4. Нормальные напряжения в зоне контакта штукатурки с отделяемым покрытием по линии  
1–7: 1 —  $\sigma_x$ ; 2 —  $\sigma_z$

поверхности —  $111,07 \cdot 10^{-5}$  МПа. При увеличении толщины отделочного слоя до 10 мм напряжения на отрыв уменьшаются и составляют соответственно  $88,79 \cdot 10^{-5}$  и  $15,83 \cdot 10^{-5}$  МПа.

В центре модели отделочного покрытия (точка 1) при толщине отделочного слоя 10 мм напряжения на отрыв  $\sigma_y$  в зоне контакта являются растягивающими и составляют  $\sigma_y = 0,48 \cdot 10^{-5}$  МПа, а на поверхности — сжимающими и составляют  $\sigma_y = 0,18 \cdot 10^{-5}$  МПа (см. рис. 2, кривая 1). По мере удаления от центра модели напряжения возрастают и в точке 5 в зоне контакта составляют  $\sigma_y = 5,41 \cdot 10^{-5}$  МПа (растягивающие), а на поверхности —  $\sigma_y = 2,11 \cdot 10^{-5}$  МПа (сжимающие) (см. рис. 2, кривая 3).

Растягивающие напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  по простирианию на расстоянии 30 см от центра на поверхности покрытия равны и составляют  $1,2 \cdot 10^{-5}$  МПа, а в краевой зоне наблюдается появление сжимающих напряжений, составляющих  $\sigma_x = 109,1 \cdot 10^{-5}$  МПа и  $\sigma_z = 38,7 \cdot 10^{-5}$  МПа (см. рис. 3).

В зоне контакта отделочного слоя с основанием напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  равны и максимальные значения составляют  $\sigma_x = \sigma_z = 7,4$  МПа (см. рис. 4).

Полученные значения растягивающих напряжений на поверхности и в зоне контакта отделочного слоя свидетельствуют, что они значительно меньше когезионной прочности, составляющей  $R_{kog} = 0,36$  МПа. Это обеспечивает усадочную трещиностойкость штукатурного слоя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашников, А.М. Технология приготовления и введение в лакокрасочные системы паст отечественного органобентонита [Текст] / А.М. Кашников, Ю.А. Бродский, А.М. Файнштейн // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2007. — № 1–2. — С. 56–58.
2. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей [Текст] / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2011. — № 3. — С. 8–12.
3. Логанина, В.И. Эффективность применения в сухих строительных смесях органоминеральных добавок на основе смешанослойных глин [Текст] / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.В. Черячукин, Э.Р. Акжигитова // Региональная архитектура и строительство. — 2012. — № 3. — С. 57–59.
4. Горчаков, Г.И. Трещиностойкость и водостойкость легких бетонов [Текст] / Г.И. Горчаков, Л.П. Орентлихер, Э.Г. Мурадов. — М. : Стройиздат, 1971. — 80 с.

*ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*АРИСКИН Максим Васильевич, канд. техн. наук, доц.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*АКЖИГИТОВА Эльвира Ринатовна, асп.; E-mail: marat999192@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*ПЕТУХОВА Надежда Алексеевна, канд. техн. наук, доц.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 28.11.12

**Loganina Valentina Ivanovna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: loganin@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Ariskin Maxim Vasilievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Akzhigitova Elvira Rinatovna**, post-graduate student; E-mail: marat999192@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Petukhova Nadezhda Alekseevna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **EVALUATION CRACK RESISTANCE OF FINISHING PLASTER COAT BASED DRY MORTARS**

Provides information on the results of the stress analysis for the finishing stucco layer on the basis of dry construction mixtures using organic-mineral additives based on mixed-clay. Shown that the values of tensile stresses do not exceed the cohesive strength of the finishing layer.

**Key words:** finishing plaster layer, stress, cracking.

### REFERENCES

1. Kashnikov, A.M. Tekhnologiya of preparation and introductions in paint and varnish systems of Russian organobentonit [Text] / A.M. Kashnikov, Yu.A. Brodsky, A.M. Feinshtein // Paintwork materials and their application. — 2007 . — N. 1–2. — P. 56–58.
2. Loganina, V.I. Development of organic-mineral additive for dry construction mixtures [Text] / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Messenger of BGTU of V.G.Shukhov. — 2011. — N. 3. — P. 8–12.
3. Loganina, V.I. Effective use of organic-mineral additives on mixed-clay in dry construction mixtures [Text] / V.I. Loganina, S.N. Kislytsyna, V.V. Cheryachukin, E.R. Akzhigitova // Regional architecture and construction. — 2012. — N. 3. — P. 57–59.
4. Gorchakov, G.I. Crack resistance and water resistance of lightweight concrete [Text] / G.I. Gorchakov, L.P. Orentlikher, E.G. Muradov. — M. : Stroyizdat, 1971. — 80 p.

УДК 691.33 : 666.943

А.В. УГЛЯНИЦА, Т.В. ХМЕЛЕНКО, К.Д. СОЛОНИН

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ  
ТВЕРДЕЮЩИХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ  
НА ОСНОВЕ ДОМЕННЫХ ГРАНШЛАКОВ**

Высокие требования к закладочным смесям по прочности, водоупорности, фильтрационным и компрессионным свойствам предполагают использовать материалы, приближающиеся к природным материалам. Предложены закладочные твердеющие смеси на основе доменных гранулированных шлаков и изучены реакции самопроизвольного гидратационного процесса при твердении.

**Ключевые слова:** закладочные смеси, доменные шлаки, процесс гидратации, твердение.

В Российской Федерации производится большая работа по разработке эффективных технических и технологических решений по ликвидации и реконструкции угольных шахт. Установлено, что наилучшим способом закладки вертикальных горных выработок является их закладка твердеющими смесями<sup>1</sup>.

Высокие требования к закладочным твердеющим смесям по прочности, водоупорности, фильтрационным и компрессионным свойствам предполагают использовать материалы для закладочных смесей, по своим свойствам приближающиеся к природным материалам, которые и соответствуют таким высоким требованиям.

Закладка вертикальных горных выработок в соответствии с нормативной инструкцией производится безусадочным и водоупорным материалом. Основные требования, предъявляемые к таким материалам: коэффициент фильтрации менее 0,001 м / сут и компрессия закладочного массива в наиболее нагруженной нижней части ствола<sup>2</sup> 0,00 %.

Поэтому было высказано предположение, что такими высокими свойствами могут обладать твердеющие закладочные смеси на основе доменных гранулированных шлаков, смешанных с щелочными компонентами. Доменные гранулированные шлаки по своему химическому составу подобны многим природным минералам и обладают высокой внутренней энергией.

Поэтому была поставлена задача теоретического и экспериментального определения продуктов гидратации доменных гранулированных шлаков на основе термодинамических законов самопроизвольного протекания процессов гидратации.

<sup>1</sup> Бронников Д.М. и др. Закладочные работы в шахтах / Под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. М.: Недра, 1989. 400 с.

<sup>2</sup> Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами. РД 07-291-99 / Федеральный горный и промышленный надзор России. М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. 17 с.

Данная работа проводилась на кислых шлаках Кузбасса химического состава, %:

CaO	30,9 – 32,5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	следы
SiO <sub>2</sub>	35,0 – 35,97	MgO	6,45 – 10,90
Al <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	13,2 – 19,6	SO <sub>5</sub>	0,17 – 0,24
Na <sub>2</sub> O	0,70 – 0,95	K <sub>2</sub> O	0,50 – 0,70

модуль основности 0,7–0,8; модуль активности 0,50–0,55; содержание стеклофазы 88–95 %.

Возможные процессы структурообразования рассчитывались теоретически с помощью методов термодинамики. Известно, что самопроизвольно могут протекать в системе те процессы, у которых уменьшается изобарно-изотермический потенциал, а предпочтительной будет та реакция, изобарно-изотермический потенциал которой минимальный.

Вычисление изобарно-изотермического потенциала производилось по уравнению Гиббса–Гельмгольца [3]:

$$\Delta Z_m^0 = \Delta H_p + T(\frac{\partial \Delta Z}{\partial T})p, \quad (1)$$

где  $\Delta Z_m^0$  — изобарно-изотермический потенциал, кДж / моль;  $\Delta H_p$  — энталпия реакции, кДж / моль;  $T$  — температура, К.

Интегрируя уравнение (1) в определенном интервале температур, получаем уравнение зависимости изобарно-изотермического потенциала от температуры [3]:

$$\Delta Z_m^0 = \Delta H_0 - \Delta a T \ln T - \frac{1}{2} \Delta b T^2 - \frac{1}{2} \Delta c T^{-1} + yT, \quad (2)$$

где  $\Delta H_0$ ,  $y$  — постоянные интегрирования;  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  — коэффициенты уравнения зависимости теплоемкости от температуры реакции.

Рассмотрено несколько схем реакций силикатообразования в системе глиноземистый кислый шлак–щелочь и рассчитаны для них изобарно-изотермические потенциалы. Для расчета  $\Delta Z_m^0$  использовались значения констант, приведенных в [1, 2]. Уравнения реакций, для которых значения  $\Delta Z_m^0$  наиболее отрицательны, показаны в таблице.

Согласно расчетам, в системе кислый шлак–щелочь преимущественным является образование низкоосновных тоберморитоподобных гидросиликатов кальция и щелочных гидросиликатов типа анальцима и парагонита, т.е. природных щелочных и щелочно-земельных алюмосиликатов, обладающих высокими прочностными и гидрофизическими свойствами.

#### Значение изобарно-изотермических потенциалов

№ п/п	Уравнение реакции	Изобарно-изотермический потенциал $\Delta Z_{298}^0$ , кДж / моль
1	$2\text{CaO} + 8\text{Al}_2\text{O}_3 + 16\text{SiO}_2 + 4\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2[\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] + 2[\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] + \text{H}_2\text{O}$	614,58
2	$5\text{CaO} + 3\text{Al}_2\text{O}_3 + 12\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	713,91
3	$5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{SiO}_2 + \text{NaOH} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	758,35

Экспериментальное исследование состава новообразований производилось с помощью дифференциального термического, рентгеноструктурного анализов и инфракрасной спектроскопии. Образцы, твердевшие в нормальных условиях и при гидротермальной обработке [2], готовили из шлака, измельченного до удельной поверхности 3000–3500 см<sup>2</sup>/г. В качестве затворителя использовали растворы гидроксида и метасиликата натрия плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup>.

При гидратации шлака в условиях непродолжительной гидротермальной обработки в течение 10 ч новообразование представляет собой в основном аморфное вещество, в котором в незначительном количестве появляется кристаллическая фаза.

Увеличение времени термообработки способствует росту кристаллических новообразований и появлению четких эффектов на дериватограммах. Ступенчатые кривые дегидратации в интервале температур от 400 до 700 °С (рис. 1) указывают на клатратный характер связи воды с гидратными новообразованиями [4]. На термограммах появляется эндоэффект при 700–720 °С и экзоэффекты при 790–810 °С и 840–860 °С. Появление эффекта при 700 °С объясняется, очевидно, полным удалением кристаллизационной воды из структуры новообразований. Экзоэффект в области 790–810 °С, вероятно, относится к кристаллизации анальцима. Эффект при 840–860 °С можно объяснить дерекристаллизацией низкоосновных (с основностью 0,8–1,25) гидросиликатов тоберморитовой группы [2].

Рентгенограммы образцов шлака, гидратированного в течение 10 ч при температуре 100 °С, имеют лишь слабые линии (рис. 2), появление которых обусловлено, очевидно, возникновением новых фаз с формирующей кристаллической структурой. Более продолжительная гидротермальная обработка приводит к появлению на рентгенограммах линий с межплоскостными расстояниями 3,27; 2,05; 2,41; 1,77. Указанные линии можно приписать низкоосновному гидросиликату с эндотермической реакцией в пределах 400–500 °С [3]. Кроме того, появление линий 6,7; 3,45; 2,939; 2,704 можно отнести к цеолитоподобным минералам типа анальцима.

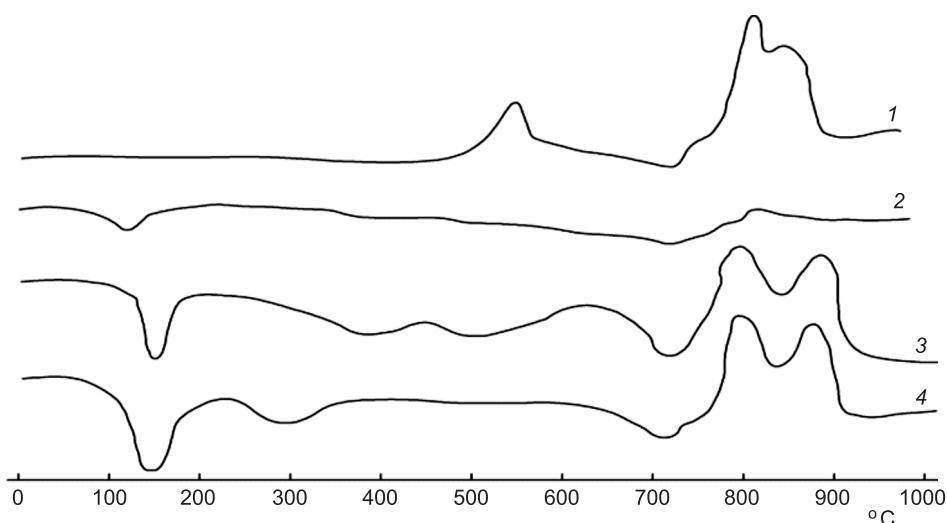


Рис. 1. Термограмма гидратированного шлака

1 — исходный гранулированный шлак; 2 — шлак, гидратированный в течение 10 ч; 3 — то же, 200 ч;  
4 — шлак, гидратированный метасиликатом натрия в течение 200 ч

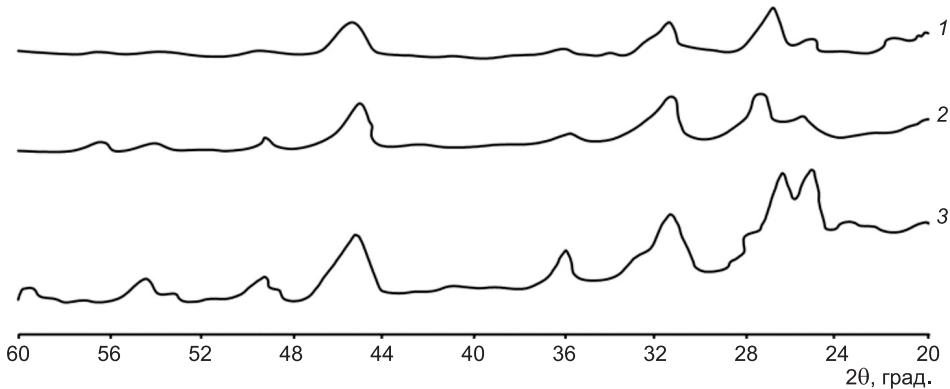


Рис. 2. Рентгенограмма образцов шлака

1 — негидратированных; 2 — автоклавированных при 0,12 МПа; 3 — то же, с добавкой 30 % по массе кварца

Спектрограмма шлаков, гидратированных в присутствии едких щелочей, указывает несколько областей поглощения (рис. 3). Широкое поглощение в области  $700\text{--}1200\text{ см}^{-1}$  характерно для низкоосновных силикатов и обусловлено, видимо, колебаниями, ассоциированными со связями Si—O.

Полосы поглощения около  $3598$  и  $3690\text{ см}^{-1}$  соответствуют области валентных колебаний гидроксида [3].

Широкая полоса поглощения  $400\text{--}500\text{ см}^{-1}$  может быть отнесена к колебаниям связи Al—O в алюмокислородных тетраэдрах. Состав новообразований в образцах, твердевших в нормальных условиях в течение 28 сут, подобен новообразованиям, образующимся при кратковременной гидротермальной обработке. Продукты гидратации шлаков в присутствии гидроксида натрия и метасиликата натрия существенно не отличаются друг от друга. Таким образом, теоретическое и экспериментальное изучение состава новообразований в твердеющих закладочных смесях на основе кислых шлаков Кузбасса показало, что в процессе силикатообразования образуются в основном низкоосновные гидросиликаты кальция тоберморитовой группы и щелочные гидроалюмосиликаты типа анальцима и прагонита, аналогичные природным щелочным и щелочно-земельным алюмосиликатам.

Анализ известных способов закладки выработанного пространства показал, что все они обладают значительной трудоемкостью и стоимостью, вследствие использования дорогостоящих закладочных материалов и технологических приемов.

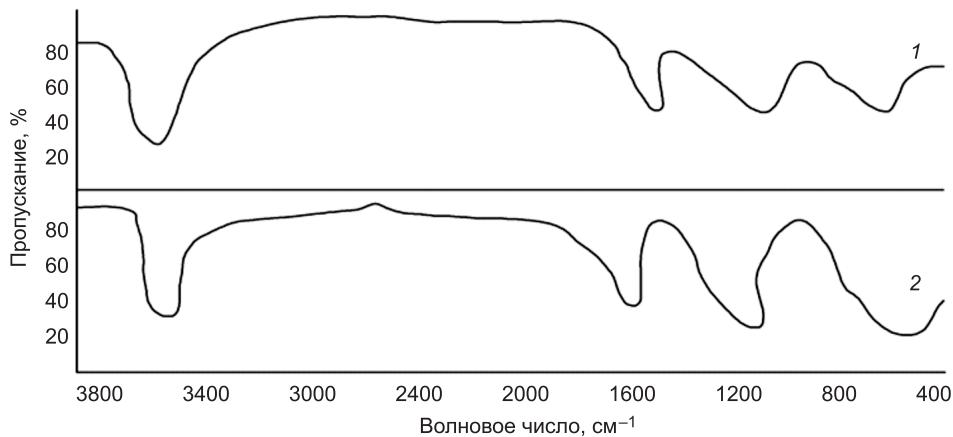


Рис. 3. Инфракрасные спектры поглощения

1 — шлак, гидратированный метасиликатом натрия; 2 — шлак, гидратированный гидроксидом натрия

Разработка дешевого водоупорного и безусадочного материала на основе отходов промышленности позволяет решить проблему ликвидации вертикальных горных выработок с минимальными трудовыми и материальными затратами.

Выполненные в КузГТУ лабораторные исследования показали, что для получения закладочного массива экономически целесообразно использовать молотые доменные гранулированные шлаки и другие отходы различных отраслей промышленности, твердеющие в нормальных условиях и в условиях гидротермальной обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б а б у ш к и н, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, Л.П. Мchedлов-Петросян. — М. : Стройиздат, 1972.
2. Б о й к о в а, А.И. Гидротермальные реакции в системе Ca—O—SiO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O [Текст] / А.И. Бойкова, Х.С. Никогосян, Н.А. Торопов // Труды 6-го совещания по экспериментальной и технической минералогии и петрографии. — М. : АН СССР, 1962.
3. Л а з а р е в, А.Н. Колебательные спектры и строение силикатов [Текст] / А.Н. Лазарев. — Л. : Наука, 1968.

УГЛЯНИЦА Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

ХМЕЛЕНКО Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доц.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

СОЛОНИН Кирилл Дмитриевич, асп.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Получено 21.11.12

**Uglyanitca Andrey Vladimirovich**, doctor of technical sciences, professor, Kuzbass State Technical University of Gorbachev, Kemerovo, Russia

**Khmelenko Tatyana Vladimirovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Kuzbass State Technical University of Gorbachev, Kemerovo, Russia

**Solonin Kirill Dmitrievich**, post-graduate student, Kuzbass State Technical University of Gorbachev, Kemerovo, Russia

#### STRUCTURIZATION OF HARDENING BACKFILL MIXES BASED ON DOMAIN GRANULATED SLAG

High requirements to backfill mixes on durability, water tightness, filtration and compression properties assume to use materials coming nearer to natural materials. Hardening backfill mixes based on the domain granulated slag are offered and reactions of spontaneous hydration process are studied at a hardening.

**Key words:** hardening backfill mixes, domain slag, hydration process, hardening.

#### REFERENCES

1. Babushkin, V.I. Thermodynamics of silicates [Text] / V.I. Babushkin, G.M. Matveev, L.P. Mchedlov-Petrosyan. — M. : Stroyizdat, 1972.
2. Boykova, A.I. Hydrothermal reactions in system Ca—O—SiO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O [Text] / A.I. Boykova, Kh.S. Nikogosyan, N.A. Toropov // Labour of sixes meeting of experimental and technical mineralogy and petrography. — M. : AN USSR, 1962.
3. Lazarov, A.N. Vibrational spectrum and structure of silicates [Text] / A.N. Lazarov. — L. : Science, 1968.

**УДК 691.42 : 661.31**

**С.А. ШАХОВ, Т.Л. РУДАЯ, А.С. КОЖЕМЯЧЕНКО**

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ОСАДКА ВОДООЧИСТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ**

Проанализированы гранулометрический, химический и минералогический составы осадка с водоочистных сооружений. Установлено, что осадок обладает полифункциональным ресурсом для воздействия на процессы спекания и формирования структуры керамических материалов.

**Ключевые слова:** строительная керамика, осадок водоочистки, утилизация, кварц, глинистые частицы.

В структуре производства мелкоштучных стеновых материалов доля керамического кирпича в настоящее время составляет порядка 65 %. Однако выпуск качественного кирпича ограничен сырьевой базой, в частности, доступными запасами качественного глинистого сырья, так как большая часть таковых уже выработана. Один из путей решения сырьевой проблемы — вовлечение в производство неиспользуемых или ограниченно используемых техногенных отходов. К числу актуальных направлений исследований, связанных с утилизацией отходов, относится использование пока практически не применяющихся в строительной индустрии осадков с очистных станций подготовки воды.

Потенциально осадки водоочистки могут быть использованы в различных качествах в производстве строительной керамики: как замена компонентов сырьевой смеси, в качестве корректирующих и активных добавок и т.д. Для того чтобы определить оптимальный путь использования таких отходов в производстве строительной керамики, были проанализированы условия и особенности формирования осадка, определяющиеся технологией водоочистки, а также изучены состав и свойства осадков с очистных станций подготовки воды МУП «Горводоканал» г. Новосибирска.

Формирование осадков на станциях водоподготовки происходит при очистке от механических примесей, предварительном хлорировании, коагулировании, отстаивании, фильтровании, обеззараживании хлором природной воды. В процессе очистки воды осадок образуется непрерывно, при этом выпуск его из горизонтальных отстойников обычно производится периодически (2–3 раза в год), по мере накопления. При этом концентрация твердых веществ в поверхностном слое не превышает 1,5–2 %, в то время как в нижнем слое осадка она достигает 10–15 %.

Состав, количество и основные свойства осадка во многом определяются конкретными условиями его образования, правильной эксплуатацией очистных сооружений, способами его обработки и другими факторами. Отходом предварительного процецивания воды является шлам (промывные воды), содержащий частицы плавающих примесей и планктона.

---

**© Шахов С.А., Рудая Т.Л., Кожемяченко А.С., 2013**

Для удаления мелкодисперсных и коллоидных частиц из потока технологическим процессом очистки воды предусмотрено введение коагулянта. В качестве флокулянта на сооружениях водоподготовки МУП «Горводоканал» используется оксихлорид алюминия. В результате этого образуется хлопьевидный осадок светло-коричневого цвета, имеющий аморфную коллоидную структуру и обладающий выраженными тиксотропными свойствами. Окраску осадка обусловливают соединения железа, которые привносятся в виде тонкой суспензии гидроокислов или железоорганических соединений с речной водой [1]. При воздействии на осадок кислорода, содержащегося в воздухе, происходит изменение его цвета (осадок приобретает бурый цвет), что связано с процессом окисления двухвалентного железа.

Для условий, в которых происходит накопление осадка, характерна слабокислая и кислая реакция, так как в процессе неполного разложения растительных остатков образуются растворимые органические кислоты. При этом водный раствор осадка растворяет известь и, следовательно, обладает агрессивным действием [2].

Изучение свойств осадков производили методами химических и спектрометрических анализов, изучали плотность, вязкость осадка, гранулометрию суспензии.

*Плотность и вязкость* осадка изменяются во времени в зависимости от его структуры и температуры и составляют соответственно от 1,011 и 2,6 сСт (в период весеннего половодья) до 1,005 г/см<sup>3</sup> и 1,8 сСт (в осенне-зимний период).

*Влажность* неотстоенного осадка колеблется в пределах от 99,45 до 99,85 % зимой и от 99,17 до 99,38 % весной. В составе осадка вода находится в коллоидно-связанном состоянии, в виде адсорбционных оболочек и свободной воды. Коллоидно-связанная вода частично может быть переведена в свободную форму коагуляцией или термической деструкцией. Гигроскопическая вода полностью удаляется только при нагреве осадка. Свободная вода отделяется от осадка простой фильтрацией или отжимом.

*Гранулометрический состав.* Дисперсная фаза осадков включает частицы органического и минерального происхождения различных размеров и формы. Размеры частиц и данные об их распределении в полидисперсных суспензиях определялись методом разделения частиц на фракции на калибровочных ситах с промывкой водой, так как при высыпывании осадка частицы агрегировались. Кроме этого гранулометрический состав осадка для частиц менее 0,05 мм определялся микроскопическим методом, который позволил определить не только размеры глинистых частиц, но и их форму. Диаграмма гранулометрического состава звезды осадка от промывных вод представлена на рис. 1. Большее количество частиц имеют анизодиаметрическую форму, что можно объяснить агломерацией частиц при коагуляции и сегментации.

*Минеральный состав.* Минеральная часть представлена преимущественно кварцем, глинистым веществом, соединениями кальция и магния размером менее 1 мм (до 95 %). Рентгенограмма осадка (рис. 2) характеризуется наличием кварца, однако основную массу составляет аморфно-минеральное вещество органогенного происхождения.

Для подтверждения присутствия в исследуемой пробе кварца в мелкодисперсном состоянии был проведен эксперимент по определению ад-

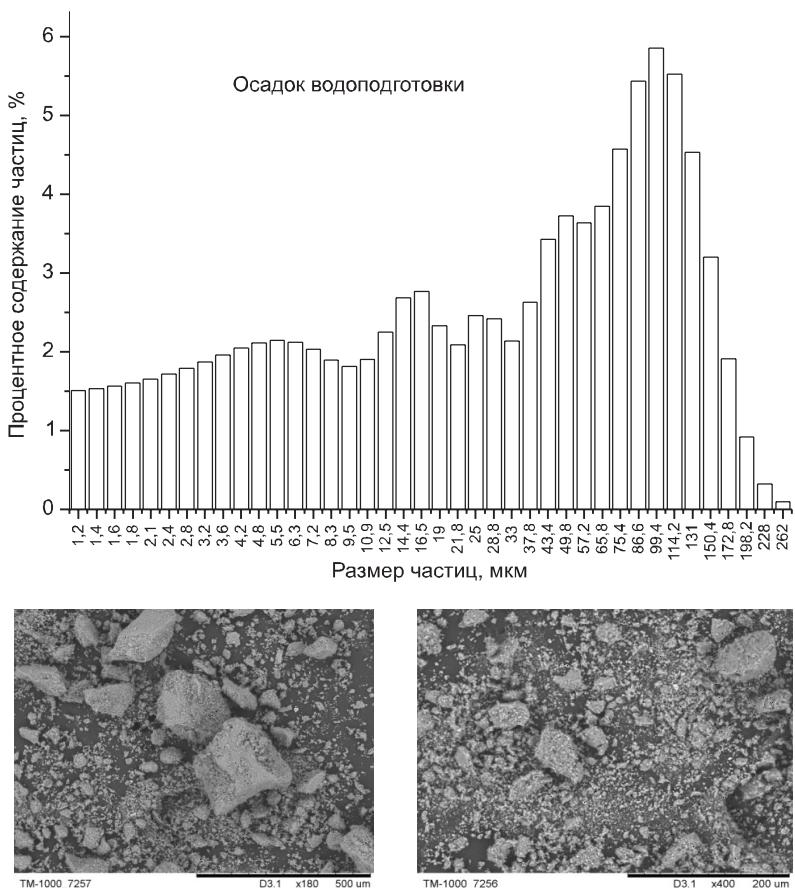


Рис. 1. Гранулометрический состав и внешний вид частиц осадка

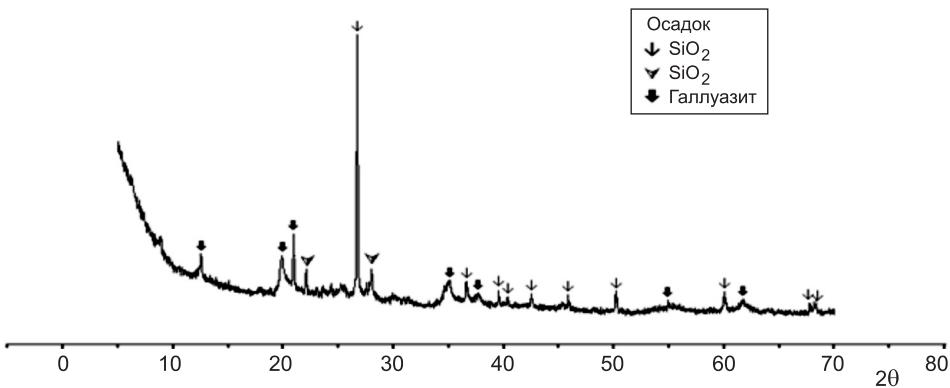
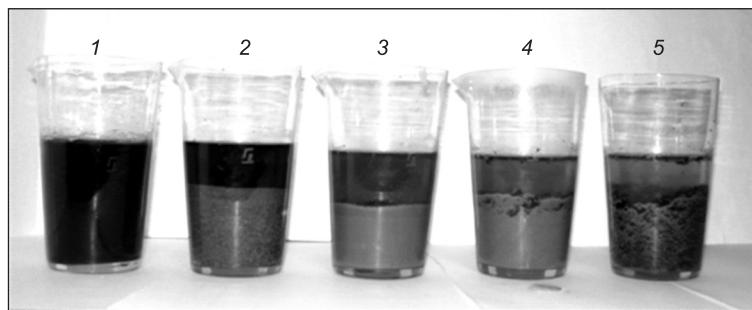


Рис. 2. Рентгенограмма осадка

сорбционной способности основных компонентов сырьевой смеси для кирпича: глины, кварцевого песка, осадка, а также глины и осадка, взятых при соотношении 1:1. В качестве красителя был использован метиловый краситель (метиловый красный).

Полученные результаты (рис. 3) свидетельствуют, что адсорбция метилового красителя осадком, содержащим пылеватые частицы кварца, выше, чем в других пробах, имеющих в своем составе кварц в преобладающем большинстве в крупнокристаллическом виде. Также максималь-



*Рис. 3. Интенсивность адсорбции метилового красителя*  
1 — метиленовый красный; 2 — песок кварцевый; 3 — глина; 4 — 50 %  
глины, 50 % осадка; 5 — осадок (в сухом состоянии)

на адсорбция осадка, связанная не только с присутствием органических соединений, но и с наличием пылеватых частиц.

Присутствующие в осадке пылеватые частицы не относятся к глинистым, а согласно данным рентгеноструктурного анализа являются высокодисперсным кварцем. Мелкокристаллический кварц нельзя рассматривать как отощающее вещество, так как по своим физическим свойствам он приближается к глине, не обладая ее способностью к формированию. Это является следствием природы его образования. Появление пылевидных кварцевых частиц обусловлено сложными механическими и физико-химическими процессами, которые претерпевает имеющийся в речной воде песок. Кварц при осаждении образует связь с другими твердыми частицами и между собой, вероятно, за счет пленки геля кремнезема. На осаждение песка и уплотнение осадка, возможно, оказывают влияние и водородные ионы, образующиеся путем расщепления после растворения мельчайших частиц кремнезема в растворимую кремнекислоту.

*Химический состав.* Сухие осадки представляют собой смесь органических и минеральных веществ в дисперсном состоянии. Химический состав водопроводного осадка изменяется в зависимости от сезонных колебаний качества воды в поверхностных источниках, а также от применяемых видов коагулянтов и флокулянтов и их доз. В осадках доминирует кремний (13,20–20,15 %) и алюминий (11,1–12,86 %). Сравнительно много железа (4,12–7,13 %), марганца (1,3–1,9 %), магния (1,2–1,8 %) и кальция (2,72–2,85 %). В минеральной части осадков обнаружено также наличие других элементов (табл. 1, 2).

Таблица 1  
**Состав минеральной части осадков по данным рентгеноспектрального флуоресцентного метода анализа**

Содержание, % веса	Элементы
10–20	Al, Si
1,0–10	Fe, Ca, Mg, Mn
0,1–1,0	Zn, Ti, K
<0,1	Zr, V, Sr, Rb, Cu, Ni, Cr, Cd, Li, Ta, Mo, Co, Ba, B, As

Таблица 2  
**Состав минеральной части осадков по данным химического анализа**

Предприятие	Содержание оксидов, мас. %						П.п.п. сверх 100 %
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	
МУП «Горводоканал», г. Новосибирск	59,8	4,6	17,8	8,1	13,1	—	43,5

Таблица 3

**Элементный состав органической части осадков  
(в пересчете на сухое вещество, мас. %)**

Предприятие	C	H	N	S	P	O	Сумма
МУП «Горводоканал», г. Новосибирск	35,0–40,0	4,6–4,9	1,5–2,1	0,6	0,6	16,0	60,8–64,1

Таблица 4

**Реакции газификации углерода**

№	Уравнение реакции	Название процесса
1	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Окисление CO
2	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Паровая конверсия CO
3	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Окисление C
4	$2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	Неполное окисление C
5	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	Паровая конверсия C
6	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$	Паровая конверсия C

Органическая часть осадков сточных вод в основном состоит из белков, жиров и углеводов, включая серу и фосфор, и составляет 44–49 % массы (табл. 3).

Учитывая значительное содержание органики в осадке, с достаточно высокой степенью достоверности можно предположить, что выделяющиеся при выгорании органических веществ газообразные продукты будут участвовать в процессах поризации расплава и формировании пористой структуры керамического материала [3]. С целью моделирования термодинамических превращений различных органических соединений, содержащихся в осадке, вся сумма содержащихся органических соединений была принята за углерод (C).

Перечень возможных химических реакций газификации углерода (табл. 4) определяется составом шихты, ее влажностью, составом дымовых газов (продуктов сгорания технологического топлива), в протоеке которых осуществляется обжиг керамического кирпича. Поскольку реакции газификации протекают не только на поверхности материала, но и в порах, то это находит отображение в реакциях неполного окисления углерода (4), паровой конверсии углерода (5–6), сопровождающихся образованием CO и H<sub>2</sub>. Именно эти реакции формируют восстановительную среду в порах керамики, которая способствует диссоциации Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→FeO.

Процессы, которые будут протекать при обжиге керамического кирпича с добавкой осадка, исследовались методами термогравиметрии (TG, ДТГ) и дифференциально-термического анализа (DTA). Термогравиметрические кривые получены с помощью микротермовесов TG 209 F1 (фирма Netzch). Были сняты термограммы глины, осадка и шихты состава: 90 % глины, 10 % осадка (рис. 4).

На кривых ДТГ исследуемых составов в интервале 60–120 °C наблюдаются эндоэффекты, связанные с удалением адсорбированной воды и сопровождаемые потерей массы образца. В интервале 120–420 °C происходит наиболее интенсивное выгорание органических примесей. При дальнейшем повышении температуры (до 950 °C) процесс характери-

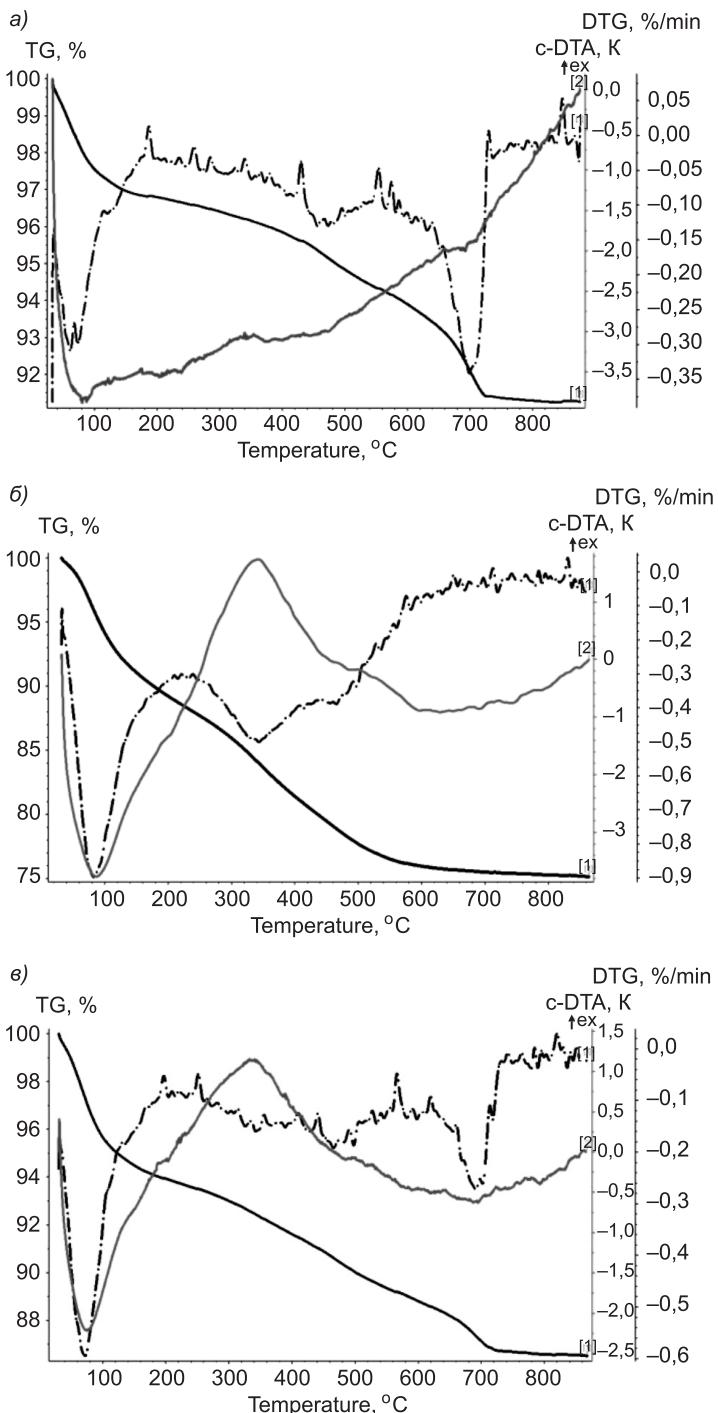


Рис. 4. Кривые ДТА, ДТГ и ТГ

а — термограмма глины, б — осадка, в — шихты

зуется меньшей активностью (потери массы составляют 4 %). Процессы дегидратации глинистых минералов, сопровождающиеся разрушением их кристаллических решеток, происходят при температурах 540–560 и 660–720 °С. Из высокотемпературных эндоэффектов — эффекты при 545 и 660 °С связаны с разложением глинистых минералов, а эффект при 825 °С соответствует разложению карбонатов.

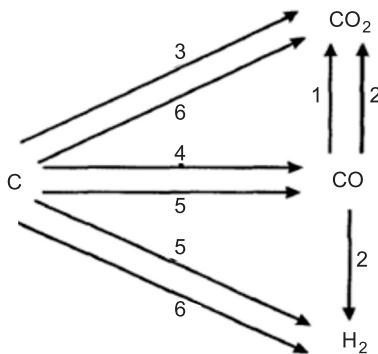


Рис. 5. Схема последовательно-параллельных превращений при газификации углерода

давление 1 атм., показывают, что процессы образования газовой фазы будут протекать по схеме, представленной на рис. 5.

**Выводы.** 1. Осадок водопроводных вод представляет собой органоминеральную коллоидную систему (ОМКС), имеет полифункциональный ресурс для воздействия на процессы спекания и формирования структуры керамических материалов.

2. Основой применения ОМКС в материалах на основе обожженных глин является химическое и физическое подобие их состава и свойств, основанное на их коллоидно-химическом происхождении в природных условиях. Существенным фактором является также материально- и энергоемкость обжиговых производств, что немаловажно при утилизации такого крупнотоннажного отхода, каким является осадок.

3. Введение ОМКС позволит исключить использование в керамических массах добавок «двойного» и «тройного» действия, составленных из различных веществ (плавни, порообразователи, отощители). Высокая степень технологической готовности (не требует помола и смешивания с добавками специального назначения) и энергетический потенциал ОМКС позволят получить экономию за счет снижения температуры обжига и уменьшения потребности во внешней тепловой энергии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калюкова, Е.Н. Химия воды: учеб. пособие [Текст] / Е.Н. Калюкова, Л.В. Петрова.— Ульяновск : УлГТУ, 2004. — 48 с.
2. Гвоздев, В.Д. Очистка производственных сточных вод и утилизация осадков [Текст] / В.Д. Гвоздев, Б.С. Ксенофонтов. — М., 1988. — 58 с.
3. Гузман, И.Я. Некоторые принципы образования пористых керамических структур, свойства и применение [Текст] / И.Я. Гузман // Стекло и керамика. — 2003. — № 9. — С. 28–31.

**ШАХОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sashakhoo@mail.ru**  
**Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск**

**РУДАЯ Татьяна Леонтьевна, асп.; E-mail: lativotik@ya.ru**  
**Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск**

**КОЖЕМЯЧЕНКО Александр Сергеевич, инж.; E-mail: zheezh@gmail.com**  
**Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск**

Из полученных данных видно, что термограмма шихты не является простой результирующей термограммой глины и осадка. Данное обстоятельство позволяет предположить, что между глиной и отходом происходят определенные физико-химические взаимодействия, обусловленные структурой и свойствами осадка в процессе его образования и превращения в органоминеральный комплекс.

Термодинамические расчеты, выполненные для следующих условий: температурный интервал исследований 298–1000 К;

**Shahov Sergey Alexandrovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sashakhov@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Rudaya Tatyana Leontievna**, post-graduate student; E-mail: lativtik@ya.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Kozhemyachenko Alexander Sergeevich**, engineer; E-mail: zheezh@gmail.com, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING A WATER TREATMENT SLUDGE FOR PRODUCTION OF BUILDING CERAMICS**

Analyzed granulometric, the chemical and mineralogical composition of the sludge from municipal wastewater treatment plants. It is established that sediment has multifunctional resource for influencing the processes of sintering, melting and forming porization structure of ceramic materials.

**Key words:** construction ceramics, water treatment sludge, utilization, quartz, clay particles.

### REFERENCES

1. Kalyukova, E.N. Water chemistry: The training manual [Text] / E.N. Kalyukova, L.V. Petrova. — Ulyanovsk: UlSTU, 2004. — 48 p.
  2. Gvozdev, V.D. Cleaning of industrial waste water and disposal of precipitation [Text] / V.D. Gvozdev, B.S. Ksenofontov. — M., 1988. — 58 p.
  3. Guzman, I.Ya. Some principles of the formation of porous ceramic structures, properties and applications [Text] / I. Ya. Guzman // Glass and ceramics. — 2003. — N 9. — P. 28–31.
-

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ

## СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.003 : 658.387

Ю.Б. КАЛУГИН

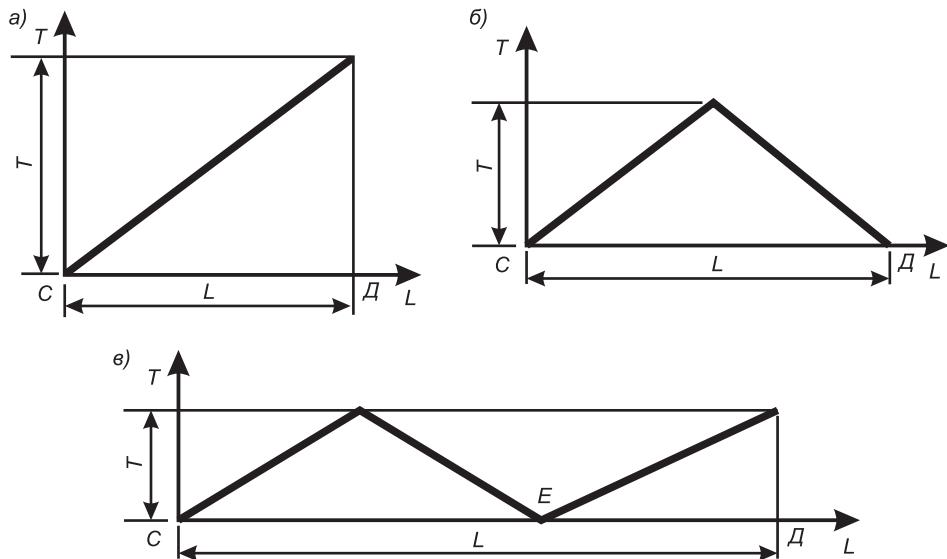
### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СХЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Предложен подход, который позволяет рассчитать оптимальное число исполнителей строительства линейно-протяженного объекта на основе ресурсно-временных критериев. Способ реализован, в том числе и с учетом вероятностных временных параметров.

**Ключевые слова:** линейно-протяженный объект, организационные схемы строительства, оптимальное число исполнителей, ресурсно-временные критерии, вероятностные временные параметры.

В зависимости от расположения пунктов примыкания строящегося линейно-протяженного объекта (железной или автомобильной дороги, обхода барьераного места, трубопровода и т.д.) к существующим транспортным коммуникациям, заданных сроков строительства, выделенных сил и средств, а также ряда других факторов строительство может быть развернуто по одно-, двух- и многолучевой схемам (рис. 1).

В пределах каждого луча формируется комплексный (объектный) поток, возможная схема которого представлена на рис. 2.



Rис. 1. Схемы организации строительства линейно-протяженного объекта  
а — однолучевая; б — двухлучевая; в — многолучевая;  $L$  — длина объекта;  $T$  — продолжительность строительства;  $C, D, E$  — точки примыкания

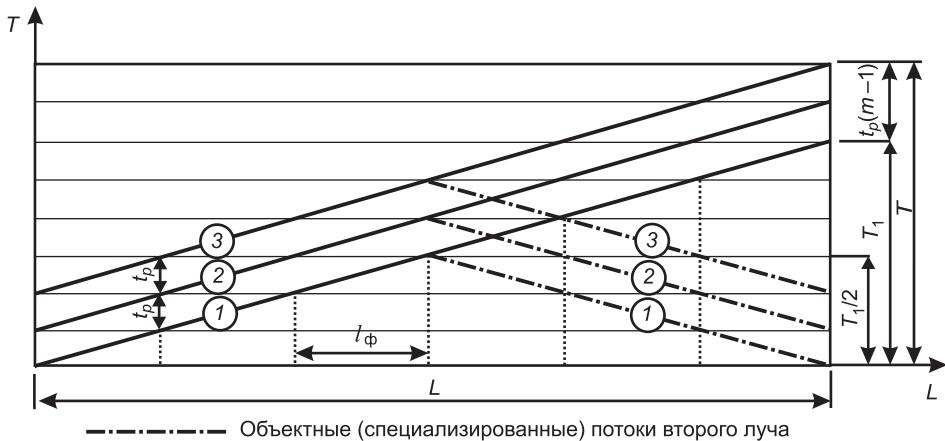


Рис. 2. Схема равноритмичного потока для линейно-протяженного объекта  
1, 2, 3 — объектные потоки (специализированные подразделения)

Здесь  $m$  — число объектных потоков (специализированных подразделений);

$l_\phi$  — величина фронта работ одного потока;

$t_p$  — ритм потока (продолжительность выполнения специализированной командой работ на фронте работ);

$T_1$  — продолжительность работы первого потока на участке.

В соответствии с рис. 2 для однолучевой схемы строительства

$$T = T_1 + t_p(m-1) \quad (1)$$

или

$$T = t_p \frac{L}{l_\phi} + t_p(m-1). \quad (2)$$

Для  $R$  исполнителей величина каждого участка составит  $\frac{L}{R}$ . Тогда продолжительность строительства по многолучевой схеме:

$$T^R = \frac{T_1}{R} + t_p(m-1) \quad (3)$$

или

$$T^R = t_p \frac{L}{l_\phi \times R} + t_p(m-1). \quad (4)$$

Второе слагаемое выражений (1)–(4) соответствует периоду свертывания потока и в общем случае не зависит от числа исполнителей (числа лучей).

Величина сокращения продолжительности строительства объекта для  $R$  исполнителей составит:

$$\Delta T = T_1 - \frac{T_1}{R} = T_1 \times \left(1 - \frac{1}{R}\right) \quad (5)$$

или

$$\Delta T = t_p \frac{L}{l_\phi} - t_p \frac{L}{l_\phi \times R} = t_p \frac{L}{l_\phi} \left(1 - \frac{1}{R}\right). \quad (6)$$

$$\text{Пусть } t_p = \frac{l_\phi}{v},$$

где  $v$  — темп объектного потока (специализированной команды).  
Тогда

$$\Delta T = \frac{L}{v} \left(1 - \frac{1}{R}\right). \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой дробно-линейную функцию и позволяет оценить возможное сокращение продолжительности строительства линейно-протяженного объекта  $R$  исполнителями (по сравнению с однолучевой схемой).

Кроме того, сопоставление затрат, связанных с привлечением дополнительных исполнителей и организацией точек примыкания с эффектом от возможного сокращения сроков строительства, позволяет на основе выражения (7) определить рациональное число исполнителей.

Пусть  $S(t)$  — эффект от сокращения сроков строительства объекта на единицу времени;  $S(R)$  — затраты, связанные с привлечением одного исполнителя.

Тогда суммарный эффект (затраты)

$$Y = S(t) \times \Delta T - S(R) \times R \quad (8)$$

или с учетом (7)

$$Y = S(t) \times \frac{L}{v} \left(1 - \frac{1}{R}\right) - S(R) \times R. \quad (9)$$

Приравнивание к нулю первой производной  $\frac{dY}{dR}$  позволит определить экстремум функции (9) и получить следующее выражение:

$$R^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{L \times S(t)}{v \times S(R)}}. \quad (10)$$

Таким образом, выражение (10) позволяет определить оптимальное (рациональное) число исполнителей (лучей) при строительстве линейно-протяженного объекта в случае детерминированных временных оценок.

Учет вероятностных временных параметров [1, 2] в значительной степени корректирует полученные результаты.

В табл. 1 представлены результаты расчета различных вариантов комплексного потока строительства линейно-протяженного объекта с детерминированными и с вероятностными временными параметрами для разных уровней организации исполнителей по данным [2]. Также даны вероятностные параметры вариантов комплексного потока для различного числа исполнителей, значения математического ожидания сроков выполнения работ и коэффициент, учитывающий его смещение от детерминированных оценок.

Особенностью представленных расчетов являются вероятностные параметры по каждому из вариантов для объекта в целом. Если для однолучевой схемы ( $R = 1$ ) эти параметры для луча и объекта полностью совпадают, то с увеличением числа исполнителей (числа лучей) отклонение вероятных сроков выполнения работ по объекту дополнительно (за счет

Таблица 1

## Результаты расчета вариантов комплексного потока

Число исполнителей и уровень организации		Равновероятные сроки выполнения работ (с округлением до целых значений)													$P(t) = 0,5$	$K$
$R = 1$	Луч	Детерм.	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	1,0
		Высок.	600	601	601	601	602	602	602	603	603	603	604	604	602	1,18
		Средн.	916	918	919	919	920	921	922	922	923	924	925	927	921	1,8
		Низкий	1313	1316	1317	1319	1320	1321	1322	1322	1323	1325	1326	1329	1321	2,58
	Объект в целом	Детерм.	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	1,0
		Высок.	600	601	601	601	602	602	602	603	603	603	604	604	602	1,18
		Средн.	916	918	919	919	920	921	922	922	923	924	925	927	921	1,8
		Низкий	1313	1316	1317	1319	1320	1321	1322	1322	1323	1325	1326	1329	1321	2,58
$R = 2$	Луч	Детерм.	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	1,0
		Высок.	374	375	375	375	376	376	376	377	377	377	378	378	376	1,18
		Средн.	570	572	573	573	574	575	575	576	577	578	578	580	575	1,8
		Низкий	817	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	832	825	2,58
	Объект в целом	Детерм.	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	1,0
		Высок.	375	376	376	376	377	377	377	377	378	378	378	378	377	1,18
		Средн.	573	574	575	575	576	577	577	578	578	578	578	580	577	1,8
		Низкий	821	823	824	825	826	827	827	828	829	829	832	832	827	2,58
$R = 3$	Луч	Детерм.	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	1,0
		Высок.	298	299	299	300	300	300	301	301	301	302	302	303	301	1,18
		Средн.	454	456	457	458	458	459	460	460	461	462	463	464	459	1,8
		Низкий	651	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	666	659	2,57
	Объект в целом	Детерм.	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	1,0
		Высок.	300	301	301	301	301	302	302	302	302	303	303	303	302	1,18
		Средн.	458	460	460	461	461	462	462	463	463	464	464	464	462	1,8
		Низкий	657	658	660	661	661	662	662	663	663	665	666	666	662	2,59
$R = 6$	Луч	Детерм.	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	1,0
		Высок.	222	223	224	224	224	224	225	225	225	226	226	227	225	1,17
		Средн.	337	339	340	341	342	342	343	344	344	345	346	348	343	1,79
		Низкий	483	486	488	489	490	491	492	493	494	495	496	499	491	2,56
	Объект в целом	Детерм.	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	1,0
		Высок.	225	225	226	226	226	226	226	227	227	227	227	227	226	1,18
		Средн.	343	344	345	345	346	346	347	348	348	348	348	348	346	1,8
		Низкий	493	494	495	495	496	496	497	499	499	499	499	499	497	2,59

параллельного функционирования исполнителей) увеличивается. Так, для низкого уровня организации исполнителей отклонение математического ожидания окончания строительства объекта от соответствующих значений каждого луча составило для двух исполнителей 2 дня, для трех 3 дня и для шести исполнителей — 6 дней.

Выполненный расчет вариантов комплексного потока с вероятностными временными параметрами для разных уровней исполнителей (высокий, средний, низкий), представленный в табл. 1, показал, что в сравнении с детерминированными оценками продолжительность потока увеличивается для высокого уровня на 18 %, для среднего на 80 % и для низкого на 160 %.

В этих условиях выражение (7) приобретает следующий вид:

$$\Delta T = K \times \frac{L}{v} \left( 1 - \frac{1}{R} \right). \quad (11)$$

Здесь  $K$  — коэффициент учета уровня организации исполнителей, ( $K = 1,18; 1,8; 2,6$ ).

Тогда с учетом уровня организации исполнителей и вероятностных временных параметров комплексного потока оптимальное число исполнителей при строительстве линейно-протяженного объекта определяется следующей зависимостью:

$$R^{\text{опт}} = \sqrt{K \times \frac{L \times S(t)}{v \times S(R)}}. \quad (12)$$

Выражения (10) и (12) показывают, что оптимальное число исполнителей растет с увеличением протяженности объекта, с уменьшением темпа объектного потока, с ростом эффекта от сокращения сроков строительства в сравнении с затратами на привлечение ресурсов. Кроме того, с ухудшением уровня организации исполнителей их число также должно

Таблица 2

**Расчет сравнительной эффективности организационных схем строительства объекта (в сравнении с однолучевой схемой)**

Число лучей (исполнителей)	Уровень организации	$P(t) = 0,5$ (дн.)	$\Delta T$ (дн.)	$S(t) \times \Delta T$ (тыс. руб.)	$S(R) \times R$ (тыс. руб.)	$Y$ (тыс. руб.)
$R = 1$	Детермин. оценки	512	0	0	-700	-700
	Высокий	602	0	0	-700	-700
	Средний	921	0	0	-700	-700
	Низкий	1321	0	0	-700	-700
$R = 2$	Детермин. оценки	320	192	1920	-1400	520
	Высокий	377	225	2250	-1400	850
	Средний	577	344	3440	-1400	2040
	Низкий	827	494	4940	-1400	3540
$R = 3$	Детермин. оценки	256	256	2560	-2100	460
	Высокий	302	300	3000	-2100	900
	Средний	462	459	4590	-2100	2490
	Низкий	662	659	6590	-2100	4490
$R = 6$	Детермин. оценки	192	320	3200	-4200	-1000
	Высокий	226	376	3760	-4200	-440
	Средний	346	575	5750	-4200	1550
	Низкий	497	824	8240	-4200	4040

увеличиваться, так как расчетная продолжительность строительства в этом случае существенно (до 150–160 %) возрастает.

В табл. 2 представлен расчет эффекта (затрат) для различных организационных схем, представленных выше, с учетом следующих данных: ( $L = 19,2$  км,  $v = 0,05$  км/день), затраты на привлечение одного исполнителя  $S(R)$  составляют 700 тыс. руб.; ожидаемый эффект от сокращения строительства объекта на 1 день  $S(t)$  составит 10 тыс. руб.

По данным табл. 2 построены графики изменения сравнительного эффекта (затрат) при использовании различных организационных схем для исполнителей разного уровня организации (рис. 3).

Из графика видно, что со снижением уровня организации исполнителей их оптимальное число для строительства объекта должно увеличиваться.

Особо следует подчеркнуть, что представленные расчеты показывают лишь сравнительный (в сравнении с однолучевой схемой) возможный эффект от привлечения дополнительных исполнителей, причем для исполнителей низкого уровня этот эффект будет выше, так как расчетная продолжительность строительства будет существенно превышать его детерминированную оценку.

Использование зависимостей (10) и (12) позволяет точно определить оптимальное число исполнителей. Так, для расчетного примера ( $L = 19,2$  км,  $v = 0,05$  км/день) их оптимальное число составит в случае детерминированных оценок

$$R^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{L \times S(t)}{v \times S(R)}} = \sqrt{\frac{19,2 \times 10\,000}{0,05 \times 700\,000}} = 2,34.$$

С учетом вероятностных временных параметров для исполнителей высокого уровня организации

$$R^{\text{опт}} = \sqrt{K \times \frac{L \times S(t)}{v \times S(R)}} = \sqrt{1,18 \times \frac{19,2 \times 10\,000}{0,05 \times 700\,000}} = 2,54.$$

Для исполнителей среднего и низкого уровня организации их оптимальное число составит 3,14 и 3,78.

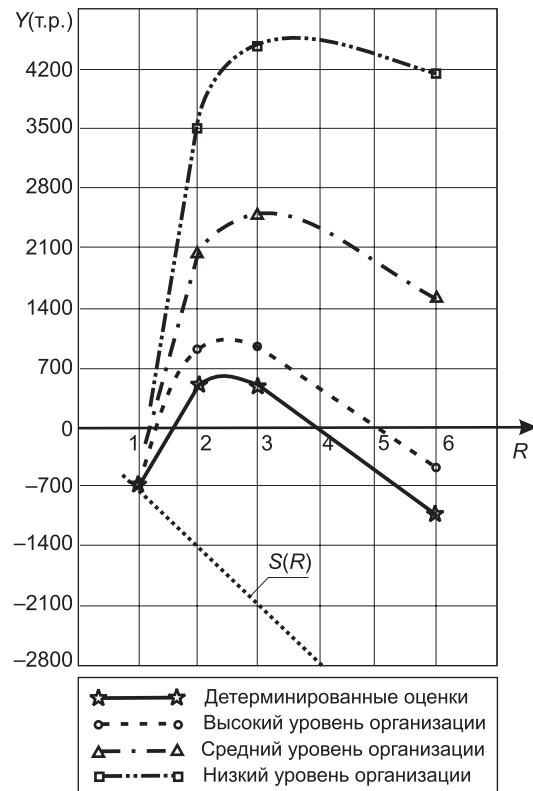


Рис. 3. Графики сравнительной эффективности организационных схем

Таким образом, для сооружения линейно-протяженного объекта с параметрами, изложенными в [2], рациональное число лучей может изменяться от 2 до 4, в зависимости от уровня организации соответствующих исполнителей.

**Выводы.** 1. Строительство линейно-протяженного объекта может реализовываться по различным организационным схемам в зависимости от местных условий и наличия ресурсов. Получена зависимость (7), позволяющая оценить возможное сокращение продолжительности строительства объекта  $R$  исполнителями (по сравнению с однолучевой схемой).

2. Выполненное сопоставление затрат, связанных с привлечением дополнительных исполнителей с эффектом от возможного сокращения сроков строительства, позволяет на основе выражения (10) определить рациональное число исполнителей в случае детерминированных временных оценок.

3. Учет вероятностных временных параметров выполнения работ в значительной степени корректирует полученные результаты. Увеличиваются расчетные сроки строительства: на 18 % при высоком уровне организации исполнителей, на 80 % — при среднем и на 160 % — при низком. Кроме того, для нескольких исполнителей отклонение вероятных сроков выполнения работ по объекту дополнительно увеличивается в сравнении с детерминированными оценками за счет параллельного функционирования исполнителей.

4. Полученное выражение (12) показывает, что оптимальное число исполнителей растет с увеличением протяженности объекта, с уменьшением темпа объектного потока, с ростом эффекта от сокращения сроков строительства в сравнении с затратами на привлечение ресурсов. Наряду с этим с ухудшением уровня организации исполнителей их число также должно увеличиваться, так как расчетная продолжительность строительства в этом случае существенно (до 150–160 %) возрастает.

Так, если для расчетного примера оптимальное число исполнителей (лучей) в случае детерминированных оценок составило 2,34; для расчетов с вероятностными временными параметрами при высоком уровне организации исполнителей — 2,54, при среднем уровне — 3,14, при низком — 3,78.

Таким образом, рациональное число лучей будет изменяться в пределах от 2 до 4 в зависимости от уровня организации соответствующих исполнителей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Расчет вероятностных параметров параллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 35–42.
2. Калугин, Ю.Б. Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 30–39.

*КАЛУГИН Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru  
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

Получено 08.11.12

**Kalugin Yuri Borisovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

## **CHOICE OF A RATIONAL SCHEME ORGANIZATION THE CONSTRUCTION OF LINEAR OBJECT**

An approach which allows us to calculate the optimal number of performers building linearly extended object based on a resource-time criteria. Method is implemented, including taking into account the probability of temporal parameters.

**Key words:** linear-extended object, organizational schemes of construction, the optimal number of performers, resource-time criteria, probabilistic timing.

### **REFERENCES**

1. Kalugin, Yu.B. Calculation of probabilistic parameters of parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 35–42.
  2. Kalugin, Yu.B. Planning of works with probabilistic temporary parameters in hierarchical structures [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 30–39.
-

УДК 69.002.5 : 621.873.1/.2

В.Н. АНФЕРОВ, С.М. КУЗНЕЦОВ, С.И. ВАСИЛЬЕВ

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СТРЕЛОВЫХ КРАНОВ

На основе созданной имитационной модели можно оценить организационно-технологическую надежность и риск работы стреловых кранов на конкретных строительных объектах.

**Ключевые слова:** организационно-технологическая надежность, стреловые краны, имитационное моделирование.

Для оценки организационно-технологической надежности (ОТН) работы стреловых кранов разработаны соответствующие имитационные модели [1]. Под организационно-технологической надежностью понимается вероятность достижения рассматриваемой системой заданного результата строительного производства. Процесс строительства зданий и сооружений — сложная стохастическая система. Классические методы математической теории надежности не учитывают реальную ситуацию и их применение в чистом виде не является приемлемым. Выход из данной ситуации возможен лишь при детальном изучении специфики строительного производства, а именно многообразных, многочисленных организационно-технологических сбоев, дестабилизирующих производство факторов, а также принципов взаимодействия этих факторов с имеющимися сбоями [2]. Факторы, влияющие на организационно-технологическую надежность строительного производства, приведены на рис. 1.

Согласно экспертному анализу показателя ОТН календарного плана строительства, наиболее рациональными значениями для ОТН являются значения в диапазоне от 0,5 до 0,7 [2]. Превышение этих значений, приближение ОТН к единице свидетельствует о так называемой избыточной надежности и перерасходе вкладываемых в обеспечение надежности строительства ресурсов. ОТН дает возможность оценивать сформированные календарные планы строительства объектов не только с точки зрения качества организационно-технологических характеристик, но и с точки зрения надежности их достижения.

В настоящее время существует пять способов оценки организационно-технологической надежности работы строительных машин с использованием:

- статистических моделей;
- вероятностных экономико-математических моделей;
- имитационных моделей;
- аналитический;
- с помощью метода экспертных оценок.

В данной статье использована приведенная ниже имитационная модель работы стреловых кранов, применяемых при строительстве зданий и сооружений [3].

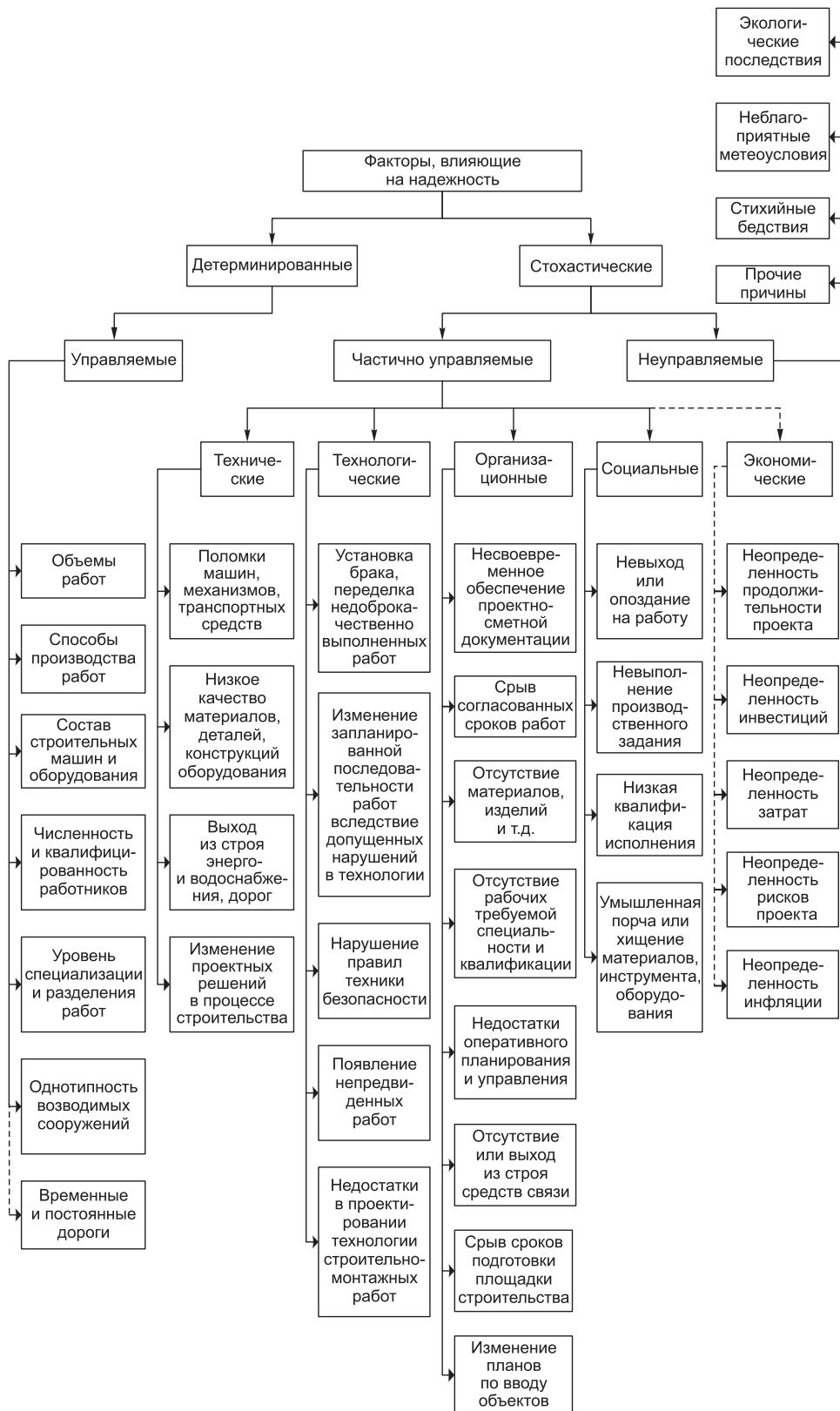


Рис. 1. Дестабилизирующие факторы строительного производства

$$\Pi_{\kappa} = \frac{60 \cdot Q \cdot T_c \cdot K_B}{T_u}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n (1,1 \cdot P_{mi} + P_{ci}) \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (2)$$

$$T_u = T_{маш} + T_{руч}, \quad (3)$$

$$T_{маш} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{2 \cdot H_{ni}}{V_n} + \frac{2 \cdot \alpha_i}{360 \cdot w} + \frac{S_{ti}}{V_t} \right) \cdot K_c + \frac{S_{di}}{V_d} \right] \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (4)$$

$$T_{руч} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ручi} \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (5)$$

$$H_{ni} = H_{oi} + H_3 + H_{элi} + H_{ci}, \quad (6)$$

$$T_c^H \leq T_c \leq T_c^K,$$

$$K_B^H \leq K_B \leq K_B^K,$$

$$H_{ni}^H \leq H_{bi} \leq H_{bi}^K,$$

$$V_n^H \leq V_n \leq V_n^K,$$

$$\alpha_i^H \leq \alpha_i \leq \alpha_i^K,$$

$$w^H \leq w \leq w^K,$$

$$S_{ti}^H \leq S_{ti} \leq S_{ti}^K,$$

$$V_t^H \leq V_t \leq V_t^K,$$

$$S_{di}^H \leq S_{di} \leq S_{di}^K,$$

$$V_d^H \leq V_d \leq V_d^K,$$

$$H_{oi}^H \leq H_{oi} \leq H_{oi}^K,$$

где  $n$  — количество проектировок;

$Q$  — средняя масса элементов, монтируемых краном;

$T_u$  — средняя продолжительность рабочего цикла (складывающаяся из времени, затрачиваемого на строповку груза, на перемещение груза к месту монтажа, на его удержание при временном закреплении, на его расстроповку и возвращение грузозахватного органа в исходное положение);

$T_{руч}$  — среднее время ручных операций (строповка элементов, установка, временное крепление, выверка и расстроповка);

$T_{\text{маш}}$  — среднее время машинных операций, включающее подъем крюка с грузом и опускание свободного крюка, поворот стрелы вокруг вертикальной оси при подаче элемента от площадки складирования к месту его установки, передвижку крана вдоль фронта работ;

$P_{Mi}$  — масса  $i$ -го элемента, поднимаемого краном;

$P_{ci}$  — масса строповочных устройств и монтажной оснастки для  $i$ -го элемента;

$H_3$  — запас хода по нормам Ростехнадзора между опорой и элементом при его перемещении к месту установки;

$H_{\text{эл}i}$  — высота монтируемого  $i$ -го элемента;

$H_{ci}$  — монтажная высота строповочных приспособлений для монтажа  $i$ -го элемента;

$N_i$  — количество  $i$ -х элементов;

*равномерно распределенные случайные величины:*

$T_c$  — продолжительность смены;

$K_b$  — коэффициент использования крана по времени;

$H_{pi}$  — средняя высота подъема и опускания крюка крана при монтаже  $i$ -го элемента, принимается ориентировочно по монтажному разрезу;

$V_p$  — средняя скорость перемещения крюковой подвески по вертикали;

$\alpha_i$  — средний угол поворота крана при монтаже  $i$ -го элемента;

$w$  — скорость вращения крана (число оборотов стрелы);

$S_{ti}$  — расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов с балочной стрелой при монтаже  $i$ -го элемента;

$V_t$  — скорость перемещения грузовой каретки;

$S_{di}$  — средняя длина продольной передвижки крана при монтаже  $i$ -го элемента;

$V_d$  — скорость перемещения крана;

$K_c$  — коэффициент совмещения операций;

$H_{oi}$  — средняя отметка, на которую устанавливают  $i$ -й элемент (от уровня стоянки крана до опоры);

$T_{\text{руч}i}$  — время ручных операций при монтаже  $i$ -го элемента;

*диапазоны изменения случайных величин:*

$T_c^h$  и  $T_c^k$  — минимальная и максимальная продолжительность смены;

$K_b^h$  и  $K_b^k$  — минимальный и максимальный коэффициент использования машины по времени;

$H_{pi}^h$  и  $H_{pi}^k$  — минимальная и максимальная высота подъема и опускания крюка крана при монтаже  $i$ -го элемента;

$V_p^h$  и  $V_p^k$  — минимальная и максимальная скорость перемещения крюка по вертикали;

$w^h$  и  $w^k$  — минимальная и максимальная скорость вращения крана;

$\alpha_i^h$  и  $\alpha_i^k$  — минимальный и максимальный угол поворота крана при монтаже  $i$ -го элемента;

$S_{ti}^h$  и  $S_{ti}^k$  — минимальное и максимальное расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов с решетчатой стрелой при монтаже  $i$ -го элемента;

$V_t^h$  и  $V_t^k$  — минимальная и максимальная скорость перемещения грузовой каретки;

$S_{di}^h$  и  $S_{di}^k$  — минимальная и максимальная длина продольной передвижки крана при монтаже  $i$ -го элемента;

$V_{di}^h$  и  $V_{di}^k$  — минимальная и максимальная скорость перемещения крана;

$K_c^h$  и  $K_c^k$  — минимальный и максимальный коэффициент совмещения операций;

$H_{oi}^h$  и  $H_{oi}^k$  — минимальная и максимальная средняя отметка, на которую устанавливают  $i$ -й элемент;

$T_{ручi}^h$  и  $T_{ручi}^k$  — минимальное и максимальное время ручных операций при монтаже  $i$ -го элемента.

Проведенные исследования с помощью такой имитационной модели позволили выявить факторы, влияющие на ОТН работы монтажных кранов (см. таблицу).

Для автоматизации расчета ОТН использования комплектов и отдельных строительных машин с помощью имитационных моделей в СГУПС разработано соответствующее программное обеспечение. Последнее позволяет для любой имитационной модели работы строительных машин методом Монте-Карло получить выборку заданного объема. После формирования выборки определяется ее принадлежность закону нормального распределения и строится кривая нормального распределения. Далее с заданным уровнем ОТН определяется производительность, себестоимость и другие показатели работы строительных машин.

На рис. 2 приведены результаты работы программы «*Oth*» [4].

Для автоматизации формирования парков и комплексов стреловых кранов с учетом ОТН надежности их работы можно воспользоваться программой «*Park*» [5]. Исходными данными для этого программного обеспечения являются статистические показатели выборок по возможным сценариям использования комплектов и отдельных строительных машин, полученные в результате работы программы «*Oth*». На рис. 3

#### Факторы, влияющие на ОТН работы стреловых кранов

Показатель	Обозначение
Продолжительность смены	$T_c$
Коэффициент использования по времени	$K_B$
Средняя высота подъема и опускания крюка крана при монтаже $i$ -го элемента, принимается ориентировочно по монтажному разрезу	$H_{pi}$
Средняя скорость перемещения крюка по вертикали	$V_p$
Средний угол поворота крана при монтаже $i$ -го элемента	$\alpha_i$
Скорость вращения крана (число оборотов стрелы)	$w$
Расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов при монтаже $i$ -го элемента	$S_{ti}$
Скорость перемещения грузовой каретки	$V_t$
Средняя длина продольной передвижки крана при монтаже $i$ -го элемента	$S_{di}$
Скорость перемещения крана	$V_d$
Коэффициент совмещения операций	$K_c$
Средняя отметка, на которую устанавливают $i$ -й элемент (от уровня стоянки крана до опоры)	$H_{oi}$
Время ручных операций при монтаже $i$ -го элемента	$T_{ручi}$

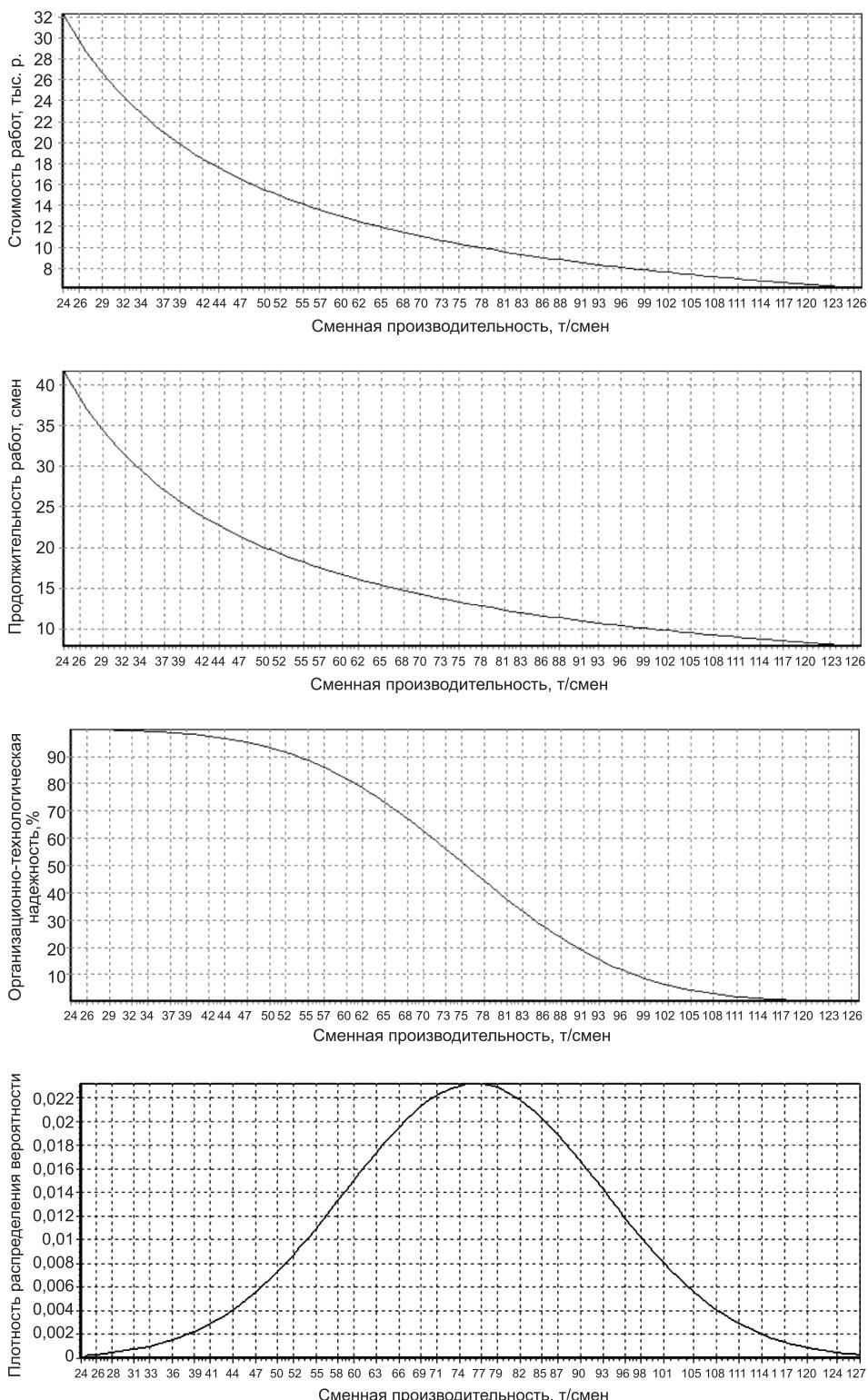


Рис. 2. Зависимости стоимости и продолжительности производства работ, ОТН и плотности распределения вероятности от сменной производительности гусеничного крана СКГ-25-36

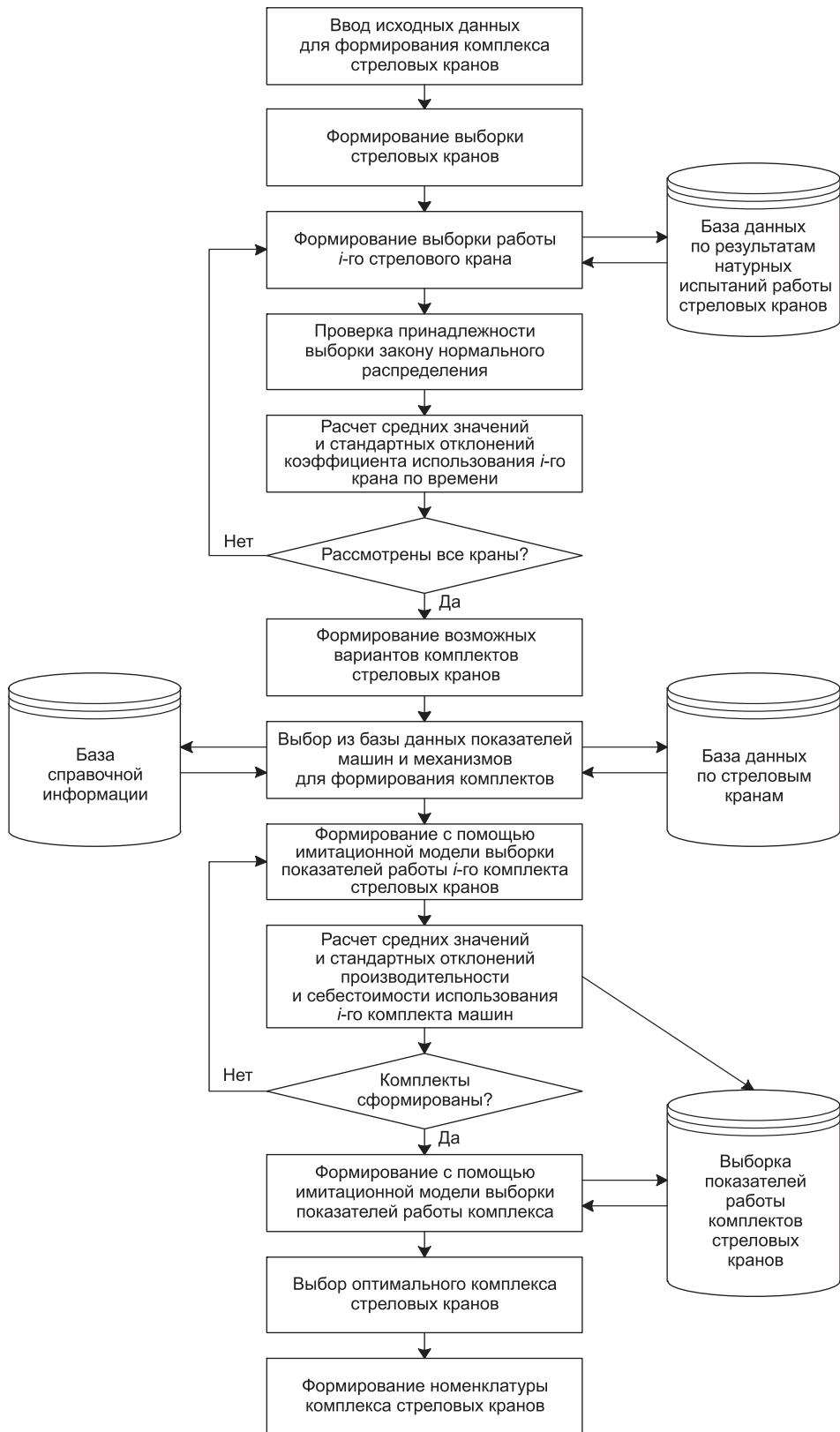


Рис. 3. Схема формирования комплекса стреловых кранов с заданной ОТН их работы

приведена схема формирования парков и комплексов стреловых кранов с заданным уровнем ОТН их работы.

Разработанные в СГУПС имитационные модели оценки организационно-технологической надежности использования стреловых кранов позволяют по единой методике оценивать надежность их работы. Предложенный алгоритм формирования парков стреловых кранов с учетом их применения в реальных комплектах является универсальным. Он может быть использован для производства земляных работ, монтажа зданий и т. д. При этом можно оценить эффективность приобретения новых стреловых кранов с учетом уже имеющейся в парке номенклатуры кранов.

**Вывод.** Метод оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов с помощью имитационных моделей позволяет прогнозировать основные показатели их работы. Этот метод является универсальным и его можно использовать для оценки работы ОТН любых парков, комплексов, комплектов и отдельных строительных машин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, С.М. Имитационные модели для оценки организационно-технологической надежности при производстве бетонных работ [Текст] / С.М. Кузнецов, М.Ю. Серов, М.М. Титов // Механизация строительства. — 2010. — № 8. С. 27–30.
2. Системотехника строительства. Энциклопедический словарь / под ред. А.А. Гусакова. — М. : Фонд «Новое тысячелетие», 1999. — 432 с.
3. Кузнецов, С.М. Системотехника ресурсосберегающих технологических процессов строительства. Монография / С.М. Кузнецов, О.А. Легостаева. — Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2004. — 233 с.
4. ОТН работы строительных машин [Текст] : свидетельство об отраслевой регистрации разработки / С.М. Кузнецов, К.С. Кузнецова. — № 9087 ; от 26.09.2007 г.
5. Формирование парка строительных машин [Текст] : свидетельство об отраслевой регистрации разработки / С.М. Кузнецов, К.С. Кузнецова. — № 6687 ; от 14.08.2006 г.

*АНФЕРОВ Валерий Николаевич, д-р техн. наук, проф.*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

*КУЗНЕЦОВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ВАСИЛЬЕВ Сергей Иванович, канд. техн. наук, доц.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено после доработки 14.11.12

**Anferov Valery Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Kuznetsov Sergey Mihajlovich**, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Vasilev Sergey Ivanovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

#### IMITATING MODEL OF AN ESTIMATION OF ORGANIZATIONAL-TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF WORK CRANES

On the basis of the created imitating model it is possible to estimate organizational-technological reliability and risk of work boom cranes on concrete building objects.

Key words: organizational-technological reliability, cranes, imitating modeling.

## REFERENCES

1. Kuznetsov, S.M. Imitating's of model for an estimation of organizational-technological reliability by manufacture of concrete works [Text] / S.M. Kuznetsov, M.Yu. Serov, M.M. Titov // Mechanization building . — 2010. — N 8. — P. 27–30.
  2. Building system engineering. The encyclopedic dictionary / under A.A. Gusakova's edition. — M. : Fund «New millenium», 1999. — 432 p.
  3. Kuznetsov, S.M. System engineering's smiths of resource-saving technological processes of building. The monography / S.M. Kuznetsov, O.A. Legostaeva. — Novosibirsk : Publishing house SGUPS, 2004. — 233 p.
  4. OTN works of building cars [Text] : certificate about branch registration of working / S.M. Kuznetsov, K.S. Kuznetsova. — N 9087 ; from 26.09.2007.
  5. Formation of park of building cars [Text] : certificate about branch registration of working / S.M. Kuznetsov, K.S. Kuznetsova. — N 6687 ; from 14.08.2006.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

**УДК 628.5 : 697.98.001**

**И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА**

### **ЭЖЕКЦИЯ ВОЗДУХА УСКОРЕННЫМ ПОТОКОМ ЧАСТИЦ В ПЕРФОРИРОВАННОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ С БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ\***

#### **Сообщение 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ\*\***

Рассматривается поток частиц в перфорированной круглой трубе, вокруг которой предусмотрена цилиндрическая байпасная камера. Получены гидродинамические уравнения для оценки межкомпонентного взаимодействия в вертикальном перфорированном желобе при перемещении в них гравитационных потоков сыпучего материала и эжектируемого воздуха. Численное решение полученной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и аналитическое решение линеаризованных уравнений позволили выявить закономерности изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном желобе, давления в байпасной камере по длине желоба, при увеличении перфорации стенок, в зависимости от размеров байпасной камеры, числа эжекции. Определены рациональный диапазон степени перфорации эжекции, коэффициентов сопротивления и соотношения поперечных сечений камеры и трубы, обеспечивающих наибольшее снижение объемов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

**Ключевые слова:** аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха, энергосбережение.

**5. Численное решение задачи.** Для удобства численного решения задачи перейдем к новым функциям:

$$y_1 = u / u_0; y_2 = \frac{(p_\omega - p)}{\zeta_k u_0^2} = \frac{\Delta p}{\zeta_k u_0^2},$$

значительно упрощающим граничные условия.

Для того чтобы ввести функцию  $y_2$ , преобразуем исходное уравнение (7). Продифференцируем соотношение (8) по  $x$  и, подставляя в полученный результат уравнение (7), найдем

$$\frac{d\Delta p}{dx} = [4u(1 - r^{-2}) + 4r^{-2}u_0] \frac{du}{dx} - Le \left| 1 - \frac{u}{v} \right| (v - u). \quad (44)$$

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проекты НШ-588.2012.8, МК-102.2013.8), РФФИ (проект № 12-08-97500-р\_центр\_a), плана стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

\*\* Сообщение 1 опубликовано в № 10 2012 г., сообщение 2 в № 11-12 2012 г.

Тогда с учетом введенных функций исходная система уравнений (6) и (44) примет вид

$$y'_1 = E \sqrt{\zeta_k} \sqrt{|y_2|} \cdot \text{signum}(y_2); E = \frac{\tilde{\Pi} \tilde{l} \epsilon}{\tilde{s}_t \sqrt{\zeta_0}}; \quad (45)$$

$$y'_2 = \frac{y'_1}{\zeta_k} [4y_1(1 - r^{-2}) + 4r^{-2}] - \frac{\text{Le}}{\zeta_k v} |v/u_0 - y_1| (v/u_0 - y_1), \quad (46)$$

а граничные условия в силу того, что

$$\Delta p(0) = \zeta_n u_0^2 + p_a; \Delta p(1) = -\zeta_k u_0^2 + p_a$$

имеют вид

$$y_1(0) = 1; y_2(0) = \frac{\zeta_n}{\zeta_k} + A_1; \quad (47)$$

$$y_1(1) = 1; y_2(1) = A_1 + 1, \quad (48)$$

где

$$A_1 = p_a / (\zeta_k u_0^2).$$

Наибольшие трудности при численном решении задачи Коши в нашем случае возникают в связи с тем, что искомыми как раз и являются скорость воздуха при входе в перфорированную трубу (при выходе из трубы) —  $u_0$  и избыточное давление в начале (в конце) байпасного канала —  $p_a$ . Эти величины являются основными искомыми параметрами задачи. А краевую задачу будем решать методом пристрелки. Предстоит решить «артиллерийскую» задачу о поражении «мишени» в точках  $u_0$  и  $p_a$  при неизвестных начальных положениях орудия и угла наклона ствола. Как показали предварительные расчеты, траектории «снаряда» оказались крутопадающими, что еще более ухудшает поиск начальных положений орудия — требуется применение повышенной точности вычислений (увеличение мантиссы числа до 50 и более разрядов). На этом фоне особенно важным является оценка начальных приближений параметров  $u_0$  и  $p_a$ . Предварительные расчеты показали, что при  $\zeta_n = 0,5$  и  $\zeta_k = 1$  имеем

$$A_1 \approx 0,25,$$

и поэтому в качестве начального  $p_a$  можно принять

$$p_a \approx -0,25u_0^2,$$

а  $u_0 \equiv u_n$  — равной скорости эжектируемого воздуха в канале с непроницаемыми стенками  $u_2$ .

Эти параметры служат отправными, далее идет нудный традиционный метод пристрелки. В начале при заданных  $\text{Le}$ ,  $n$ ,  $\zeta_n$ ,  $\zeta_k$  определяется  $u_2$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } 0 \leq \text{Le} \leq \text{Le}_0: \frac{3u_2^2}{(1-u_2)^3 - (n-u_2)^3} = \frac{2\text{Le}}{(1-n^2)\sum \zeta}, \\ \text{при } \infty \geq \text{Le} \geq \text{Le}_0: \frac{3u_2^2}{(1-u_2)^3 - (u_2-n)^3} = \frac{2\text{Le}}{(1-n^2)\sum \zeta}, \end{array} \right.$$

которая и используется для задания  $u_n$  и, следовательно,  $p_a$ . Помимо этого вводятся параметры  $E$  и  $r$ . Решается задача Коши с учетом начальных условий (47). Выполняется численное интегрирование системы (45)–(46). Проверяется первое условие (48), если окажется  $y_1(1) > 1$ , то задается новое значе-

ние  $u_0 < u_n$  (если  $y_1(1) < 1$ , то  $u_0 > u_n$ ). Величина  $p_a$  не изменяется. Повторяется интегрирование системы. Снова проверяется условие (23) до тех пор, пока

$$|y_1(1) - 1| < \varepsilon_1 \approx 0,001, \quad (49)$$

где  $\varepsilon_1$  — наперед заданная погрешность. После этого проверяется второе условие (48), если окажется, что оно не выполняется, корректируется  $p_a$  в ту или иную сторону. Выполняется при новом значении корректировка  $u_n$  до тех пор, пока снова будет обеспечено условие (49). Проверяется второе условие (48), корректируется снова  $p_a$  и процесс проверяется до тех пор, пока не будет обеспечено допустимое отклонение второй функции

$$|y_2(1) - 1 + A_1| < \varepsilon_2 \approx 0,001.$$

Можно порядок корректировки изменить, т.е. фиксируется  $u_n$ , а корректируется  $p_a$ .

Из сопоставления результатов численного интегрирования видно, что отклонение скоростей эжектируемого воздуха для условного потока ( $u_p$ ) от скорости эжектируемого воздуха для равнускоренного потока ( $u_q$ ) пренебрежимо мало (табл. 2). Как и в ранее рассмотренном случае канала с непроницаемыми стенками (при  $E = 0$ ), отклонения этих скоростей при линеаризации объемных сил более заметны (табл. 3 и 4). Однако и в этом случае они не превышают точности промышленного эксперимента. Заметно устойчивое положительное отклонение, поскольку по абсолютной величине

$$\text{Le} \frac{|v - u|}{v} (v - u) < \text{Le}(v - u),$$

и поэтому получаем несколько завышенные объемы эжекции (т.е. имеем некоторый запас).

Таким образом, численные расчеты показали, что решение краевой задачи с неизвестными параметрами  $u_0$  и  $p_a$  методом пристрелки в условиях крутопадающих функций  $u(x)$  требует большего времени счета и точности числовых значений.

Таблица 2

**Сопоставление результатов численного исследования изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном канале при равнускоренном ( $u_q$ ) и условном потоке, скорость которого изменяется по параболическому закону ( $u_p$ )**

$x$	При $\text{Le} = 1; r = 1; E = 1$			При $\text{Le} = 5; r = 1; E = 1$		
	$u_q$	$u_p$	$\Delta, \%$	$u_q$	$u_p$	$\Delta, \%$
0	0,3520	0,3670	4,09	0,4800	0,5100	5,88
0,1	0,3566	0,3720	4,14	0,4808	0,5102	5,76
0,2	0,3644	0,3808	4,31	0,4884	0,5181	5,73
0,3	0,3745	0,3923	4,54	0,5015	0,5321	5,75
0,4	0,3860	0,4054	4,78	0,5182	0,5500	5,78
0,5	0,3983	0,4190	4,94	0,5370	0,5692	5,66
0,6	0,4103	0,4320	5,02	0,5562	0,5880	5,41
0,7	0,4199	0,4425	5,11	0,5733	0,6033	4,97
0,8	0,4132	0,4325	4,46	0,5759	0,5969	3,52
0,9	0,3889	0,4061	4,24	0,5469	0,5630	2,86
1,0	0,3520	0,3670	4,09	0,4968	0,5100	2,59

Таблица 3

**Сопоставление результатов численного исследования изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном канале при равноускоренном потоке ( $u_q$ ) и при замене объемных сил межкомпонентного взаимодействия линейной зависимостью ( $\text{Le}(v - u)$ ) при равноускоренном потоке ( $u_{Lq}$ ) при  $E = 1$ ;  $r = 1$ ;  $n = 0,4319$**

$x$	При $\text{Le} = 1,0$			При $\text{Le} = 5,0$		
	$u_q$	$u_{Lq}$	$\Delta_{Lq}, \%$	$u_q$	$u_{Lq}$	$\Delta_{Lq}, \%$
0	0,3520	0,4300	18,10	0,4800	0,6080	21,05
0,1	0,3566	0,4364	18,29	0,4808	0,5943	19,10
0,2	0,3644	0,4468	18,44	0,4884	0,5940	17,78
0,3	0,3745	0,4599	18,57	0,5015	0,6091	17,67
0,4	0,3860	0,4746	18,67	0,5182	0,6304	17,80
0,5	0,3983	0,4900	18,71	0,5370	0,6548	18,00
0,6	0,4103	0,5048	18,72	0,5562	0,6799	18,19
0,7	0,4199	0,5163	18,67	0,5733	0,7023	18,37
0,8	0,4132	0,5062	18,37	0,5759	0,7074	18,59
0,9	0,3889	0,4756	18,23	0,5469	0,6712	18,52
1,0	0,3520	0,4300	18,10	0,4968	0,6080	18,29

Таблица 4

**Сопоставление результатов численного исследования изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном канале при равноускоренном потоке ( $u_q$ ) (при  $E = 1$ ;  $r = 1$ ;  $n = 0,4319$ ), а также при замене объемных сил межкомпонентного взаимодействия линейной зависимостью ( $\text{Le}(v - u)$ ) для ускоренного (условного) потока ( $u_{Lu}$ )**

$x$	При $\text{Le} = 1,0$			При $\text{Le} = 5,0$		
	$u_q$	$u_{Lu}$	$\Delta_{Lu}, \%$	$u_q$	$u_{Lu}$	$\Delta_{Lu}, \%$
0	0,3520	0,4310	18,33	0,4800	0,6060	20,79
0,1	0,3566	0,4367	18,34	0,4808	0,5916	18,73
0,2	0,3644	0,4467	18,42	0,4884	0,5902	17,25
0,3	0,3745	0,4596	18,52	0,5015	0,6054	17,16
0,4	0,3860	0,4743	18,62	0,5182	0,6274	17,31
0,5	0,3983	0,4898	18,68	0,5370	0,6526	17,71
0,6	0,4103	0,5048	18,72	0,5562	0,6785	17,94
0,7	0,4199	0,5165	18,70	0,5733	0,7016	18,29
0,8	0,4132	0,5070	18,50	0,5759	0,7067	18,51
0,9	0,3889	0,4766	18,40	0,5469	0,6700	18,37
1,0	0,3520	0,4310	18,33	0,4968	0,6060	18,02

**6. Результаты расчета и их обсуждение.** Сопоставление результатов интегрирования линеаризованной задачи, описываемой дифференциальным уравнением (37) с численным решением «точной» системы (уравнения (45) и (46)), представлено на рис. 4: как видно из этих данных функции  $u(x)$  практически тождественны как по характеру изменения, так и по абсолютной величине скорости эжектируемого воздуха.

Займемся теперь исследованиями функции  $u_0 = f_0(E, r, \text{Le}, \zeta_n, \zeta_k, \zeta_0)$ , определяющей изменение расхода эжектируемого воздуха от степени перфорации

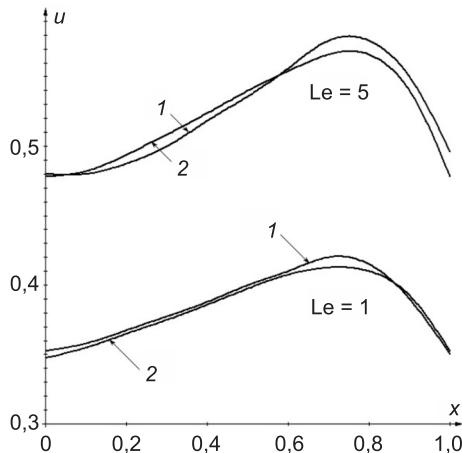


Рис. 4. Изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном канале в байпасной камере (при  $E = 1$ ;  $r = 1$ ;  $n = 0,4319$ )  
1 — результаты численного решения «точного» уравнения (система (45) и (46)); 2 — аналитическое решение линеаризованного уравнения (37) (при  $v = n + b_1x + b_2x^2 / 2$ )

1 — результаты численного решения «точного» уравнения (система (45) и (46)); 2 — аналитическое решение линеаризованного уравнения (37) (при  $v = n + b_1x + b_2x^2 / 2$ )

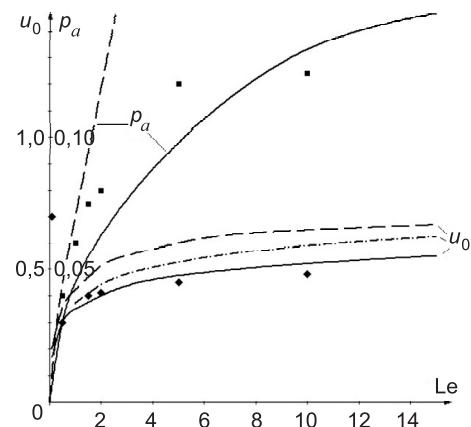


Рис. 5. Зависимость скорости эжектируемого воздуха  $Le$  и давления в байпасной камере  $p_a$  от числа  $u_0$  (при  $E = 1$ ;  $r = 1$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ ); сплошные кривые построены по формулам линеаризованной задачи; пунктирная — при максимальных силах  $k = 1$ ,  $Le(v - u)$ ; штрихпунктирная линия — для случая трубы с непроницаемыми стенками ( $E = 0$ ) по формуле (31); ◆ для  $u_0$ , ■ для  $p_a$  по результатам численного решения «точного» уравнения

ции стенок трубы, размера байпасной камеры, расхода потока частиц и аэродинамического сопротивления входного и выходного сечения трубы, а также отверстий перфорации (в численных примерах величины последних принимались  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ , если эти величины принимались другими, об этом указывалось в подрисуночных подписях).

Увеличение числа эжекции  $Le$ , как и в случае потока частиц в трубе с непроницаемыми стенками ( $E = 0$ ), способствует росту  $u_0$ . Заметны асимптотика этого роста (рис. 5) и снижение объемов эжекции по сравнению с потоком частиц в неперфорированной трубе ( $u_0 < u_2$  — штрихпунктирная кривая) в исследуемом диапазоне чи-

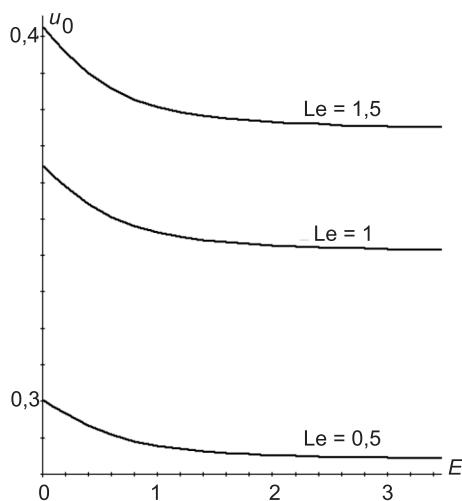


Рис. 6. Изменение скорости эжектируемого воздуха  $u_0$  при увеличении перфорации стенок трубы (при  $r = 1$ ;  $n = 0,431964$ ;  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1,0$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ )

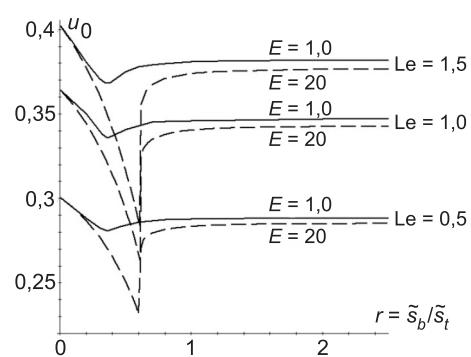


Рис. 7. Изменение скорости  $u_0$  в зависимости от размера байпасной камеры (при  $E = 2$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ )

сел Le. Еще больший эффект минимизации  $u_0$  наблюдается при увеличении степени перфорации (рис. 6) и здесь имеется асимптотика — при  $E \geq 2,5$  снижение величины  $u_0$  практически прекращается.

Роль размера байпасного канала (рис. 7) несколько иная. Четко наблюдается область (при  $r \approx 0,5 - 0,6$ ) минимума  $u_0$ . В интервале  $0 \leq r < 0,5$  величина  $u_0$  резко возрастает, достигая при  $r = 0$  величину  $u_2$  — скорости эжектируемого воздуха в трубе с непроницаемыми стенками (случай  $E = 0$ ). При увеличении  $r$  до 2,5 практически стабилизируется величина  $u_0$ .

Для удобства дальнейшего сравнения используем коэффициент снижения объемов эжекции

$$Ke = \frac{u_{13}}{u_0},$$

где  $u_{13}$  — скорость воздуха, эжектируемого условным потоком в трубе с непроницаемыми стенками при линеаризованной массовой силе межкомпонентного взаимодействия (величина  $u_{13}$  рассчитывается по формуле (33)). Как видно из данных табл. 5, снижение объемов эжекции за счет рециркуляции воздуха в байпасном канале тем выше, чем больше число Le и чем меньше  $n$  (тем больше высота перфорированной трубы). Еще более заметно снижение объемов эжекции при увеличении коэффициентов

Таблица 5  
Коэффициент снижения объемов эжекции (Ke) при  $E = 2,5$ ;  $r = 2$ ;  
 $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1,0$ ;  $\zeta_0 = 1,5$

Le	При $n$ , равном						
	0,3	0,4	0,4319	0,5	0,6	0,7	0,8
0,1	1,0324	1,0328	1,0329	1,0331	1,0333	1,0334	1,0334
0,2	1,0411	1,0419	1,0421	1,0424	1,0429	1,0432	1,0434
0,3	1,0467	1,0477	1,0479	1,0485	1,0491	1,0496	1,0500
0,5	1,0538	1,0552	1,0557	1,0565	1,0575	1,0583	1,0590
0,7	1,0584	1,0602	1,0608	1,0618	1,0632	1,0643	1,0652
1,0	1,0631	1,0654	1,0661	1,0675	1,0692	1,0707	1,0720
1,2	1,0653	1,0679	1,0687	1,0703	1,0723	1,0740	1,0755
1,4	1,0671	1,0700	1,0709	1,0726	1,0749	1,0768	1,0784
1,6	1,0686	1,0717	1,0727	1,0745	1,0770	1,0792	1,0810
1,8	1,0698	1,0732	1,0742	1,0762	1,0789	1,0812	1,0832
2,0	1,0709	1,0744	1,0755	1,0777	1,0806	1,0831	1,0852
2,2	1,0718	1,0755	1,0767	1,0790	1,0820	1,0847	1,0870
2,4	1,0725	1,0765	1,0777	1,0801	1,0834	1,0862	1,0886
2,6	1,0732	1,0779	1,0786	1,0811	1,0845	1,0875	1,0901
2,8	1,0738	1,0781	1,0794	1,0820	1,0856	1,0888	1,0915
3,0	1,0743	1,0787	1,0801	1,0829	1,0866	1,0899	1,0927
3,5	1,0753	1,0801	1,0816	1,0846	1,0887	1,0923	1,0955
4,0	1,0760	1,0812	1,0828	1,0861	1,0905	1,0944	1,0978
4,5	1,0765	1,0821	1,0838	1,0872	1,0919	1,0961	1,0998
5,0	1,0769	1,0827	1,0845	1,0882	1,0932	1,0977	1,1016
7,5	1,0775	1,0846	1,0868	1,0913	1,0974	1,1030	1,1080
10	1,0776	1,0851	1,0876	1,0927	1,0998	1,1063	1,1121

Таблица 6

**Коэффициент снижения объемов эжекции (Ke) при увеличении к.м.с. на выходе воздуха из перфорированной трубы (при  $E = 2,5$ ;  $r = 2$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ )**

Le	При $\zeta_k$ , равном					
	1	2	4	8	16	32
0,1	1,0302	1,0385	1,0485	1,0599	1,0694	1,0780
0,2	1,0387	1,0502	1,0645	1,0800	1,0946	1,1073
0,3	1,0441	1,0580	1,0754	1,0944	1,1128	1,1290
0,5	1,0512	1,0686	1,0908	1,1155	1,1396	1,1609
0,7	1,0560	1,0760	1,1019	1,1310	1,1599	1,1856
1,0	1,0609	1,0839	1,1142	1,1488	1,1835	1,2149
1,2	1,0633	1,0880	1,1207	1,1584	1,1965	1,2312
1,4	1,0653	1,0914	1,1263	1,1667	1,2079	1,2457
1,6	1,0670	1,0943	1,1311	1,1741	1,2181	1,2587
1,8	1,0684	1,0969	1,1354	1,1807	1,2273	1,2706
2,0	1,0696	1,0992	1,1393	1,1866	1,2357	1,2815
2,2	1,0707	1,1012	1,1428	1,1921	1,2435	1,2916
2,4	1,0716	1,1030	1,1459	1,1971	1,2506	1,3010
2,6	1,0725	1,1046	1,1488	1,2017	1,2573	1,3098
2,8	1,0732	1,1061	1,1515	1,2060	1,2635	1,3181
3,0	1,0739	1,1075	1,1540	1,2100	1,2694	1,3260
3,5	1,0753	1,1105	1,1595	1,2190	1,2827	1,3438
4,0	1,0764	1,1130	1,1642	1,2268	1,2943	1,3596
4,5	1,0773	1,1151	1,1683	1,2337	1,3046	1,3738
5,0	1,0781	1,1169	1,1718	1,2398	1,3139	1,3867
7,5	1,0801	1,1230	1,1848	1,2628	1,3498	1,4375
10	1,0809	1,1266	1,1932	1,2783	1,3749	1,4740
20	1,0802	1,1322	1,2096	1,3113	1,4311	1,5597

Таблица 7

**Коэффициент снижения объемов эжекции (Ke) при увеличении к.м.с. на входе воздуха в перфорированную трубу (при  $E = 2,5$ ;  $r = 2$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_n = 16$ ;  $\zeta_0 = 2,5$ )**

Le	При $\zeta_n$ , равном					
	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16
1	2	3	4	5	6	7
0,1	1,0694	1,0698	1,0706	1,0720	1,0743	1,0778
0,2	1,0946	1,0952	1,0964	1,0985	1,1019	1,1070
0,3	1,1128	1,1135	1,1150	1,1176	1,1220	1,1284
0,5	1,1396	1,1406	1,1426	1,1461	1,1519	1,1605
0,7	1,1600	1,1611	1,1634	1,1676	1,1746	1,1850
1,0	1,1835	1,1850	1,1878	1,1930	1,2015	1,2143
1,2	1,1965	1,1981	1,2013	1,2069	1,2146	1,2305
1,4	1,2079	1,2097	1,2131	1,2192	1,2295	1,2449
1,6	1,2181	1,2200	1,2236	1,2302	1,2413	1,2578
1,8	1,2273	1,2293	1,2332	1,2402	1,2520	1,2697

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7
2,0	1,2357	1,2379	1,2419	1,2493	1,2618	1,2805
2,2	1,2435	1,2457	1,2500	1,2577	1,2708	1,2906
2,4	1,2506	1,2530	1,2574	1,2655	1,2792	1,2999
2,6	1,2573	1,2597	1,2644	1,2728	1,2871	1,3087
2,8	1,2635	1,2661	1,2709	1,2796	1,2945	1,3170
3,0	1,2694	1,2720	1,2770	1,2861	1,3014	1,3247
3,5	1,2827	1,2855	1,2908	1,3006	1,3172	1,3425
4,0	1,2943	1,2973	1,3030	1,3134	1,3312	1,3582
4,5	1,3046	1,3078	1,3138	1,3248	1,3436	1,3723
5,0	1,3139	1,3173	1,3236	1,3351	1,3549	1,3851
7,5	1,3498	1,3538	1,3613	1,3751	1,3989	1,4355
10	1,3749	1,3793	1,3878	1,4033	1,4301	1,4718
20	1,4311	1,4366	1,4474	1,4673	1,5019	1,5568

сопротивления эжектируемому воздуху на входе и на выходе в перфорированную трубу (табл. 6, 7). Этот факт подтверждает заметную стимулирующую роль на рецикл воздуха в обычном (неперфорированном) байпасном канале герметизации верхнего укрытия и наличия буферной емкости в нижнем укрытии, которые увеличивают аэродинамическое сопротивление эжектируемому воздуху и создают большее разрежение в верхней части трубы и подпор — в нижней части. Создаются условия для более интенсивного перетекания воздуха через перфорационные отверстия. Разность давления в начале ( $\Delta p(0)$ ), в конце канала ( $\Delta p(1)$ ), а также избыточное давление по абсолютной величине возрастают как при росте параметра эжекции (Le), так и при увеличении коэффициентов  $\zeta_n^*$  и  $\zeta_k^*$

(рис. 8). При увеличении одного из этих коэффициентов происходит сдвиг избыточных давлений  $p_a$  в сторону роста его величины при

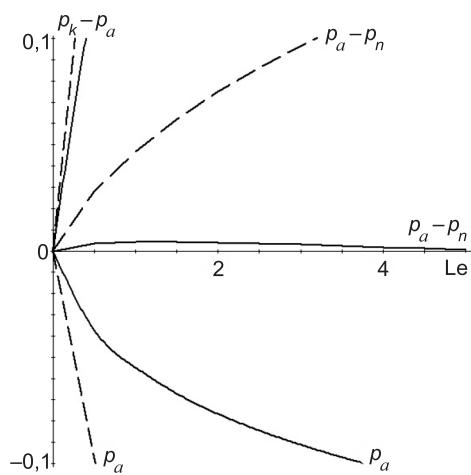


Рис. 8. Изменение избыточного давления в байпасной камере ( $p_a$ ), разности давления в конце ( $\Delta p_k = p_a - p_k$ ) и в начале ( $\Delta p_n = p_n - p_a$ ) перфорированной трубы от числа эжекции (при  $E = 2,5$ ;  $r = 2$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ ; сплошные линии  $\zeta_n = 0,5$ ;  $\zeta_k = 1$ ; пунктирные линии при  $\zeta_n = 22,1$ ;  $\zeta_k = 16$ )

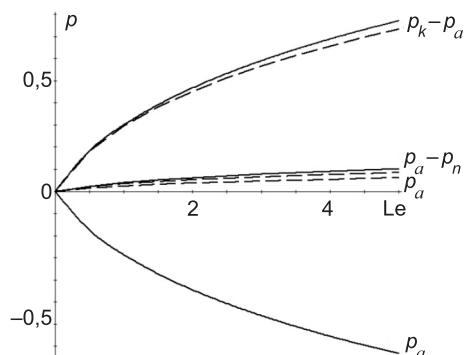


Рис. 9. Изменение избыточного давления в байпасной камере, разности давлений в начале и конце перфорированной трубы от числа эжекции Le (при  $E = 2,5$ ;  $r = 2$ ;  $n = 0,4319$ ;  $\zeta_0 = 1,5$ ; сплошные линии  $\zeta_n^* = 22,1$ ;  $\zeta_k^* = 1$ ; пунктирные линии при  $\zeta_n^* = 0,5$ ;  $\zeta_k^* = 16$ )

герметизации верхнего укрытия и в сторону уменьшения (вплоть до отрицательных значений — разрежения) при устройстве буферной камеры в нижнем укрытии, которая способствует росту  $\zeta_k^*$  (рис. 9).

**ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич**, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**ЛОГАЧЕВ Константин Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kilogachev@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**АВЕРКОВА Ольга Александровна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: olga\_19572004@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 14.11.12

**Logachev Ivan Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Logachev Konstantin Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kilogachev@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Averkova Olga Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: olga\_19572004@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **EJECTION OF AIR BY THE STREAM OF BULK MATERIAL IN A VERTICAL PERFORATED TROUGH**

### **Message 3. NUMERICAL EXPERIMENT AND RESEARCH RESULTS**

Were obtained hydrodynamic equations for estimating inter-component interaction in a vertical perforated trough when moving of gravitational flow of bulk material and air ejection.

The numerical solution of obtained system of nonlinear ordinary differential equations and the analytical solution of the linearized equations have allowed to reveal regularities of change of speed of ejected air in a perforated gutter, pressure in the bypass chamber along the trench, increasing perforation walls, depending on the size of the bypass camera, the number of ejection.

Defined rational perforation degree range ejection resistance coefficients and the ratio of cross-sections and tube cameras providing the greatest decrease in ejection due to recirculation.

**Key words:** aspiration, bulk material transfer, air suction, power care.

**УДК 697.97.001.24**

**О.Д. САМАРИН, С.С. АЗИВСКАЯ**

**ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ  
В ПОМЕЩЕНИЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрен нестационарный тепловой режим помещения, обслуживаемого автоматизированными климатическими системами. Построена эквивалентная передаточная функция системы с учетом реальных динамических свойств помещения. Дан анализ полученных результатов и подтверждена существующая зависимость для расчетной тепловой нагрузки на помещение при автоматизации климатических систем.

**Ключевые слова:** микроклимат, тепловой режим, передаточная функция, закон регулирования, коэффициент передачи.

Как известно, одной из основных задач при строительстве и эксплуатации здания и его систем обеспечения микроклимата является энергоресурсосбережение. Особое значение данная тема приобретает в настоящее время в условиях действия Закона РФ «Об энергосбережении ...» № 261-ФЗ от 23.11.09. Одним из способов снижения потребления энергии системами вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ) в здании служит их автоматизация. Однако для разработки наиболее рациональных систем автоматического регулирования (САР) следует максимально точно представлять себе характер переходных процессов, происходящих при переменных тепловых воздействиях в обслуживаемом помещении.

Основной проблемой, возникающей при определении способов автоматического управления системами обеспечения микроклимата и повышении качества поддержания внутренних метеопараметров, является то обстоятельство, что возмущающее воздействие на помещение обычно представляет собой поток избыточной теплоты от тех или иных источников (люди, освещение, солнечная радиация и т.д.) или, наоборот, изменение теплопотерь в окружающую среду. В то же время датчики САР реагируют только на текущие значения интересующих нас, в конечном счете, конкретных параметров микроклимата, главным образом температуры, а также относительной влажности и некоторых других. Однако эти параметры связаны с колебаниями теплоизбыток достаточно опосредованно, через инерционные процессы теплообмена на поверхностях ограждений, обращенных в помещение, и теплоаккумуляции в массиве этих конструкций и в вентиляционном воздухе. Поэтому, как правило, успевает пройти значительное время после теплового возмущения до момента, когда поступит сигнал от датчиков на управляющее устройство САР и начнется выработка компенсирующего воздействия климатическими системами.

Именно поэтому возникает задача исследования реального нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматически управляемыми системами обеспечения микроклимата, особенно СВ и КВ, при условии использования обычных решений САР и традиционных технических средств автоматизации (ТСА). В работе [1] показано, что помещение с достаточной степенью приближения может быть представлено в кон-

туре регулирования как линейное частично интегрирующее звено с передаточной функцией следующего вида:

$$W_{\text{пом}} = \frac{K_{\text{пом}} \Gamma(5/3)}{(p T_{\text{пом}})^{2/3}} \approx \frac{0,9 K_{\text{пом}}}{(p T_{\text{пом}})^{2/3}}. \quad (1)$$

Данная формула получается, исходя из представления о комбинации линейных процессов теплообмена на поверхностях ограждений и теплопередачи через легкие конструкции и нелинейной (интегрирующей) теплоаккумуляции в массивных ограждениях, что весьма удачно подтверждается результатами численных экспериментов.

Здесь  $K_{\text{пом}}$ ,  $K/\text{Вт}$  — условный коэффициент передачи помещения, а  $T_{\text{пом}}$ , с — его условная постоянная времени, определяемые по рассчитанной зависимости изменения  $t_{\text{в}}$  от времени при заданном тепловом возмущении  $Q_{\text{возм}}$ , Вт. Параметр  $\Gamma$  представляет собой специальную гамма-функцию, равную примерно 0,9 для аргумента  $1 + 2/3 = 5/3$  [2].

Отсюда эквивалентная передаточная функция системы «помещение — СВ и КВ — САР» запишется как [3]:

$$W_{\text{общ}} = \frac{W_{\text{пом}}}{1 + W_{\text{пом}} W_{\text{рег}}} \approx \frac{0,9 K_{\text{пом}}}{(p T_{\text{пом}})^{2/3} + 0,9 K_{\text{пом}} K_{\text{рег}}}. \quad (2)$$

Здесь  $K_{\text{рег}}$  — эквивалентный коэффициент передачи САР,  $\text{Вт}/\text{К}$ , численно равный изменению теплового потока  $Q_{\text{рег}}$ , Вт, вносимого в помещение или удаляемого из него за счет регулируемых СВ и КВ, при отклонении  $t_{\text{в}}$  от уставки на 1 К. При построении данного выражения предполагается, что СВ и КВ и обслуживающая их САР представляют собой отрицательную обратную связь для помещения как основного объекта регулирования. Считаем, что используется простейший П-закон регулирования, поскольку он является наиболее оптимальным, как было ранее отмечено авторами в публикации [4]. Тогда эквивалентная амплитудно-фазовая характеристика всей системы (АФХ) имеет вид

$$W_{\text{общ}}(i\omega) \approx \frac{0,9 K_{\text{пом}}}{(i\omega T_{\text{пом}})^{2/3} + 0,9 K_{\text{пом}} K_{\text{рег}}}. \quad (3)$$

Последнее выражение получается из (2) формальной заменой комплексного параметра  $p$ , возникающего при интегральном преобразовании Лапласа-Карсона и являющегося аналогом временного аргумента для зависимости реакции помещения на тепловое воздействие, мнимой компонентой  $i\omega$  [3]. По своему смыслу АФХ представляет собой характеристику передачи через систему периодических колебательных процессов, имеющих частоту  $\omega$ .

Поскольку  $i^{2/3} = \frac{1}{2}(1+i\sqrt{3})$ , отсюда получаем

$$W_{\text{общ}}(i\omega) \approx \frac{0,9 K_{\text{пом}}}{\frac{1}{2}(\omega T_{\text{пом}})^{2/3} + i \frac{\sqrt{3}}{2}(\omega T_{\text{пом}})^{2/3} + 0,9 K_{\text{пом}} K_{\text{рег}}}. \quad (4)$$

Следовательно, после некоторых преобразований для основного интересующего нас отношения фактической амплитуды колебаний  $t_{\text{в}}$ , вызван-

ных регулярным тепловым возмущением, к его амплитуде  $A_{Q_{\text{возм}}}$  можно получить следующее соотношение:

$$\frac{A_{t_B}}{A_{Q_{\text{возм}}}} = |W_{\text{общ}}(i\omega)| = \frac{0,9}{\sqrt{0,81K_{\text{пер}}^2 + 0,9K_{\text{пер}}(\omega T_{\text{пом}})^{2/3}/K_{\text{пом}} + (\omega T_{\text{пом}})^{4/3}/K_{\text{пом}}^2}}. \quad (5)$$

В частном случае, когда  $K_{\text{пер}} = 0$ , т.е. для условий собственной теплоустойчивости, имеем

$$\frac{A_{t_B}}{A_{Q_{\text{возм}}}} = \frac{0,9}{\sqrt{(\omega T_{\text{пом}})^{4/3}/K_{\text{пом}}^2}} = \frac{0,9K_{\text{пом}}}{(\omega T_{\text{пом}})^{2/3}},$$

т.е. АФХ помещения как звена.

Но по определению для такого режима имеет место равенство  $\frac{A_{t_B}}{A_{Q_{\text{возм}}}} = \frac{1}{P_{\text{пом}}}$ ,

где  $P_{\text{пом}}$  — показатель теплопоглощения помещения, Вт/К, который и характеризует его теплоустойчивость<sup>1</sup>, откуда  $P_{\text{пом}} \approx \frac{(\omega T_{\text{пом}})^{2/3}}{0,9K_{\text{пом}}}$ . Подставляем это соотношение в (5) и находим

$$\frac{A_{t_B}}{A_{Q_{\text{возм}}}} = \frac{1}{\sqrt{K_{\text{пер}}^2 + K_{\text{пер}}K_{\text{пом}} + P_{\text{пом}}^2}} = \frac{1}{K_{\text{пер}} + P_{\text{пом}}} \cdot C, \quad (6)$$

где  $C$  — поправочный коэффициент, равный

$$\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{K_{\text{пер}}P_{\text{пом}}}{(K_{\text{пер}} + P_{\text{пом}})^2}}}.$$

Легко убедиться, что при  $K_{\text{пер}} \rightarrow 0$  или  $P_{\text{пом}} \rightarrow 0$  величина  $C$  стремится к единице, а максимальное значение  $C$  будет при  $K_{\text{пер}} = P_{\text{пом}}$  и составит  $\sqrt{4/3} \approx 1,15$ , т.е. в среднем можно принять  $C \approx 1,1$ .

Отсюда  $\frac{A_{Q_{\text{возм}}}}{A_{t_B}} = \frac{K_{\text{пер}} + P_{\text{пом}}}{C}$ , следовательно,  $K_{\text{пер}} = C \frac{A_{Q_{\text{возм}}}}{A_{t_B}} - P_{\text{пом}}$ .

С точностью до числовых коэффициентов, близких к 1, это совпадает с выражением для  $K_{\text{пер}}$ , которое можно получить<sup>2</sup> при условии доли конвективной составляющей в переменных теплопоступлениях  $q_k = 1$ . Физический смысл данного выражения заключается в том, что необходимый эквивалентный коэффициент передачи САР получается как разность между требуемой теплоустойчивостью системы, определяемой отношением  $\frac{A_{Q_{\text{возм}}}}{A_{t_B}}$ , и имеющейся собственной теплоустойчивостью помещения, характеризуемой показателем  $P_{\text{пом}}$ . Иначе говоря, задача САР состоит в дополн-

<sup>1</sup> Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Выш. шк., 1982. 415 с.

<sup>2</sup> Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: АСВ, 2011. 296 с.

нительном стабилизирующем воздействии на систему, если ее внутренних ресурсов для этого недостаточно.

Таким образом, даже при представлении передаточной функции помещения с учетом его реальных динамических свойств в форме (1) удается подтвердить ранее обнаруженную зависимость для требуемого коэффициента передачи САР, а значит, и для расчетной величины теплопоступлений, используемой при вычислении требуемого воздухопроизводительности СВ и КВ. Следовательно, конкретный вид функции  $W_{\text{пом}}$  не играет решающей роли при выводе формулы для  $K_{\text{пер}}$ , так как основное значение имеет порядок соединения звеньев в контуре регулирования. В данном случае звенья включены встречно-параллельно, что и предопределяет характер выражения (2) и, соответственно, всех дальнейших преобразований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин, О.Д. Построение идентификационной модели процессов управления микроклиматом помещения [Текст] / О.Д. Самарин, Ю.Д. Федорченко // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 80–83.
2. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. — М. : Наука, 1964. — 608 с.
3. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / под общ. ред. Е.С. Бондаря. — Киев : Изд-во «Аванпост-прим», 2005. — 560 с.
4. Самарин, О.Д. Выбор оптимального закона регулирования для автоматизированных систем обеспечения микроклимата [Текст] / О.Д. Самарин, С.С. Азивская // Известия вузов. Строительство. — 2012. — № 1. — С. 73–76.

*САМАРИН Олег Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.  
Московский государственный строительный университет  
АЗИВСКАЯ Светлана Сергеевна, асп.  
Московский государственный строительный университет*

Получено 21.11.12

**Samarin Oleg Dmitrievich**, candidate of technical sciences, assistant professor,  
Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Azivskaya Svetlana Sergeevna**, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## ESTIMATION OF COMPUTATIONAL HEAT LOAD ON A PREMISE AT AUTOMATION OF CLIMATIC SYSTEMS

In the paper the non-steady thermal mode of a premise maintained by automated climatic systems is reviewed. The equivalent transfer function of a system with allowance for of actual dynamic properties of a premise is constructed. The analysis of the obtained outcomes is given and the existing relation for a computational heat load on a premise at automation of climatic systems also is affirmed.

**Key words:** microclimate, thermal mode, transfer function, control law, transmission factor.

## REFERENCES

1. Samarin, O.D. On design of identification model of control processes of room microclimate [Text] / O.D. Samarin, Yu.D. Fedorchenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 80–83.
2. Bronstein, I.N. Mathematics guideline for engineers and engineering students [Text] / I.N. Bronstein, K.A. Semendyaev. — M. : Science, 1964. — 608 p.
3. Automation of ventilation and air conditioning systems [Text] / under ed. by E.S. Bondar. — Kiev : Avanpost-prim Publishers, 2005. — 560 p.
4. Samarin, O.D. On selection of optimum control algorhythms for automated HVAC systems [Text] / O.D. Samarin, S.S. Azivskaya // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 73–76.

УДК 628.353

В.Н. КУЛЬКОВ, Е.Ю. СОЛОПАНОВ, В.М. СОСНА

## РЕГЕНЕРАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ В БИОРЕАКТОРЕ

Изучена седиментация ила на синтетической загрузке с использованием плоскостной физической модели поперечного вертикального сечения биореактора. Предложена механическая регенерация иммобилизованного ила на ершовой загрузке. Получена зависимость концентрации свободно плавающего ила от времени осаждения в объеме загрузки. Изучена кинетика осаждения ила от его дозы и вынуждающей силы электровибратора, осуществляющего механическую регенерацию.

Ключевые слова: биореактор, синтетическая ершовая загрузка, седиментация, механическая регенерация загрузки, свободно плавающий ил, иммобилизованный ил.

Для повышения дозы ила в аэрационных сооружениях при интенсификации биологической очистки сточных вод используются нейтральные синтетические носители, способствующие образованию на них прикрепленного биоценоза. Иммобилизованный биоценоз необходимо фиксировать в объеме аэротенка-биореактора, размещая его на твердой насадке. Насадка должна иметь минимальный инертный объем, максимально развитую поверхность для иммобилизации микроорганизмов, быть стойкой и прочной в очищаемой среде, равномерно заполнять объем биореактора. Насадка должна обеспечивать возможность периодической ее регенерации от механических примесей и слизистых сгустков микроорганизмов. Гидравлическое сопротивление инертной загрузки поступательному движению потока в биореакторе должно быть минимальным [1].

Синтетические ершовые водоросли успешно используются в биореакторах-аэротенках для иммобилизации микроорганизмов активного ила.

Одновременное присутствие свободно плавающего и иммобилизованного активного ила обеспечивает увеличение окислительной мощности биореактора и необходимый уровень очистки сточных вод.

Изучение регенерации синтетической инертной загрузки механическим способом проводили на физической модели биореактора, представляющей плоскостной вертикальный поперечный разрез объемного биореактора. Принципиальная схема установки с моделью биореактора показана на рис. 1.

Установка состоит из физической модели биореактора 1, которая выполнена из силикатного полированного стекла с внутренними размерами  $0,053 \times 1,475 \times 1,100$  м. Количество воздуха, подаваемого компрессором 2 с помощью мелкопузырчатого аэратора 6 в биореактор, регулировалось вентилем 3. Мгновенный расход воздуха контролировался ротаметром 4 типа РМ-1,0 ГУЗ, а давление измерялось манометром МТПСq-100 5. Механическая регенерация ершовых водорослей, покрытых иммобилизованным илом, осуществлялась электромеханическим дебалансным вибратором 10, жестко соединенным креплением 11 с рамкой ершовой загрузки. Вибратор находился на кронштейне 12, прикрепленном к стене. Вибратор представляет собой электродвигатель с установленными на концах вала ротора де-

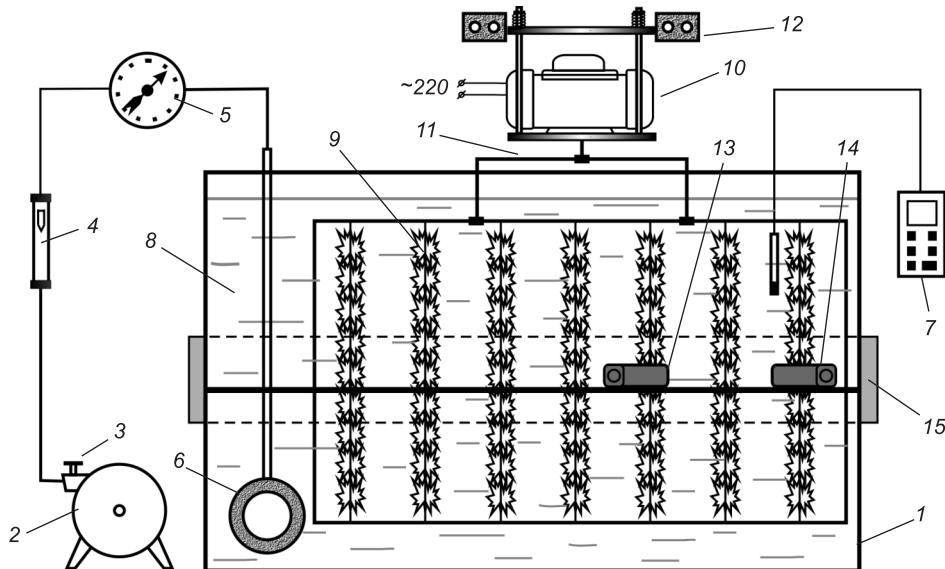


Рис. 1. Схема установки

1 — модельный биореактор; 2 — компрессор с ресивером для аэрации водно-иловой смеси; 3 — кран для регулирования расхода воздуха; 4 — ротаметр; 5 — манометр; 6 — мелкопузырчатый аэратор; 7 — электронный термометр; 8 — водно-иловая смесь; 9 — ершовая загрузка; 10 — вибратор электромеханический дебалансный регулируемый ЭВ-320Е, 11 — крепление рамки с ершовой загрузкой к вибратору; 12 — кронштейн для вывешивания вибратора; 13, 14 — люксметр НТ-307; 15 — лампа для освещения водно-иловой смеси

балансами. Дебалансы, вращаясь с валом ротора, создают центробежную (вынуждающую) силу 0,5 кН или 1,0 кН, в зависимости от регулировки статического момента дебалансов вибратора. Температура водно-иловой смеси измерялась электронным термометром 7.

Интенсивность светового потока, проходящего через водно-иловую смесь, контролировалась одновременно люксметрами НТ-307 в двух наиболее характерных местах: в объеме ершовой загрузки 13 и в зоне свободной конвекции водно-илового потока 14, обеспечивающего насыщение очищаемой воды кислородом и нахождение ила в свободно плавающем состоянии. Люксметр показывал минимальное и максимальное значение интенсивности светового потока от лампы 15 за контролируемый период измерения, что позволяло получить среднеарифметическое значение измеряемой величины.

В биореактор помещались синтетические ершевые водоросли 9, фиксированно закрепленные на раме из нержавеющей стали (см. рис. 1). Водоросли крепились к раме вертикально с шагом 100 мм, чтобы на 1 м<sup>3</sup> объема модельной ячейки приходилось в среднем 50 пог. м «ершей». В модели они размещались на 0,12 м выше дна и на 0,1 м ниже поверхности водно-иловой смеси, что необходимо для движения жидкости в основном циркуляционном контуре. В ячейке размещались семь вертикальных «ершей» длиной 0,62 м и диаметром 120 мм. Общая длина ершовой загрузки составляла 4,34 м. Таким образом, лишь 35 % объема модели биореактора было занято синтетическими водорослями. Над мелкопузырчатым аэратором и с правой стороны модельной ячейки (0,15 м) ершовая загрузка отсутствовала. Люксметры устанавливали стационарно и контролировали интенсивность света в контрольных квадратах между вертикальными синтетическими водорослями в объеме ершовой загрузки и в основном гидродинамическом потоке при определенной общей дозе ила в биореакторе (рис. 2).

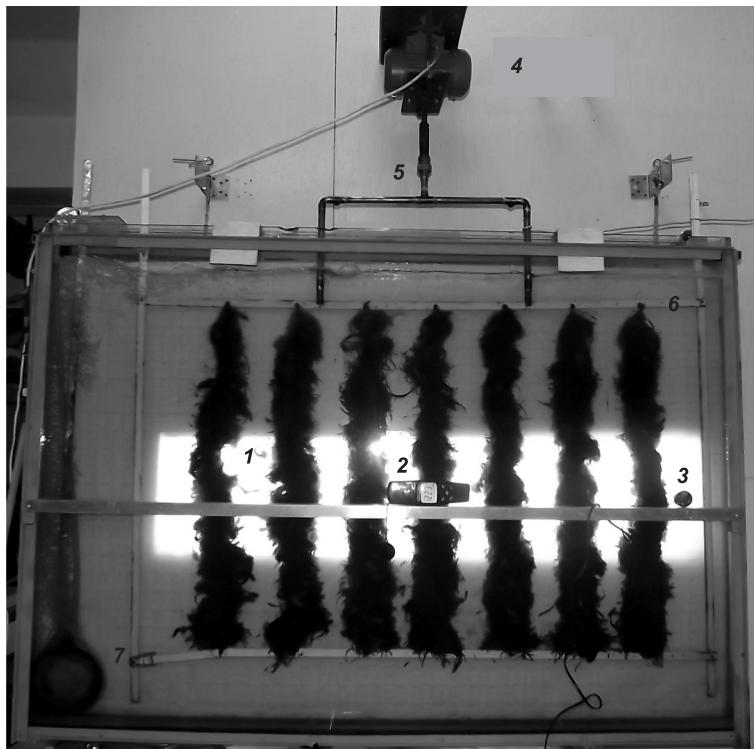


Рис. 2. Физическая модель вертикально-поперечного сечения биореактора с синтетической ершовой загрузкой

1 — ершовая загрузка с прикрепленным биоценозом; 2 — люксметр; 3 — датчик люксметра, установленный в зоне основного циркуляционного контура; 4 — вибратор электромеханический дебалансный; 5 — крепление рамки с ершовой загрузкой к вибратору; 6 — рамка для крепления ершовой загрузки; 7 — мелкопузырчатый аэратор

Активный ил, находящийся в биореакторе с иловым индексом  $\sim 110 \text{ см}^3/\text{г}$ , оседал на синтетических водорослях, распределяясь по ним относительно равномерно гидродинамическим потоком основного циркуляционного контура (рис. 3).

Средняя скорость в поверхностном слое потока жидкости обеспечивалась мелкопузырчатым аэратором, установленным в левом нижнем



Рис. 3. Распределение иммобилизованного ила на ершовой загрузке в квазистационарном процессе седиментации

углу биореактора, и составляла 0,6–0,65 м/с [2]. Удельная интенсивность аэрации водно-иловой смеси — 6,92 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч).

Для достижения квазистационарного процесса осаждения ила на ершовой загрузке биореактор работал до достижения постоянного значения концентрации свободно плавающего ила, что констатировалось постоянными значениями люксметров. Использование модели плоскостного вертикального поперечного сечения биореактора и описанной схемы установки позволило качественно и количественно оценить состояние биоценоза при различных технологических процессах в биореакторе.

Измеряя динамику освещенности водно-иловой смеси люксметром, строили зависимость в координатах интенсивность освещенности — время (рис. 4, а). По калибровочному графику переводили люксы в концентрацию свободно плавающего ила (г/л) и строили кинетическую зависимость в координатах концентрация свободно плавающего ила — время (рис. 4, б). Оценка достоверности экспериментальных данных по измерениям освещенности водно-иловой смеси приведена ранее [3].

Зависимость концентрации свободно плавающего ила от времени осаждения в объеме ершовой загрузки (рис. 4, б) описывается уравнением с коэффициентом регрессии  $R^2 = 0,9939$ :

$$C_{\text{сп}} = -0,064 \cdot \ln(t) + 0,3018,$$

где  $C_{\text{сп}}$  — концентрация свободно плавающего ила, г/л;  $t$  — время седиментации ила, мин.

С помощью вибратора проводили механическую регенерацию и, контролируя процесс во времени, определяли концентрацию свободно плавающего ила в объеме ершовой загрузки и в основном циркуляционном контуре.

Кинетика процесса осаждения ила на ершовые синтетические водоросли при 30-секундной регенерации для свободно плавающего ила представлена на рис. 5, а для иммобилизованного ила, полученного вычитанием из общей дозы ила, находящегося в биореакторе, величины концентрации свободно плавающего ила, контролируемого люксметром, — на рис. 6. Периодическое осаждение ила в течение 70 мин приводило к уменьшению концентрации свободно плавающего ила до ~0,03 г/л в объеме ершовой

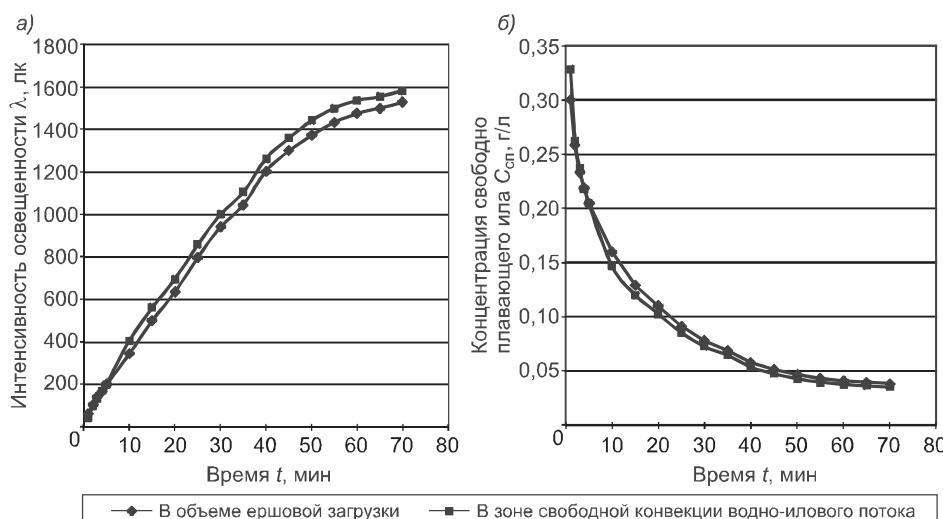


Рис. 4. Кинетика осаждения свободно плавающего активного ила на синтетических ершовых водорослях

а — экспериментальные данные; б — зависимость, обработанная по калибровочному графику

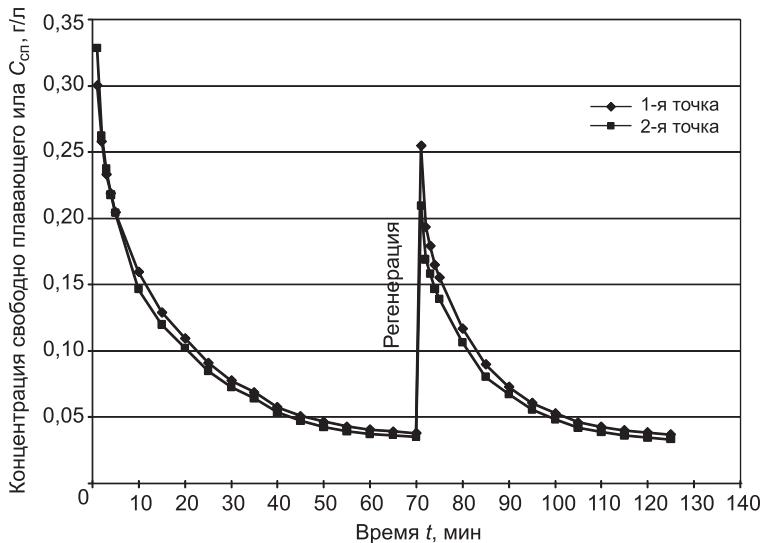


Рис. 5. Изменение концентрации свободно плавающего ила при седиментации его на ершовой загрузке и механической регенерации с вынуждающей силой электровибратора 1 кН

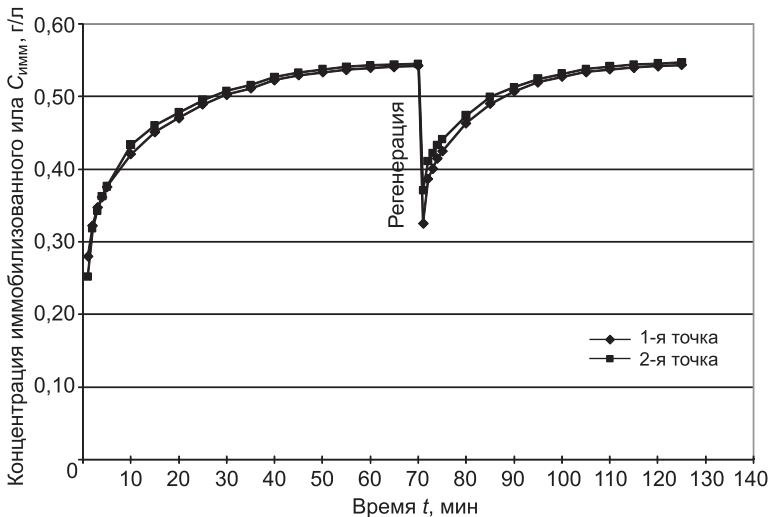


Рис. 6. Изменение концентрации иммобилизованного ила при седиментации его на ершовой загрузке и 30 с механической регенерации с моментом дебаланса электровибратора 1 кН

загрузки и в зоне свободной конвекции водно-илового потока, что почти на порядок меньше общей дозы ила в биореакторе, равной 0,58 г / л. Соответственно концентрация иммобилизованного ила (см. рис. 6) достигала максимального значения (0,55 г / л) при квазистационарном процессе осаждения ила на ерши и смывания его потоками основного циркуляционного контура, перемещающимися со скоростью 0,65 м / с [2]. На 1 пог. м ершовой загрузки приходилось 10,13 г ила по сухому веществу из максимально возможных — 10,7 г / пог. м при заданной дозе ила.

По изменению концентрации иммобилизованного ила (см. рис. 6) можно сделать расчет эффективности механической регенерации

$$\Theta = \frac{C_{\text{имм}}^{\text{н}} - C_{\text{имм}}^{\text{к}}}{C_{\text{имм}}^{\text{н}}} \cdot 100 \%,$$

### Динамические характеристики седиментации ила на ершовую загрузку

Временной интервал $\Delta t$ , мин	Скорость изменения концентрации СП ила $\frac{\Delta C_{\text{сп}}}{\Delta t}$ , г / л·мин	Скорость седиментации ила $V$ в биореакторе объемом 80 л, г / мин	Скорость седиментации ила $V_c$ на 1 пог. м загрузки, г / (мин·пог. м)	Условия проведения эксперимента $F_b$ — вынуждающая сила вибратора; $a_{\text{иля}}$ — доза ила
0–10	0,008	0,640	0,147	$F_b = 0,5 \text{ кН}; a_{\text{иля}} = 0,28 \text{ г / л}$
10–20	0,002	0,160	0,036	
20–30	0,0006	0,048	0,011	
0–10	0,0108	0,864	0,199	$F_b = 0,5 \text{ кН}; a_{\text{иля}} = 0,58 \text{ г / л}$
10–20	0,0027	0,216	0,049	
20–30	0,0011	0,088	0,02	
30–40	0,0003	0,024	0,005	$F_b = 1 \text{ кН}; a_{\text{иля}} = 0,28 \text{ г / л}$
0–10	0,0138	1,104	0,254	
10–20	0,0013	0,104	0,023	
20–30	0,0004	0,032	0,007	$F_b = 1 \text{ кН}; a_{\text{иля}} = 0,58 \text{ г / л}$
0–10	0,014	1,120	0,258	
10–20	0,005	0,400	0,092	
20–30	0,003	0,240	0,055	
30–40	0,0018	0,144	0,033	
40–50	0,0012	0,096	0,022	
50–60	0,0004	0,032	0,007	

где  $C_{\text{имм}}^{\text{н}}$ ,  $C_{\text{имм}}^{\text{к}}$  — концентрация иммобилизованного ила до и после регенерации соответственно.

Для 30-секундной регенерации эффективность Э составила ~48 %.

Динамические характеристики седиментации ила на ершовую загрузку при различных условиях проведения эксперимента представлены в таблице. Первые 10 мин после регенерации характеризуются максимальной скоростью изменения концентрации свободно плавающего ила, а после получасовой седиментации процесс переходит в квазистационарный — со скоростью приблизительно на порядок меньше начальной (кроме эксперимента с  $F_b = 1 \text{ кН}; a_{\text{иля}} = 0,58 \text{ г / л}$ ). Квазистационарное состояние сопровождается отрывом хлопьев иммобилизованного ила с ершовой

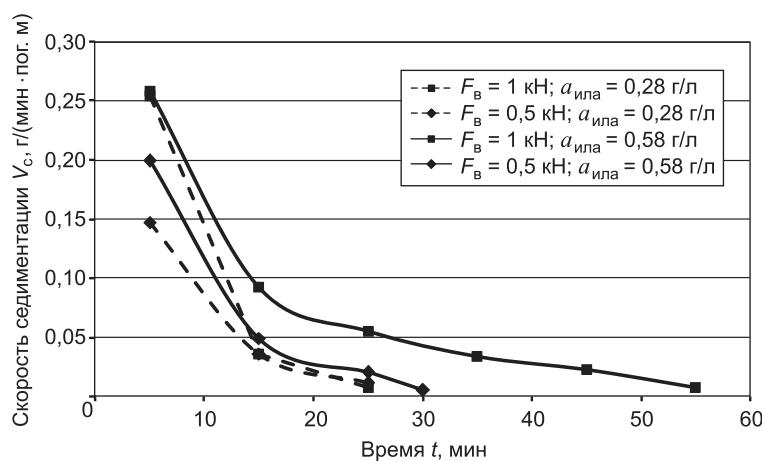


Рис. 7. Скорость седиментации активного ила на 1 пог. м ершовой загрузки

загрузки с последующим их осаждением и дроблением в нижнем потоке основного циркуляционного контура.

Зависимость скорости седиментации активного ила на 1 пог. м ершовой загрузки представлена на рис. 7 (данные таблицы).

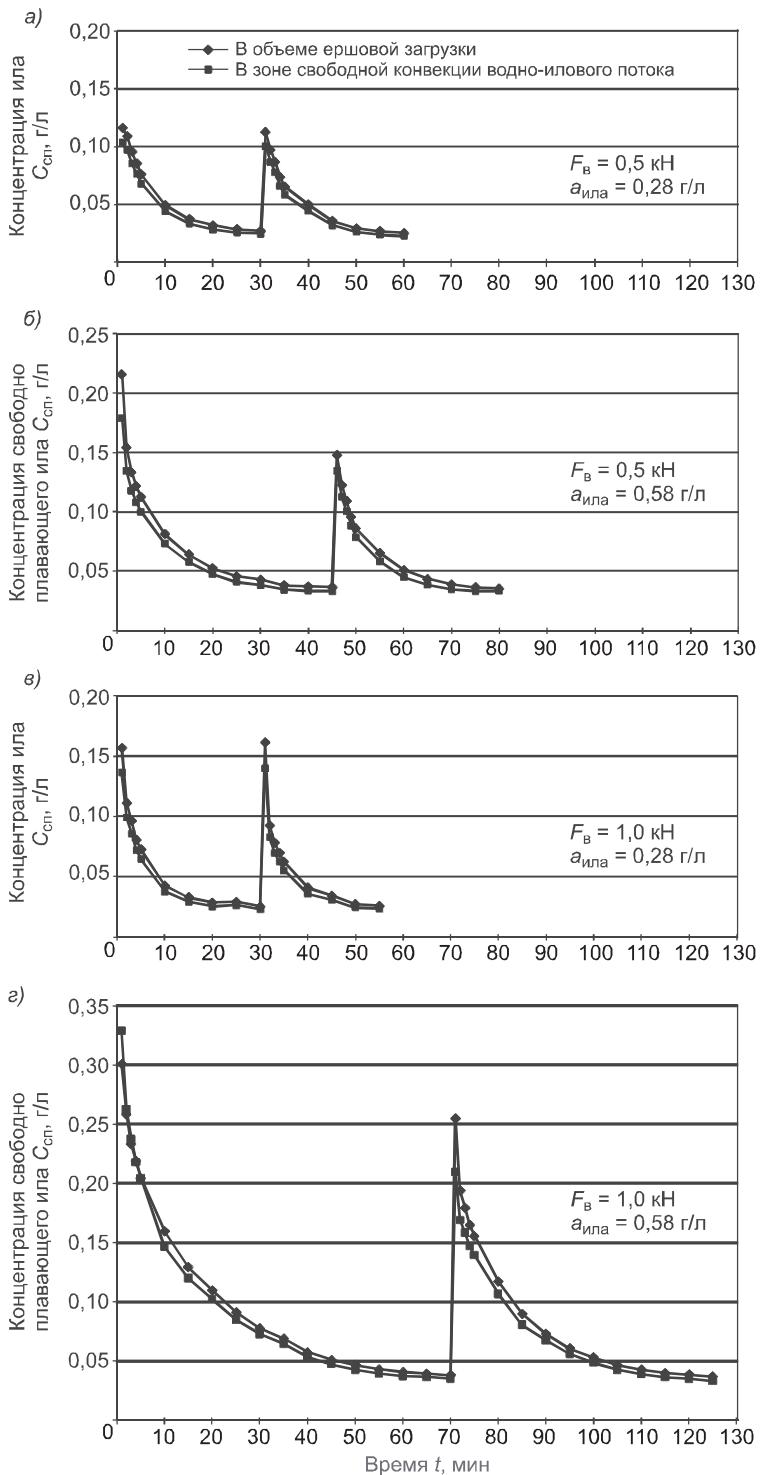


Рис. 8. Динамика седиментации свободно плавающего ила на ершовой загрузке при изменении общей дозы ила в биореакторе и вынуждающей силы вибратора

Изучение седиментации ила на загрузке при постоянной дозе ила в биореакторе  $a_{ила} = 0,28 \text{ г/l}$  от интенсивности механической регенерации проводили при изменении вынуждающей силы  $F_b$  электровибратора с 0,5 до 1 кН (рис. 8, а, в). Седиментация ила достигала квазистационарного состояния через промежуток времени, равный 30 мин после 30-секундной регенерации, несмотря на увеличенную концентрацию «стряхнутого» свободно плавающего ила ~0,19 г/l при регенерации с вынуждающей силой вибратора 1 кН (см. рис. 8, в).

Увеличение общей концентрации ила в биореакторе вдвое, до 0,58 г/l, приводит к незначительному увеличению времени перехода седиментации в квазистационарное состояние при механической регенерации с вынуждающей силой вибратора 0,5 кН (рис. 8, а, б). Увеличение  $F_b$  до 1 кН приводит к улучшению регенерации ершовой загрузки, что видно по увеличению дозы свободно плавающего ила после регенерации до 0,28–0,33 г/l. Достижение системой квазистационарного состояния происходило через промежуток времени, приблизительно вдвое больший, чем с  $F_b = 0,5 \text{ кН}$  (рис. 8, б).

Таким образом, увеличение вынуждающей силы вибратора приводит к улучшению регенерации ершовой загрузки и увеличению времени межрегенерационной работы биореактора для слабо концентрированных водно-иловых смесей.

Применение плоскостной модели биореактора позволило впервые определить, что для слабо концентрированных водно-иловых смесей наблюдается обедненная концентрация свободно плавающего ила, не превышающая ~10% от общей дозы, через ~0,5 ч после регенерации ершовой загрузки механическим способом.

Следует отметить основную особенность работы биореактора с синтетической ершовой загрузкой — увеличение концентрации коагулированного активного ила в объеме ершовой загрузки и обеднение основного циркуляционного контура диспергированным активным илом в квазистационарном процессе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов, Н.И. Теоретические основы очистки воды [Текст] / Н.И. Куликов, А.Я. Райманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышов. — Макеевка : Изд-во «НОУЛИДЖ» Донецк. отд.-ние, 2009. — 298 с.
2. Кульков, В.Н. Поверхность контакта фаз в аэробной очистке сточных вод: монография [Текст] / В.Н. Кульков, Е.Ю. Солопанов. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2009. — 144 с.
3. Кульков, В.Н. Определение концентрации свободно плавающего ила в биореакторе [Текст] / В.Н. Кульков, В.М. Сосна, А.М. Зеленин // Вода Magazine. — М., 2012. — № 3. — С. 44–46.

**КУЛЬКОВ Виктор Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail:** [kulkof.viktor@yandex.ru](mailto:kulkof.viktor@yandex.ru)

*Иркутский государственный технический университет*

**СОЛОПАНОВ Евгений Юрьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail:** [evgursolo@mail.ru](mailto:evgursolo@mail.ru)

*Иркутский государственный технический университет*

**СОСНА Виктор Михайлович, асп.**

*Иркутский государственный технический университет*

Получено 19.11.12

**Kulkov Viktor Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: [kulkof.viktor@yandex.ru](mailto:kulkof.viktor@yandex.ru), Irkutsk State Technical University, Russia

**Solopanov Evgeniy Yurevich**, candidate of technical sciences, assistant professor;  
E-mail: evgursolo@mail.ru, Irkutsk State Technical University, Russia  
**Sosna Viktor Mihailovich**, post-graduate student, Irkutsk State Technical University,  
Russia

## **REGENERATION OF SYNTHETIC DOWNLOAD IN BIOREACTORS**

Studied sedimentation of silt on synthetic load using a physical model of a planar cross-section of vertical bioreactor. Proposed mechanical regeneration of immobilized sludge on scraper loading. Obtained the dependence of the concentration of free-floating sludge from the deposition time in the amount of load. Studied the kinetics of deposition of silt on the dose and the driving force of electric vibrators, mechanical regeneration.

**Key words:** bioreactor, synthetic scraper loading, sedimentation, mechanical regeneration load, free floating sludge, immobilized sludge.

### REFERENCES

1. Kulikov, N.I. Theory of water purification [Text] / N.I. Kulikov, A.Ya. Raimanov, N.P. Omelchenko, V.N. Chernyshov. — Makeevka : Publisher «NOULIDZH» Donetsk branch, 2009. — 298 p.
  2. Kulkov, V.N. The surface of contact between the phases in the aerobic wastewater treatment: monograph [Text] / V.N. Kulkov, E.Yu. Solopanov. — Irkutsk : ISTU, 2009. — 144 p.
  3. Kulkov, V.N. Determination of the concentration of free-floating sludge in the reactor [Text] / V.N. Kulkov, V.M. Sosna, A.M. Zelenin // Water Magazine. — M., 2012. — N 3. — P. 44–46.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 624.132.3.001.24

А.С. КАДЫРОВ, Б.Н. ГЛОТОВ, Е.С. БЕСТЕМБЕК

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

На основе проведенных исследований представлена математическая модель процесса резания грунта фрезерным рабочим органом большого диаметра. Определены зависимости, учитывающие физико-механические свойства грунта и геометрические размеры фрезерного рабочего органа.

**Ключевые слова:** резание грунта, фреза, анализ резания, математическая модель, параметры нагружения.

Как показал анализ машин и оборудования, для проходки узких и глубоких траншей в основном используют баровые машины [1]. Однако эти машины конструктивно не могут обеспечить большую глубину резания и реализацию значительного усилия на резцах. Анализ свойств мерзлых, прочных грунтов и машин для их разработки [2] позволил определить основные принципы, которые необходимо заложить в конструкцию создаваемого оборудования:

— инструмент — дисковая фреза, которая является жестким рабочим органом (далее РО) и, следовательно, у нее отсутствуют потери энергии при передаче усилия резания (в отличие от цепи бара);

— передача крутящего момента — через цевочное зацепление на ре-борде диска фрезы. Это позволяет разрушать грунт не только нижней по-ловиной окружности фрезы, но и значительно увеличить глубину щели, так как передача крутящего момента осуществляется в верхней части фрезы и весь инструмент погружается в грунт.

Остальные принципы обусловливаются условиями экономической целесообразности.

Разработка такого рабочего органа в виде дисковой фрезы сдерживается отсутствием инженерной методики расчета. Для ее разработки необходимо установление сил сопротивления разрушению грунта и зависимостей, взаимосвязывающих режим работы и конструкцию РО.

Дисковая фреза, представляющая рабочий орган щелереза (рис. 1), находится под действием крутящего момента  $M_{kp}$ , силы вдавливания  $Q_{vd}$ , тягового усилия  $Q_t$ . Силы сопротивления определяются нормальной и касательной силами резания  $Q_{vt}$  и  $P_{01}$ . При этом в связи с тем, что крутящий момент передается через цевочное зацепление, расстояние от точки приложения крутящего момента до  $i$ -го резца переменно.

Резание грунта дисковой фрезой характеризуется следующими особенностями: движение резца по окружности; замкнутый объем призабойной зоны; непостоянство контакта резца с забоем; наличие в призабойной зоне массы волочения грунта, оказывающей дополнительное сопро-

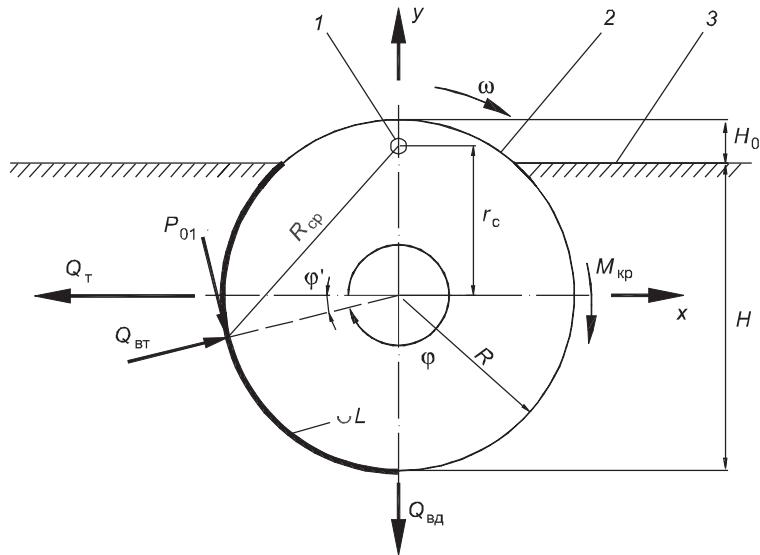


Рис. 1. Схема сил, действующих на РО  
1 — точка подвески фрезы; 2 — фреза; 3 — грунт

тивление. Исходя из этого и используя закономерности резания грунтов, представим усредненную по силам сопротивления и расстоянию от оси вращения модель резца [3].

При работе резцов учтено, что при резании резцы располагаются так, чтобы первый резал правую стенку щели, шириной  $S_{\text{щ}}$ , второй — левую, а третий — забой (рис. 2). На каждый из резцов действуют силы сопротивления резанию по лобовой грани резца  $P_{\text{св}}$ , силы сопротивления резанию на площадке износа  $P_{\text{изн}}$ , вес срезаемой стружки  $P_t$  и масса волочения грунта. На крайние резцы по внешним граням действуют силы сопротивления срезу по боковым граням резца  $P_{\text{бок}}$  и сопротивление срезу за счет расширения прорези  $P_{\text{бок.ср}}$ . Сопротивление массы волочения срезаемого грунта определяется силой  $P_t$ .

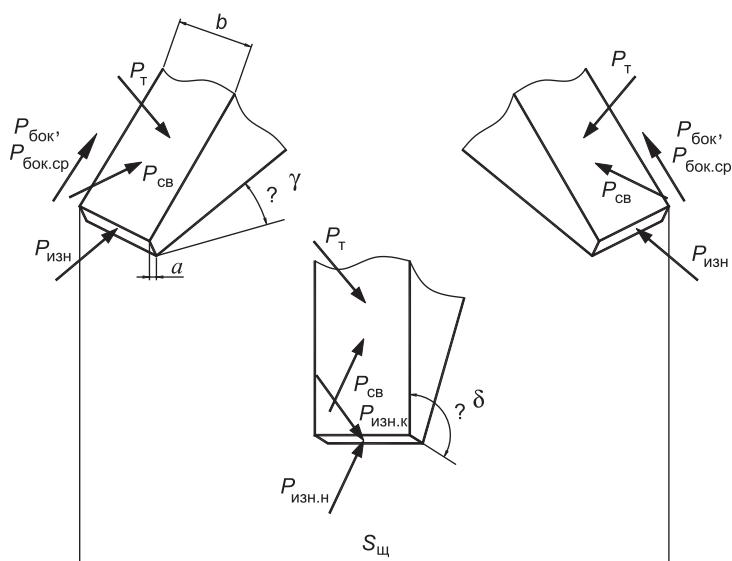


Рис. 2. Схема сил, действующих на резцы РО

Поскольку каждый из трех резцов, расположенных рядом друг с другом, испытывает разное нагружение, все силы приведены к одному усредненному резцу. Усредненный резец представляет собой обобщенную модель резца. Общая сила резания на РО является произведением усилия на единичном резце и числа резцов, участвующих в разрушении грунта.

Усредненный резец находится на расстоянии  $R_{ср}$  от точки передачи нагрузки, его положение определяется углом  $\varphi'$  (см. рис. 1), ему соответствует средняя толщина срезаемой стружки  $h_{ср}$ . К резцу приложены активные силы, определяемые воздействием усилия подачи  $Q_{вд}$ , тягового усилия  $Q_t$  и крутящего момента  $M_{kp}$ . На резец с углом резания  $\delta$ , задним углом  $\gamma$ , шириной  $b$  и площадкой износа с шириной  $a$  действует обобщенная реакция сопротивления грунта резанию (рис. 2), равная утроенной величине  $P_{cb}$ , утроенной величине  $P_{изн}$  и удвоенным величинам  $P_{бок}$  и  $P_{бок.ср}$ .

Резание резцами РО происходит по дуге  $L$  (см. рис. 1). Средняя толщина срезаемой стружки

$$h(\varphi) \approx h_1 \left( \cos\varphi + \frac{1}{2\lambda_1 \sin^2 \varphi'} \right), \quad (1)$$

где  $\varphi'$  — фиксированный угол, определяющий положение усредненного резца;

$h_1$  — шаг выдвижения сферы;

$\lambda_1$  — отношение шага выдвижения фрезы к радиусу фрезы.

Спроектировав все силы на ось  $Y$ , перпендикулярную поверхности забоя, и определив момент относительно центра вращения, составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} Q_{вд} = A \cdot h_{ср} \\ M_{kp} = B \cdot R_{пр} \cdot h_{ср}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$  — удельные силы сопротивления грунта разрушению соответственно при заглублении и вращении фрезы, определяющие усилие подачи и крутящий момент, необходимые для разрушения слоя грунта по дуге  $L$ , толщиной  $h$ , зависящие от физико-механических свойств грунта и конструкции инструмента;

$R_{пр}$  — приведенный радиус передачи окружного усилия резания через цевочное зацепление, зависящий от геометрических и кинематических параметров цевочного зацепления и фрезы.

Значения удельных сил линейно возрастают при увеличении ширины резца и ширины площадки износа.

Удельные силы имеют ярко выраженный экстремум (минимум) в зависимости от величины угла резания (рис. 3).

Для более точного анализа влияния угла резания на процесс разрушения грунта введен параметр  $c$ , равный отношению усилия подачи к касательной силе резания:

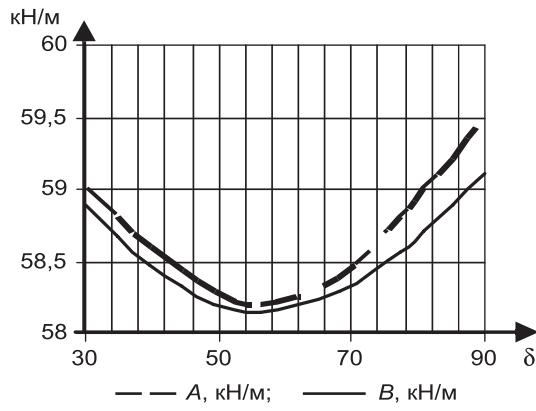


Рис. 3. Зависимость удельных сил сопротивления от угла резания резца

$$c = \frac{Q_{\text{вд}} \cdot R_{\text{пр}}}{M_{\text{kp}}} = \frac{A}{B}, \quad \text{причем справедливо } c < \operatorname{tg} \delta_{\min}. \quad (3)$$

Величина  $c$  является тангенсом угла наклона, под которым к лобовой грани резца приложена суммарная сила резания. Параметр  $c$  при установленном режиме не должен превышать угол резания, так как в противном случае сила будет направлена на площадку износа.

Масса волочения грунта, образуемая в призабойной зоне, препятствует разрушению грунта, увеличивая момент сопротивления резанию. При этом сила нагружения со стороны массы волочения на рабочий орган:

$$P_{\text{мв}} = P_{\text{мв}} \cdot h_{\text{cp}}; \quad (4)$$

$$F_t = j \cdot h_{\text{cp}}; \quad j = P_{\text{мв}} \cdot k_{\text{пд}} \cdot f_1, \quad (5)$$

где  $P_{\text{мв}}$  — сила веса массы волочения;

$F_t$  — сила трения массы волочения о забой;

$k_{\text{пд}}$  — коэффициент передачи давления от массы волочения на забой;

$f_1$  — коэффициент внешнего трения грунта о сталь.

Профессор Ю.А. Ветров установил, что при увеличении скорости резания возникает дополнительная сила резания  $\Delta P$ , пропорциональная ее квадрату.

С другой стороны, при увеличении угловой скорости уменьшается толщина стружки и, следовательно, сила резания. Значение  $M_{\text{kp}}$  выражается через удельную силу  $B$  и, учитывая  $\Delta P$ , примет вид

$$M_{\text{kp}} = \frac{2\pi \cdot B \cdot V \cdot R_{\text{пр}}}{\omega} + U \cdot \omega^2 \cdot R_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Две тенденции влияния угловой скорости на крутящий момент определяют наличие экстремума, что позволяет определить значение угловой скорости  $\omega$ , при котором для разрушения грунта необходим наименьший крутящий момент:

$$\omega = \sqrt{\frac{B \cdot h_{\text{cp}}}{2U}}. \quad (7)$$

Физический смысл коэффициента  $U$  заключается в том, что он учитывает изменение сопротивления резанию в зависимости от геометрии площадки среза и плотности грунтовой среды. Аналогичный метод определения сопротивления движению применяется в аэродинамике и гидродинамике для определения сопротивления движению тел в жидкой или газообразной среде.

Математическая модель движения рабочего органа представлена расчетной схемой (рис. 4) и системой уравнений (8):

$$\begin{cases} Q_{\text{вд}} = A \cdot h_{\text{cp}} - h_{\text{cp}} \cdot (P_{\text{мв}} + j_{\text{мв}}) \cdot \cos \varphi' - mg, \\ Q_t = A \cdot h_{\text{cp}} \cdot \sin \varphi' + B \cdot h_{\text{cp}} \cdot \sin \varphi' - j_{\text{мв}} \cdot h_{\text{cp}} \cdot \sin \varphi', \\ M_{\text{kp}} = B \cdot h_{\text{cp}} \cdot R_{\text{пр}} + P_{\text{мв}} \cdot h_{\text{cp}} \cdot R_{\text{пр}} + j_{\text{мв}} \cdot h_{\text{cp}} \cdot R_{\text{пр}}, \\ V_t = \frac{h_{\text{cp}} \cdot \sin \varphi' \cdot \omega}{2\pi}, \\ V_n = 0, \\ \omega = \omega_{\text{опт}}. \end{cases} \quad (8)$$

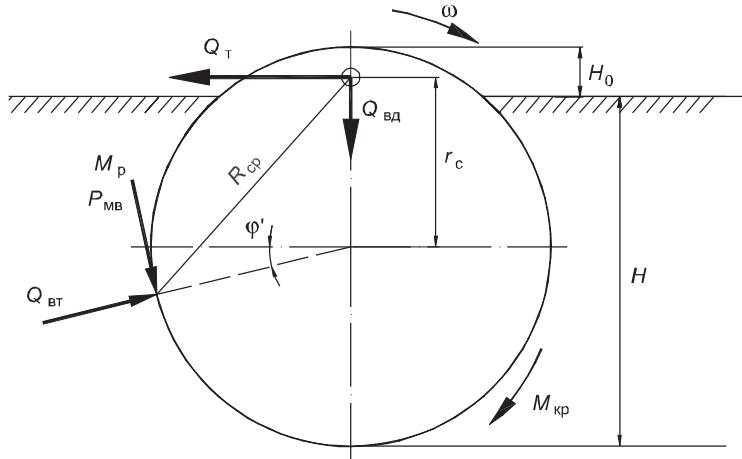


Рис. 4. Расчетная схема для установившегося движения РО

Аналитическими методами установлена зависимость:

$$h_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}, \quad \alpha_1 = \frac{(A + B - j_{\text{MB}}) \cdot \sin \phi'}{S_{\text{щ}} \cdot H}, \quad \alpha_2 = \frac{4R \cdot (B + P_{\text{MB}} + j_{\text{MB}}) \cdot V_T \cdot \pi^2}{S_{\text{щ}} \cdot H \cdot \omega}, \quad (9)$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент, характеризующий затраты мощности на поступательное движение рабочего органа;

$\alpha_2$  — коэффициент, характеризующий затраты мощности на вращательное движение рабочего органа;

$S_{\text{щ}}$  — ширина щели в грунте.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце щелереза.

В результате эксперимента были подтверждены зависимости удельных сил от угла резания, ширины площадки износа и ширины резца.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадыров, А.С. Анализ свойств мерзлых и прочных грунтов и оборудования для их резания [Текст] / А.С. Кадыров, Е.С. Бестембек // Труды университета. — Караганда : Изд-во КарагТУ. — 2006. — № 1. — С. 47–49.
2. Кадыров, А.С. Определение сил сопротивления разрушению грунта фрезерованием [Текст] / А.С. Кадыров, З.А. Мулдагалиев, Е.С. Бестембек // Труды университета. — Караганда : Изд-во КарагТУ. — 2007. — № 1. — С. 61–63.
3. Кадыров, А.С. Конструкция и расчет дискового щелереза для разработки мерзлых и прочных грунтов [Текст] / А.С. Кадыров, Е.С. Бестембек. — Караганда : Санат, 2006. — 132 с.
4. Глотов, Б.Н. Тенденции развития показателей гидравлических ручных молотков [Текст] / Б.Н. Глотов // Труды университета. — Караганда : Изд-во КарагТУ. — 2007. — № 2. — С. 51–54.

КАДЫРОВ Адиль Суратович, д-р техн. наук, проф.

Карагандинский государственный технический университет, Казахстан  
ГЛОТОВ Борис Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Карагандинский государственный технический университет, Казахстан  
БЕСТЕМБЕК Ербол Серикович, канд. техн. наук, проф.

Карагандинский государственный технический университет, Казахстан

**Kadyrov Adil Suratovich**, doctor of technical sciences, professor, Karaganda State Technical University, Kazakhstan

**Glotov Boris Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Karaganda State Technical University, Kazakhstan

**Bestembek Erbol Serikovich**, candidate of technical sciences, professor, Karaganda State Technical University, Kazakhstan

## **DEFINITION OF PARAMETERS OF LOADING OF MILLING WORKING BODY OF THE BIG DIAMETER**

On the basis of the spent researches the mathematical model of process of cutting of a ground is presented milling workers of bodies of the big diameter. The dependences considering physicomechanical properties of a ground and the geometrical sizes of milling working body are defined.

**Key words:** ground cutting, mill, the cutting analysis, mathematical model, parameters of loading of working bodies.

### REFERENCES

1. Kadyrov, A.S. The analysis of properties frozen both strong ground and the equipment for their cutting [Text] / A.S. Kadyrov, E.S. Bestembek // Publication of university. — Karaganda : KSTU. — 2006. — N 1. — P. 47–49.
2. Kadyrov, A.S. Definition of forces of resistance of destruction of a ground by milling [Text] / A.S. Kadyrov, Z.A. Muldagaliev, E.S. Bestembek // Publication of university. — Karaganda : KSTU. — 2007. — N 1. — P. 61–63.
3. Kadyrov, A.S. Construction and calculation of disk carver of cracks for development of the frozen and durable soils [Text] / A.S. Kadyrov, E.S. Bestembek. — Karaganda : Sanat, 2006. — 132 p.
4. Glotov, B.N. Progress of indexes of hydraulic hand hammers trends [Text] / B.N. Glotov // Publication of university. — Karaganda : KSTU. — 2007. — N 2. — P. 51–54.

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.4.-112 (571.1)

Л.Н. ВОЛЬСКАЯ, О.А. КУЛИГИНА

### МОДЕЛИ СРЕДЫ ГОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ XVII — НАЧАЛА XX в.

Рассматривается влияние элементов природного ландшафта на формирование и развитие среды городов Западной Сибири в процессе воздействия социоэкономических факторов, требований создания комфортных условий в жизнедеятельности населения.

Ключевые слова: природный ландшафт, антропогенные факторы, архитектурно-ландшафтная среда города, макроуровень, мезоуровень, микроуровень.

Проблема взаимосвязи элементов природного и городского ландшафта, формирующегося под антропогенным воздействием, является характерной для крупнейших городов Западной Сибири, где измененная человеком урбанизированная среда преобладает над естественным природным ландшафтом на территории городов, а в некоторых случаях полностью заменяет его. Наряду с развитием индустрии комфорта обострилась проблема качества среды. Природные системы в настоящее время не способны компенсировать негативное воздействие антропогенных факторов.

Архитектурно-градостроительная среда развивалась и развивается вместе с освоением уникального природного ландшафта, порой исторически меняя его до неузнаваемости. По мере развития городов Западной Сибири природная составляющая подверглась значительным изменениям, что характерно для крупнейших городов (Омск, Новосибирск и др.).

Под антропогенным влиянием произошли изменения ландшафта: многие мелкие речки, овраги, зеленые массивы в центре городов подверглись почти полному уничтожению. Архитектурно-ландшафтная среда и ее проблемы в настоящее время требуют научного осмысливания, а сохранение разумных, пропорциональных взаимосвязей элементов антропогенного и природного ландшафтов создаст предпосылки сохранения экологического равновесия в среде исторических городов Западной Сибири.

На формирование среды и облика городов Западной Сибири оказали первоначально большое влияние природно-климатические факторы. Возведенные укрепленные места, зимовья, остроги служили опорными пунктами в труднодоступных местах с суровыми природно-климатическими условиями (рис. 1).

Градостроительная деятельность в Сибири в начале XVII в. привела к преобразованию ландшафта. Отношение к природе, степень и характер изменения естественного ландшафта напрямую зависели от сложившихся градостроительных традиций на определенном историческом витке, а также от форм взаимодействия человека с природным окружением. Умелое использование всех компонентов природного ландшафта было главной особенностью древнерусского, а затем и сибирского градостроительства XVII–XVIII вв. (Тюмень, Тобольск, Томск, Тара и др.).

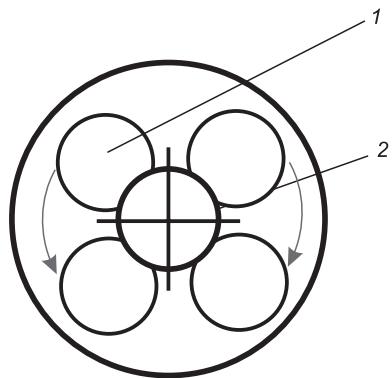


Рис. 1. Модель 1: город-крепость (XVII в.)

новение городов-острогов, таких как Тюмень (1586 г.), Тобольск (1587 г.), Томск (1604 г.), которые со временем превратились в крупные торговые и административные центры Западной Сибири. Зарождение и развитие сибирских городов так или иначе было связано с рекой, но в суровых природно-климатических условиях Сибири навигационный период в среднем составлял 183 дня, этого было недостаточно для возрастающих торговых потребностей растущих городов и со временем возникали сухопутные связи: сначала в виде троп, затем прокладываются дороги, которые превращаются в середине XVIII в. в Московско-Сибирский тракт (рис. 2) [1].

Сооружение Транссибирской железнодорожной магистрали было одним из наиболее значительных событий в истории России рубежа XIX–XX вв. Важный этап формирования сибирских городов приходился на конец XIX — начало XX в. и связан с развитием капиталистических отношений в экономике Сибири и прокладкой Великого железнодорожного пути. Строительство Транссибирской магистрали несколько уменьшило роль водных магистралей в развитии экономики, но все же они оставались подъездными путями к железной дороге. В результате чего быстрое развитие такого города, как Томск, оставшегося вне железнодорожной трассы, остановилось. Противоположная ситуация складывалась с городами, расположеннымными на железнодорожной магистрали: Омск, Новониколаевск, которые стали активно расти и развиваться. В связи со строительством Алтайской железной дороги в Барнауле сооружается железнодорожный мост через Обь. С проведением железнодорожной ветки к пароходной пристани в устье реки Барнаулки город оказался отрезанным от береговой линии Оби, в дальнейшем это усугубило решение проблемы выхода города к реке, что явилось характерным и для возникшего на пересечении реки и трассы Новосибирска [2]. На данный момент существует множество проектов реконструкции промышленной зоны, но железнодорожные пути остаются главным препятствием в аспекте доступности этой части города для населения (рис. 3).

Исторический процесс возникновения и развития городов Западной Сибири в XVII–XVIII вв. тесно связан с географическим местоположением и с укреплением Русского государства на востоке путем территориального закрепления, постепенного заселения и дальнейшего хозяйственного освоения обширного сибирского региона, богатого плодородными почвами, ценным пушным зверем и лесом.

Большую роль в зарождении и становлении древних сибирских городов и острогов играли водные пространства — могучая сибирская река Обь и ее притоки. Активное освоение реки предопределило возник-

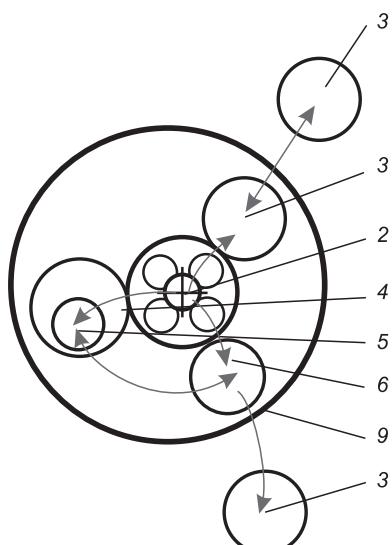


Рис. 2. Модель 2: крепость — посад — слобода (конец XVII–XVIII в.)

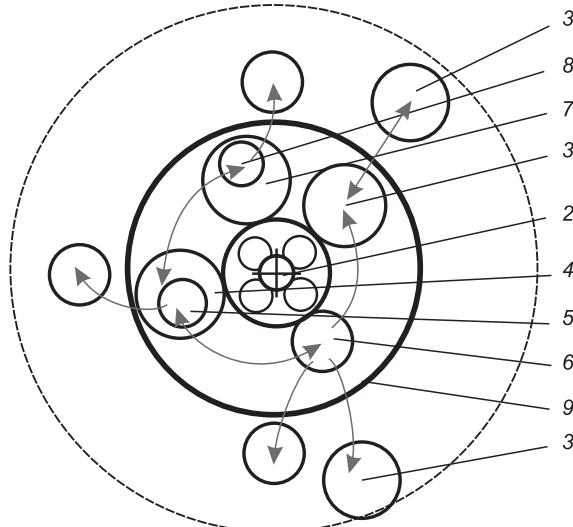


Рис. 3. Модель 3: город (конец XVIII – конец XIX в.).

К началу XX в. многие сибирские города расширили свою городскую территорию, изначально представлявшую компактное планировочное образование, а позднее трансформировавшуюся в линейную планировочную структуру (Тюмень, Томск), или сложно расчлененную, характерную для Новосибирска [3]. Планировочная структура напрямую зависит от природно-ландшафтного каркаса и его частей, тем самым четко указывая на взаимосвязь и взаимовлияние природных и антропогенных элементов. Линейные природные элементы — реки (Обь, Томь, Иртыш), они выполняют двоякую природно-планировочную функцию, являясь экологической и транспортной артерией, которая объединяет в единый комплекс естественные элементы — лесные массивы и крупнейшие города с прилегающими населенными пунктами. Река и на сегодняшний день играет важную роль в архитектурно-планировочном решении городов Западной Сибири (рис. 4).

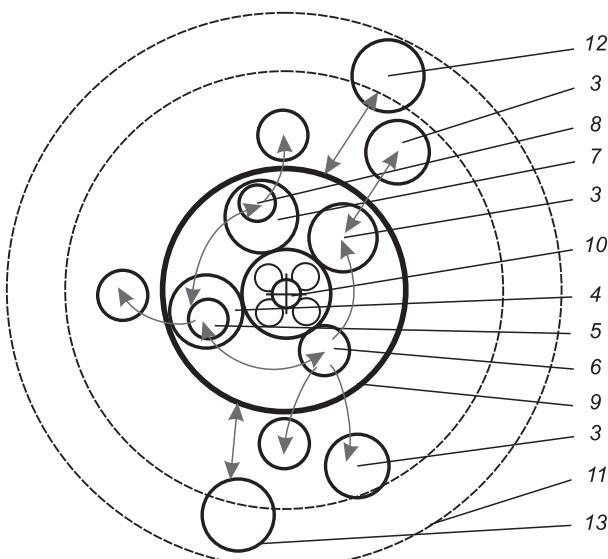


Рис. 4. Модель 4: город (конец XIX–XX в.).

Связь природного с антропогенным ландшафтом является неотъемлемой в формировании историко-культурного ландшафта города.

Влияние человеческой деятельности на бурный рост и развитие городов приводит к преобразованию природного каркаса городов. В антропогенном городском ландшафте остается все меньше места природным составляющим. Понятие городской ландшафт характеризуется сложным взаимосвязанным сочетанием природных и искусственных компонентов. Это жилые и административные строения, общественные и производственные здания со взаимосвязью с магистралями, элементами благоустройства, садами, парками, скверами и т.д., представляют собой сверхсложную систему и подсистему.

Для городов Западной Сибири главным элементом природного ландшафта является большая, мощная река, ее устье и определенная историческая ситуация, повлиявшая на возникновение и развитие городов (Барнаул — полезные ископаемые, Томск, Омск — центры торговли, Новосибирск — строительство Транссибирской железной дороги). Поэтому выявление природно-исторической основы является необходимым для дальнейшего их развития. Пройдя долгий исторический путь формирования, элементы архитектурно-ландшафтной среды городов приобретают определенные функции, такие как исторически сложившийся центр, рекреационные зоны и пр. В Западной Сибири именно природно-климатические особенности на первоначальном этапе задавали условия для возникновения городов-острогов и транспортных сетей между ними. Как явление градостроительного искусства каждый структурный элемент городского ландшафта требует своего детального изучения, анализа исторического развития, классификации и типологизации, выявления художественных и функциональных аспектов, прогнозирования перспектив развития. Это относится к каркасу городов, системе застройки, содержащих улицы, площади, здания, дворы, т.е. ко всем структурным элементам городского ландшафта. Структурные элементы городского ландшафта призваны выделить и акцентировать наиболее важные объекты городской среды, служить ориентирами, определять иерархию городских пространственных зон, отделяя главное от второстепенного. Городской ландшафт как искусственная среда обитания всегда призван удовлетворять многочисленные, все более усложняющиеся потребности людей, которые видоизменялись в период с XVII по начало XX в. [1].

С XVII по XIX в. в городской среде выделили три уровня формирования в каждый из исторических периодов на примере моделей функционирования сибирского города, рассматриваемых ниже.

Экспликация: 1 — дом воеводы (микроуровень); 2 — крепость (микроуровень); 3 — монастырь (мезоуровень); 4 — посад (мезоуровень); 5 — усадьба (микроуровень); 6 — слобода (мезоуровень); 7 — район (мезоуровень); 8 — двор (микроуровень); 9 — город (макроуровень); 10 — центр города (макроуровень); 11 — область (макроуровень); 12 — железнодорожная станция (макроуровень); 13 — промышленная зона (макроуровень).

Модель 1 характеризуется компактностью (синквретностью структуры). Преобладание одной или нескольких функций во взаимосвязи с природно-ландшафтными особенностями эволюционно преобразуют среду. Формирование среды шло на очень ограниченном пространстве. Основной строительный материал этого периода — дерево. Вся жилая застройка была деревянной, характерной особенностью которой являлась ее

плотность, что образовывало определенную колористическую и художественную систему. Для этого периода характерна дорегулярная планировка.

Модель 2 характеризуется дисперсностью, частичным расчленением функций городской среды. С развитием городов появляются такие функциональные зоны, как слободы и монастыри, возникшие на периферии. Дальнейший рост города приводил к тому, что монастырские ансамбли оказались окружеными жилой застройкой. Тем самым развивается и усложняется планировочная среда городов и на смену компактной приходит разветвленная структура. Объемно-пространственная структура города в этот период характеризовалась контрастом малоэтажной деревянной застройки и кирпичных сооружений. Постройки выходили на узкие, изгибающиеся улицы, образующие в отдельных случаях небольшие площади произвольной формы.

Модели 3 и 4 характеризуются расчлененностью, разделением функций от общего к частному (дедукция). Происходит значительное увеличение площади застройки. Планировка и застройка этого периода осуществлялась уже с учетом нового понимания организации городской среды: формирование широких и прямых улиц, прямоугольных площадей. Складывается новая каменная застройка разных архитектурных стилей. В этот период создаются крупные сооружения, изменившие архитектурно-художественную среду. Тем самым среда начинает приобретать новый пространственный масштаб и архитектурные доминанты.

В начале XX в. еще заметнее идет увеличение границ города, появление новых функций, связанных с промышленностью и железной дорогой. Формируется центр города [4].

В каждом из этих исторических уровней есть природные и антропогенные составляющие, воздействующие на сложение среды. Антропогенная и природная часть ландшафта характеризуется наличием прямых и обратных связей, таких, например, как связь между природной составляющей и планировочной структурой города, между рельефом и объемно-пространственной композицией.

На макроуровне процесс взаимодействия природной и антропогенной среды носит форму нарастающего влияния урбанизированной среды на окружающий ландшафт. Город разрастается и захватывает близлежащие территории, неизменно сокращая природный потенциал естественного окружения. Четко вписываясь в экологический каркас города, помимо эстетических качеств, элементы природного ландшафта оказывают важную экологическую функцию, которая должна представлять собой систему взаимосвязанных озелененных территорий города и лесов пригородной зоны, нейтрализующих загрязнения города. Природные заповедники, лесные массивы, водоохранные зоны создают баланс между урбанизированным антропогенным ландшафтом и природным и формируют комфортную среду сибирских городов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольская, Л.Н. Архитектурно-градостроительное наследие Сибири [Текст] / Л.Н. Вольская. — Новосибирск, 2008.
2. История Сибири с древнейших времен до наших дней. Т. 2, 3 [Текст] / под ред. А.П. Окладникова. — Л. : Наука, 1968.
3. Проскурякова, Т.С. Старое и новое в градостроительстве Сибири (вторая половина XVII–XVIII в.) [Текст] / Т.С. Проскурякова // Архит. наследство. — 1978. — № 26.
4. Оглы, Б.И. Строительство городов Сибири [Текст] / Б.И. Оглы. — Л., 1980.

**ВОЛЬСКАЯ Лариса Николаевна**, д-р архит., проф.; E-mail: amd.vkor@ngs.ru  
Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
**КУЛИГИНА Ольга Александровна**, асп.; E-mail: kuligina.o@gmail.com  
Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Получено 26.11.12

**Wolskaya Larisa Nikolaevna**, doctor of architecture, professor; E-mail: amd.vkor@ngs.ru, Novosibirsk State Academy of Architecture and Arts, Russia

**Kuligina Olga Alexandrovna**, post-graduate student, E-mail: kuligina.o@gmail.com, Novosibirsk State Academy of Architecture and Arts, Russia

## **ENVIRONMENT MODEL OF THE CITIES WESTERN SIBERIA OF THE XVII — BEGINNING OF XX CENTURIES**

The influence of the natural landscape on the formation and development of the urban environment of West Siberia, in the socio-economic impact of factors and requirements to create comfortable living conditions for the population.

**Key words:** landscape, anthropogenic factors, architectural and landscape environment of the city, the macro level, meso level, micro level.

### REFERENCES

1. Volskaya, L.N. Architectural and urban heritage of Siberia [Text] / L.N. Volskaya. — Novosibirsk, 2008.
  2. History of Siberia from ancient times to the present day. V. 2, 3 [Text] / pod red. Okladnikov. — L. : Nauka, 1968.
  3. Proskuryakova, T.S. Old and new in town planning Siberia (vtoraya half XVII–XVIII c.) [Text] / T.S. Proskuryakova // Architects. inheritance. — 1978. — N 26.
  4. Oglu, B.I. Building cities in Siberia [Text] / B.I. Oglu. — L., 1980.
-

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**УДК 721.021.001.24**

**С.А. БОЛОТИН, А.И. ГУРИНОВ, А.Х. ДАДАР, З.Х. ООЛАКАЙ**

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Предлагается методика технико-экономической оценки проектных вариантов на основе расчета коэффициента компактности здания, которым интегрально оцениваются основные технико-экономические показатели, на самой ранней — концептуальной стадии проектирования.

**Ключевые слова:** BIM-моделирование, ресурсосбережение, проектирование, коэффициент компактности, здание-оболочка, жизненный цикл.

В настоящее время в проектно-строительной деятельности одной из наиболее перспективных является технология информационного моделирования здания — BIM (англ. Building Information Modeling) [1]. В отличие от CAD-моделирования, исходно ориентированного на создание двухмерных моделей, BIM-моделирование позволяет создавать трехмерную модель здания либо другого строительного объекта, связанную с информационной базой данных, в которой каждому элементу модели можно присвоить дополнительные атрибуты. Не менее значимым преимуществом BIM-моделирования является параметризация модели, что обеспечивает возможность согласованного изменения характеристик объекта во всей совокупности проектной документации. Это является важным обстоятельством в современной практике разделения состава проектной документации на специализированные разделы [2], которые в свою очередь организационно закрепляются за определенными исполнителями.

Среди поставщиков инструментария для BIM-моделирования широко известна компания Autodesk — разработчик самой популярной в проектировании программы AutoCAD. Решением Autodesk для информационного моделирования зданий является платформа Revit, на основе которой создано целое семейство программных продуктов, в том числе для архитектурного проектирования (Revit Architecture), проектирования строительных конструкций (Revit Structure) и инженерных систем (Revit MEP). Информационная модель здания, создаваемая в процессе архитектурно-строительного проектирования в Revit Architecture [3], в сочетании со средствами расчета эксплуатационных характеристик будущего объекта может быть использована для оценки и анализа различных показателей энергоэффективности и ресурсосбережения на всех этапах жизненного цикла здания.

Многие энергетические характеристики будущего объекта определяются его изначальной геометрией и ориентацией на местности, что необ-

ходимо учитывать уже на самой ранней — концептуальной стадии архитектурно-строительного проектирования. Один из показателей, определяющий удельные тепловые потери, — так называемый коэффициент компактности здания (отношение площади ограждающих конструкций к объему здания), который по завершении проектирования должен войти в энергетический паспорт объекта [4]. Достижение приемлемой компактности может идти вразрез с архитектурной выразительностью здания. В частности, применение архитектурных элементов типа эркеров или башен, как правило, приводит к увеличению (т.е. ухудшению) коэффициента компактности. Предлагается модернизировать проектный процесс таким образом, чтобы уже на стадии концептуального проектирования архитектор на основании расчетов модели мог решать компромиссную задачу выбора между субъективно оцениваемой архитектурной выразительностью и объективной оценкой энергетических характеристик будущего объекта.

В работе [5] представлены данные по расчету коэффициента относительной компактности и его связи с показателем комплексной технологичности здания. Логика данного расчета основана на теории представления здания как оболочки, что характерно для ранней стадии проектирования. По предложению С.Н. Булгакова, технологичность конкретного здания-оболочки необходимо определять по отношению к зданию-аналогу, для которого коэффициент относительной компактности принимается за единицу. При этом абсолютное значение коэффициента относительной компактности здания-аналога должно быть «наилучшим» [5]. Чтобы снять неопределенность в установлении «наилучшего» здания-аналога, нами предлагается рассматривать в качестве такового тело, обладающее минимальным отношением наружной поверхности к внутреннему объему, а именно — куб (осознанно исключая из рассмотрения сферу, так как эта форма оболочки здания встречается крайне редко). Размер кубической оболочки здания-аналога определяется из условия соблюдения равного объема с оболочкой проектируемого здания. В этом случае коэффициент относительной компактности вычисляется по формуле

$$K_0 = \frac{6 \cdot 3 \sqrt{V^2}}{\Sigma F}, \quad (1)$$

где  $V$  — объем оболочки здания;  $\Sigma F$  — суммарная поверхность оболочки здания.

Из анализа формулы (1) следует, что при приближении проектируемой оболочки здания к кубической форме наилучшее значение коэффициента относительной компактности будет асимптотически стремиться к единице, а при удалении от кубической формы его расчетное значение будет уменьшаться до минимального, асимптотически приближаясь к нулю.

Исходя из теории представления здания как оболочки, коэффициент относительной компактности здания функционально связан с изменением показателя технологичности здания-оболочки. В свою очередь снижение показателя комплексной технологичности связано с относительным увеличением продолжительности строительства будущего здания —  $T_0$ , трудоемкости его возведения —  $Q_0$ , сметной стоимости —  $C_0$ , материалоемкости —  $M_0$  и его энергоемкости —  $\mathcal{E}_0$ . Графики зависимостей частных характеристик комплексной технологичности здания-оболочки от коэффициента относительной компактности —  $K_0$  представлены на рис. 1 [5], где круглыми метками указаны графические результаты изменения па-

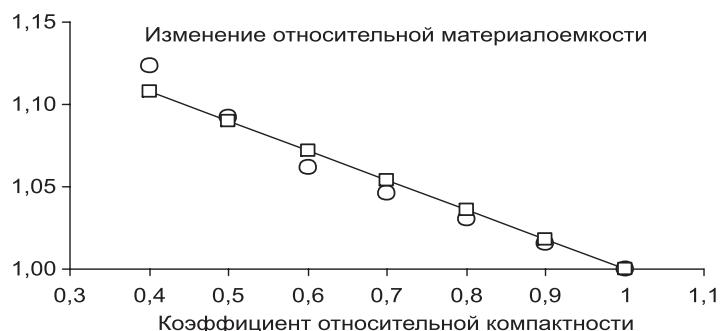
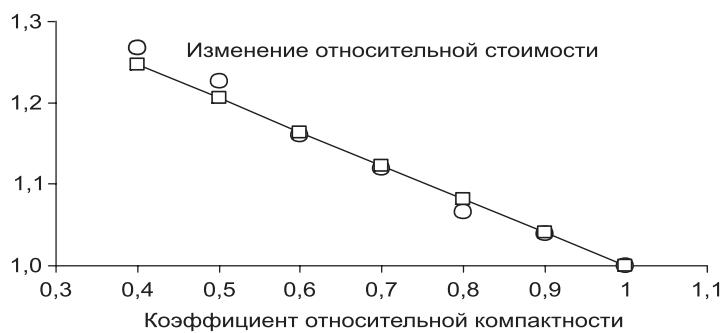
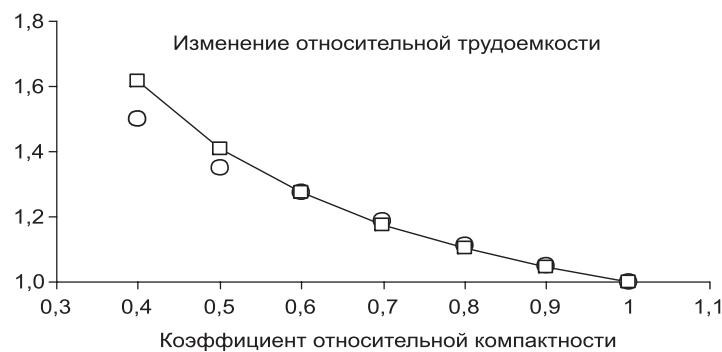
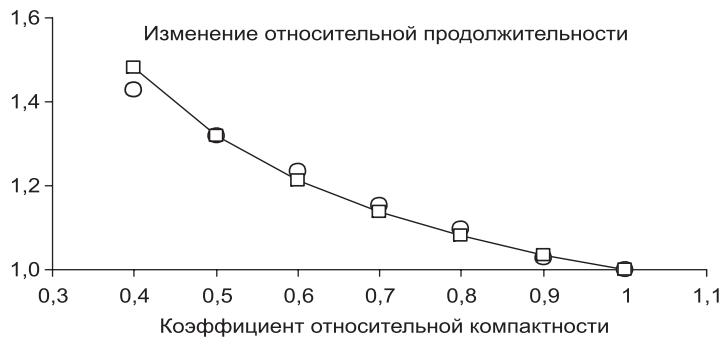


Рис. 1. Графики зависимостей частных характеристик комплексной технологичности здания-оболочки от коэффициента относительной компактности

раметров технологичности здания-оболочки, а квадратными метками, соединенными линиями, — выведенные нами соответствующие аппроксимирующие зависимости.

На основании проведенного регрессионного анализа зависимости (см. рис. 1) описываются следующими формулами:

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,68 + 0,32 / K_0; \\ Q_0 &= 0,59 + 0,41 / K_0; \\ C_0 &= 1,41 - 0,41 \cdot K_0; \\ M_0 &= 1,18 - 0,18 \cdot K_0; \\ \Theta_0 &= 1 / K_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Последняя формула в системе (2) показывает относительное увеличение тепловых потерь через поверхность здания-оболочки. Аппроксимирующие зависимости сформированы таким образом, чтобы единичным значениям коэффициента относительной компактности соответствовали единичные значения параметров технологичности здания-оболочки. При уменьшении коэффициента относительной компактности увеличиваются относительные величины времени строительства, его трудоемкости, материалаомкости, сметных затрат и тепловых потерь, что является негативной тенденцией.

В начале архитектурно-строительного проектирования информация о предпочтительности организационно-технологических и эксплуатационных параметров отсутствует, следовательно, принимается предположение об их одинаковых значимостях. Исходя из этого предлагается следующая формула расчета индекса комплексной технологичности  $I$ :

$$I = 0,772 - 0,118 \cdot K_0 + 0,346 / K_0. \quad (3)$$

График зависимости  $I(K_0)$  показан на рис. 2.

С точки зрения количественной интерпретации индекса комплексной технологичности следует отметить, что при проектировании здания-оболочки, близкой к кубической форме, его значение будет стремиться к единице, а при существенном отличии от кубической формы его значение будет увеличиваться, свидетельствуя об ухудшении технологичности проектируемого здания.

**Пример расчета.** Рассмотрим здание, состоящее из 12 равных кубических модулей, размером  $m = 6$  м, представляющее собой прямоугольный параллелепипед высотой  $2m$ , длиной  $3m$  и шириной  $2m$ . Его объем  $V = 2m \cdot 3m \cdot 2m = 2592$  м<sup>3</sup>, а площадь оболочки такого здания

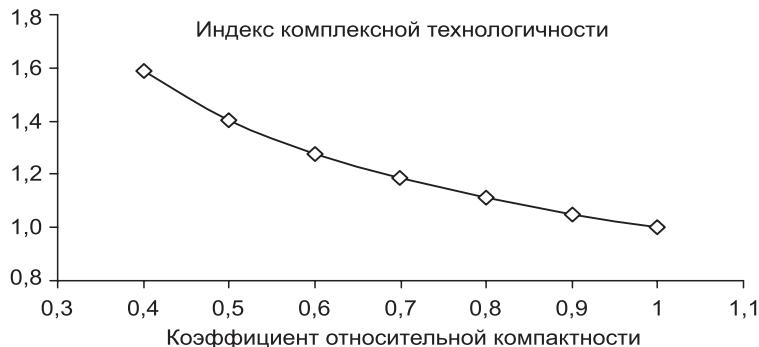


Рис. 2. График изменения индекса комплексной технологичности

$\Sigma F = 1152 \text{ м}^2$ . Расчет коэффициента относительной компактности данного здания дает значение  $K_0 = 0,983$ . Изменим конфигурацию исходного здания: модули первого этажа оставим на месте, а из модулей второго этажа сформируем шестиэтажную башню. Общий объем видоизмененного здания останется прежним, а вот поверхность оболочки увеличится до  $1656 \text{ м}^2$ , что уменьшит значение коэффициента относительной компактности до 0,684. При этом организационно-технологические параметры, рассчитанные по формулам (2), изменятся следующим образом:

- относительная продолжительность строительства увеличится на 14 %,
- относительная величина трудоемкости возрастет на 18 %,
- относительная величина стоимости строительства возрастет на 12 %,
- относительная величина материалоемкости возрастет на 5 %,
- относительная величина тепловых потерь возрастет на 44 %.

Очевидно, что «архитектурная выразительность» в виде башни существенно ухудшила как частные показатели технологичности, так и коэффициент относительной компактности здания. Этот пример показывает, что предложенная методика технико-экономической оценки здания-оболочки достаточно чувствительна к изменяемой геометрии объекта и поэтому может быть использована для соответствующей оценки на этапе концептуального архитектурно-строительного проектирования.

Вопросы инструментальной реализации предлагаемого механизма оценки в рамках BIM-моделирования подробно рассмотрены С.А. Болотиным, А.Х. Дадар<sup>1</sup>. В программе Revit Architecture для всех наружных конструкций здания формируются спецификации, в которые включают необходимые для расчета объема и суммарной поверхности здания-оболочки характеристики. Эти данные, экспортированные в виде текстовых файлов, могут быть обработаны и визуализированы в любой подходящей для этой цели программе (например, Excel).

В результате использования предлагаемой методики архитектор-проектировщик уже на начальной стадии проектирования получает дополнительную количественную технико-экономическую оценку проектного варианта, что позволяет более обоснованно принимать решения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Талапов, В.В. Информационное моделирование зданий — современное понимание [Текст] / В.В. Талапов // CADmaster. — 2010. — № 4. — С. 114–121.
2. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию. Постановление Правительства РФ № 87, 2008.
3. Autodesk Revit Architecture 2012. Официальный учебный курс / Пер. с англ. В. Талапов. — М. : ДМК Пресс, 2012. — 312 с.
4. СП 23-101-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий.
5. Булгаков, С.Н. и др. Теория здания. Здание-оболочка [Текст] / С.Н. Булгаков. — М. : АСВ, 2007.

**БОЛОТИН Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sbolotin@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
**ГУРИНОВ Анатолий Иванович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: aigurinov@freemail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>1</sup> Болотин С.А., Дадар А.Х. Конвергенция организационно-технологического и архитектурно-строительного проектирования, ориентированного на энергоресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 200 с.

*ДАДАР Алдын-кыс Хунаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: daryi@mail.ru*

*Түвинский государственный университет, г. Кызыл*

*ООЛАКАЙ Зита Хулер-ооловна, асп.; E-mail: sita-hertek@mail.ru*

*Түвинский государственный университет, г. Кызыл*

Получено 02.11.12

**Bolotin Sergey Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sbolotin@mail.ru, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Gurinov Anatoly Ivanovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; aigurinov@freemail.ru, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Dadar Aldyn-kys Khunaevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: daryi@mail.ru, Tuwan State University, Kyzyl, Russia

**Oolakay Zita Khuler-oоловна**, post-graduate student; E-mail: sita-hertek@mail.ru Tuwan State University, Kyzyl, Russia

## **MANAGEMENT IMPROVEMENT OF THE ENERGY RESOURCE EFFECTIVE CONSTRUCTION DESIGN BASED ON THE INFORMATION MODELING**

The major energy performance of a future building is set up by its initial geometry and its local orientation. Suggested in this article is a procedure of technical and economical evaluation of construction projects at the earliest stage of the conceptual structure design. The evaluation is based on the building compactness ratio (Surface Area to Volume Ratio), which serves the integral technical and economical characteristic of the project.

**Key words:** BIM-simulation, cost-effective use of resources, design, building compactness ratio, building envelope, life cycle.

### REFERENCES

1. Talapov, V.V. Building information modeling — modern perception [Text] / V.V. Talapov // CADmaster. — 2010. — N 4. — P. 114—121.
2. On the sections of the design documentation and content requirements. RF Government Resolution N 87, 2008.
3. Autodesk Revit Architecture 2012. Curriculum / Translated from eng. by V. Talapov. — M. : DMK-Press, 2012. — 312 p.
4. CP 23-101-2004. Code of practice in design and construction. Heat insulation design of buildings.
5. Bulgakov, S.N. et al. Theory of structure. Building envelope [Text] / S.N. Bulgakov. — M. : ASV, 2007.

УДК 624.04

А.В. ИЖЕНДЕЕВ

## ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

Сформирована матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) тонкостенного стержня открытого профиля на основе энергетического критерия устойчивости (вариационного принципа) в форме Дж. Брайана (G.N. Вгуан). Матрица симметричная размером  $14 \times 14$ . Элементы этой матрицы зависят от продольной силы, поперечных сил, изгибающих моментов, изгибо-крутящего момента и изгибо-крутящего бимомента. В качестве примера приведены формулы тех элементов, которые зависят от продольной силы.

**Ключевые слова:** тонкостенный стержень, устойчивость, метод конечных элементов.

**Постановка задачи.** В данной работе объектом исследования является стержневая система, составленная из тонкостенных стержней открытого профиля. Такие стержни (например, фасонный стальной прокат двутаврового, швеллерного и других очертаний; профили стальные гнутые) достаточно часто используют в качестве элементов строительных конструкций.

Принимаем, что в общем случае деформирование тонкостенного стержня открытого профиля не подчиняется гипотезе Я. Бернулли (Jakob Bernoulli), согласно которой поперечные сечения стержня, плоские до деформации стержня, остаются плоскими и после такой деформации, а используем геометрические допущения, приведенные в [1]: 1) профильная линия поперечного сечения тонкостенного стержня открытого профиля является недеформируемой в плоскости этого сечения; 2) деформации сдвига срединной поверхности тонкостенного стержня открытого профиля равны нулю.

Материал тонкостенного стержня принимаем однородным, сплошным, изотропным, идеально упругим, соответствующим закону Гука.

Предметом исследования является формирование матрицы начальных напряжений (геометрической жесткости) тонкостенного стержня открытого профиля.

**Метод решения.** Пусть положение произвольной точки  $M$  тонкостенного стержня определяется в правой прямоугольной системе координат  $XYZ$  координатами:  $x$ , отсчитываемой вдоль продольной оси  $X$  стержня;  $y$  и  $z$ , отсчитываемыми вдоль главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня. Начало системы координат  $XYZ$  находится на одном из концов стержня, ось  $X$  направлена к другому концу стержня.

Описать перемещение точки  $M$  можно тремя функциями:  $u(x, y, z)$  — перемещение вдоль линии, параллельной продольной оси  $X$  стержня;  $v(x, y, z)$  и  $w(x, y, z)$  — перемещения вдоль линий, параллельных главным центральным осям  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня.

Рассмотрим два состояния равновесия стержневой системы: первое (начальное) состояние равновесия до потери устойчивости системы, второе (новое) состояние равновесия.

Пусть  $u_0(x, y, z)$ ,  $v_0(x, y, z)$  и  $w_0(x, y, z)$  — перемещения точки  $M$  в начальном состоянии равновесия. Тогда перемещения той же точки в новом состоянии равновесия

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y, z) + u_1(x, y, z), \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y, z) + v_1(x, y, z), \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y, z) + w_1(x, y, z), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_1(x, y, z)$ ,  $v_1(x, y, z)$  и  $w_1(x, y, z)$  — дополнительные достаточно малые перемещения точки  $M$ , которые переведут ее из начального в новое состояние равновесия.

Изменение полной потенциальной энергии системы с точностью до квадратов перемещений, описывающих переход системы в новое, откло-ненное состояние, смежное с начальным состоянием равновесия, устой-чивость которого исследуется, можно записать в виде [2]

$$\Delta\Theta = W_2 + \lambda V_2, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — параметр нагрузки;  $W_2$  и  $V_2$  — величины, вычисляемые по фор-мулам теории упругости.

Критический параметр нагрузки  $\lambda^*$ , показывающий, во сколько раз необходимо изменить величины действующих нагрузок, чтобы стержне-вая система потеряла устойчивость, можно определить из условия [2]

$$\Delta\Theta = W_2 + \lambda V_2 = 0. \quad (3)$$

При построении матрицы жесткости тонкостенного стержня открытого профиля можно воспользоваться слагаемым  $W_2$  из этого условия, а матрицы начальных напряжений (геометрической жесткости) —  $V_2$ .

Построение первой из этих матриц не является предметом данного исследования. Выражения для элементов матрицы жесткости известны (одновременно для всех элементов матрицы они приводятся, например, в [3]).

Согласно теории В.З. Власова [1] в тонкостенном стержне открытого профиля нормальное напряжение не действует на площадках, параллель-ных продольной оси  $X$  стержня, а касательное — не действует на про-дольных гранях стержня. Поэтому формула для вычисления  $V_2$  [2] при ис-пользовании энергетического критерия устойчивости (вариационного принципа) в форме Дж. Брайана (G.N. Bryan) примет вид

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{2} \int_V \bar{\sigma}_x^0 \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_1}{\partial x} \right)^2 \right] dV + \\ &+ \int_V \bar{\tau}_{xs}^0 \left[ \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial s} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \frac{\partial v_1}{\partial s} + \frac{\partial w_1}{\partial x} \frac{\partial w_1}{\partial s} \right] dV, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $V$  — объем стержней системы;

$\bar{\sigma}_x^0$  и  $\bar{\tau}_{xs}^0$  — нормальное и касательное напряжения в точке  $M$ , действую-щие на площадке, перпендикулярной продольной оси  $X$  стержня, при

$\lambda = 1$  (эти напряжения определяют из решения линейной задачи для начального состояния равновесия системы);

$s$  — координата, характеризующая положение точки  $M$  вдоль касательной к профильной линии поперечного сечения стержня.

Для вычисления  $V_2$  необходимо знать перемещения  $u_1(x, y, z)$ ,  $v_1(x, y, z)$  и  $w_1(x, y, z)$ .

Известно, что перемещения точки  $M$  определяются четырьмя функциями координаты  $x$ :  $\xi$  — продольное перемещение (в направлении продольной оси  $X$  стержня) центра тяжести поперечного сечения стержня;  $\eta$  и  $\zeta$  — поперечные перемещения (в направлении главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня) центра изгиба поперечного сечения стержня;  $\phi$  — угол поворота поперечного сечения стержня вокруг продольной оси  $X$  стержня.

Можем записать

$$u_1 = \xi - y \frac{d\eta}{dx} - z \frac{d\zeta}{dx} - \omega \frac{d\phi}{dx}, \quad v_1 = \eta - (z - a_z)\phi, \quad w_1 = \zeta + (y - a_y)\phi, \quad (5)$$

где  $\omega$  — секториальная координата точки  $M$ ;

$a_y$  и  $a_z$  — координаты центра изгиба поперечного сечения стержня, отсчитываемые вдоль главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня.

Примем аппроксимирующие функции

$$\begin{aligned} \xi &= a_1 + a_2 x, \\ \eta &= a_3 + a_4 x + a_5 x^2 + a_6 x^3, \\ \zeta &= a_7 + a_8 x + a_9 x^2 + a_{10} x^3, \\ \phi &= a_{11} + a_{12} x + a_{13} x^2 + a_{14} x^3, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a_i$  — некоторый  $i$ -й коэффициент.

Подставляя аппроксимирующие функции в выражения (5), а те в формулу (4), получим (в части, касающейся одного из стержней)

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{2} \bar{\alpha}^T K_\sigma \bar{\alpha}, \\ \bar{\alpha} &= (a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9 a_{10} a_{11} a_{12} a_{13} a_{14})^T, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K_\sigma$  — матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) тонкостенного стержня открытого профиля (симметричная размером  $14 \times 14$ ).

При построении матрицы  $K_\sigma$  напряжения  $\bar{\sigma}_x^0$  и  $\bar{\tau}_{xs}^0$  определяются по формулам [1]

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x^0 &= \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z + \frac{M_z}{I_z} y + \frac{B_\omega}{I_\omega} \omega, \\ \bar{\tau}_{xs}^0 &= \frac{Q_z S_y^{\text{от}}}{I_y t} + \frac{Q_y S_z^{\text{от}}}{I_z t} + \frac{M_\omega S_\omega^{\text{от}}}{I_\omega t}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $N$  — продольная сила;

$M_y$  и  $M_z$  — изгибающие моменты, взятые относительно главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня;

$Q_y$  и  $Q_z$  — поперечные силы, направленные вдоль главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  поперечного сечения стержня;  
 $B_\omega$  — изгибано-крутящий бимомент;  
 $M_\omega$  — изгибано-крутящий момент;  
 $A$  — площадь поперечного сечения стержня;  
 $I_y$  и  $I_z$  — осевые моменты инерции поперечного сечения стержня, взятые относительно главных центральных осей  $Y$  и  $Z$  этого сечения;  
 $I_\omega$  — секториальный момент инерции поперечного сечения стержня;  
 $S_y^{\text{от}}$ ,  $S_z^{\text{от}}$  и  $S_\omega^{\text{от}}$  — статические моменты отсеченной части поперечного сечения стержня;  
 $t$  — толщина стенки тонкостенного стержня открытого профиля.

При выводе формул для вычисления элементов матрицы  $K_\sigma$  вводятся дополнительные геометрические характеристики поперечного сечения стержня:

$$I_{ijk} = \int_A i j k dA, I_{ijk}^{\text{от}} = \int_A \frac{S_i^{\text{от}}}{t} \frac{d j}{d s} k dA, I_{ij}^{\text{от}} = \int_A \frac{S_i^{\text{от}}}{t} \frac{d j}{d s} dA, \quad (9)$$

где  $i$ ,  $j$  и  $k$  — какие-либо координаты точки  $M$ :  $y$ ,  $z$ ,  $\omega$ . Например,  $I_{zyy} = \int_A z y y dA$ . Для вычисления таких геометрических характеристик может использоваться алгоритм, подобный описанному в [3] и реализованный автором в официально зарегистрированной программе для ЭВМ.

В связи с изложенным матрицу  $K_\sigma$  можно представить в виде суммы отдельных матриц, каждая из которых зависит от одного из усилий ( $N$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $B_\omega$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$  и  $M_\omega$ ).

Ввиду громоздкости описания элементов матрицы  $K_\sigma$  приведем в данной работе (в качестве примера) те из них, которые расположены на главной диагонали и ниже ее той части матрицы, которая зависит от усилия  $N$ :

$$k_{\sigma,2,2} = NI^{(0)}, k_{\sigma,4,4} = k_{\sigma,2,2}, k_{\sigma,5,4} = 2NI^{(1)},$$

$$k_{\sigma,5,5} = 4NI^{(2)} + 4NI^{(0)} \frac{I_z}{A}, k_{\sigma,6,4} = 3NI^{(2)},$$

$$k_{\sigma,6,5} = 6NI^{(3)} + 12NI^{(1)} \frac{I_z}{A}, k_{\sigma,6,6} = 9NI^{(4)} + 36NI^{(2)} \frac{I_z}{A},$$

$$k_{\sigma,8,8} = k_{\sigma,2,2}, k_{\sigma,9,8} = k_{\sigma,5,4}, k_{\sigma,9,9} = 4NI^{(2)} + 4NI^{(0)} \frac{I_y}{A},$$

$$k_{\sigma,10,8} = k_{\sigma,6,4}, k_{\sigma,10,9} = 6NI^{(3)} + 12NI^{(1)} \frac{I_y}{A},$$

$$k_{\sigma,10,10} = 9NI^{(4)} + 36NI^{(2)} \frac{I_y}{A}, k_{\sigma,12,4} = a_z NI^{(0)},$$

$$k_{\sigma,12,5} = 2a_z NI^{(1)}, k_{\sigma,12,6} = 3a_z NI^{(2)}, k_{\sigma,12,8} = -a_y NI^{(0)},$$

$$k_{\sigma,12,9} = -2a_y NI^{(1)}, k_{\sigma,12,10} = -3a_y NI^{(2)},$$

$$k_{\sigma,12,12} = a_y^2 NI^{(0)} + NI^{(0)} \frac{I_z}{A} + a_z^2 NI^{(0)} + NI^{(0)} \frac{I_y}{A},$$

$$\begin{aligned}
k_{\sigma,13,4} &= k_{\sigma,12,5}, k_{\sigma,13,5} = 4a_z NI^{(2)}, k_{\sigma,13,6} = 6a_z NI^{(3)}, \\
k_{\sigma,13,8} &= k_{\sigma,12,9}, k_{\sigma,13,9} = -4a_y NI^{(2)}, k_{\sigma,13,10} = -6a_y NI^{(3)}, \\
k_{\sigma,13,12} &= 2a_y^2 NI^{(1)} + 2NI^{(1)} \frac{I_z}{A} + 2a_z^2 NI^{(1)} + 2NI^{(1)} \frac{I_y}{A}, \\
k_{\sigma,13,13} &= 4NI^{(0)} \frac{I_\omega}{A} + 4a_y^2 NI^{(2)} + 4NI^{(2)} \frac{I_z}{A} + 4a_z^2 NI^{(2)} + 4NI^{(2)} \frac{I_y}{A}, \\
k_{\sigma,14,4} &= k_{\sigma,12,6}, k_{\sigma,14,5} = k_{\sigma,13,6}, k_{\sigma,14,6} = 9a_z NI^{(4)}, \\
k_{\sigma,14,8} &= k_{\sigma,12,10}, k_{\sigma,14,9} = k_{\sigma,13,10}, k_{\sigma,14,10} = -9a_y NI^{(4)}, \\
k_{\sigma,14,12} &= 3a_y^2 NI^{(2)} + 3NI^{(2)} \frac{I_z}{A} + 3a_z^2 NI^{(2)} + 3NI^{(2)} \frac{I_y}{A}, \\
k_{\sigma,14,13} &= 12NI^{(1)} \frac{I_\omega}{A} + 6a_y^2 NI^{(3)} + 6a_z^2 NI^{(3)} + 6NI^{(3)} \frac{I_z}{A} + 6NI^{(3)} \frac{I_y}{A}, \\
k_{\sigma,14,14} &= 36NI^{(2)} \frac{I_\omega}{A} + 9a_y^2 NI^{(4)} + 9a_z^2 NI^{(4)} + 9NI^{(4)} \frac{I_z}{A} + 9NI^{(4)} \frac{I_y}{A}. \quad (10)
\end{aligned}$$

В вышеприведенных выражениях использовано обозначение

$$I^{(i)} = \int_0^l x^i dx, \quad (11)$$

где  $l$  — длина стержня.

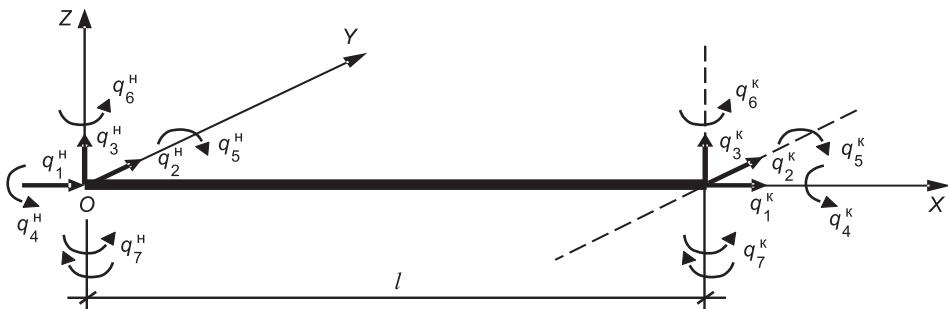
Матрицу начальных напряжений удобно согласовывать не с вектором  $\bar{a}$  коэффициентов в аппроксимирующих функциях (6), а с вектором

$$\bar{q}^* = (q_1^H q_2^H q_3^H q_4^H q_5^H q_6^H q_7^H q_1^K q_2^K q_3^K q_4^K q_5^K q_6^K q_7^K)^T, \quad (12)$$

элементами которого являются перемещения и депланации концевых поперечных сечений стержня (см. рисунок).

Связь между коэффициентами  $a_i$  ( $i = \overline{1,14}$ ) и параметрами  $q_i^H$  и  $q_i^K$  ( $i = \overline{1,7}$ ) вытекает из геометрического смысла параметров и аппроксимирующих функций:

$$\begin{aligned}
q_1^H &= \xi(0) = a_1, q_1^K = \xi(l) = a_1 + a_2 l, \\
q_2^H &= \eta(0) = a_3, q_2^K = \eta(l) = a_3 + a_4 l + a_5 l^2 + a_6 l^3,
\end{aligned}$$



Перемещения и депланации концевых поперечных сечений стержня

$$\begin{aligned}
q_3^H &= \zeta(0) = a_7, q_3^K = \zeta(l) = a_7 + a_8l + a_9l^2 + a_{10}l^3, \\
q_4^H &= \varphi(0) = a_{11}, q_4^K = \varphi(l) = a_{11} + a_{12}l + a_{13}l^2 + a_{14}l^3, \\
q_5^H &= -\zeta'(0) = -a_8, q_5^K = -\zeta'(l) = -(a_8 + 2a_9l + 3a_{10}l^2), \\
q_6^H &= \eta'(0) = a_4, q_6^K = \eta'(l) = a_4 + 2a_5l + 3a_6l^2, \\
q_7^H &= \varphi'(0) = a_{12}, q_7^K = \varphi'(l) = a_{12} + 2a_{13}l + 3a_{14}l^2. \tag{13}
\end{aligned}$$

Видим, что справедлива зависимость

$$\bar{q}^* = B\bar{a}, \tag{14}$$

где  $B$  — квадратная матрица, элементы которой соответствуют выражениям (13).

Матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) тонкостенного стержня открытого профиля, соответствующая вектору  $\bar{q}^*$ , вычисляется по формуле

$$K_\sigma^* = (B^{-1})^T K_\sigma B^{-1}. \tag{15}$$

**Результаты расчета.** О точности вычисления значения критического параметра нагрузки с использованием предложенной матрицы можно судить по отклонению такого значения от известного решения (например, из [1]).

В частности, для сжатого стержня, имеющего двутавровое (швеллерное) поперечное сечение, и при связях, ограничивающих поперечные перемещения и повороты относительно продольной оси стержня его концевых поперечных сечений, получено следующее (при различных геометрических размерах): в случае описания работы стержня одним конечным элементом отклонение от известного решения не превышало 20 %, а при двух конечных элементах — 1 %.

**Выводы.** Сформирована матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) тонкостенного стержня открытого профиля на основе энергетического критерия устойчивости (вариационного принципа) в форме Дж. Брайана (G.N. Bryan). Матрица симметричная размером  $14 \times 14$ . Элементы этой матрицы зависят от продольной силы, поперечных сил, изгибающих моментов, изгибо-крутящего момента и изгибо-крутящего бимомента. В качестве примера приведены формулы тех элементов, которые зависят от продольной силы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В.З. Власов. — М. : Физматиздат, 1958. — 568 с.
2. Алфутов, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем [Текст] / Н.А. Алфутов. — М. : Машиностроение, 1978. — 312 с.
3. Ижендеев, А.В. Оптимальное проектирование стержневых тонкостенных систем, находящихся под воздействием многопараметрического загружения [Текст] / А.В. Ижендеев. — Благовещенск : Амур. гос. ун-т, 2006. — 168 с.

ИЖЕНДЕЕВ Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: alex\_izhendeev@mail.ru

Дальневосточный государственный аграрный университет, г. Благовещенск

Получено после доработки 12.11.12

**Izhendeev Alexey Valerievich**, candidate of technical sciences, assistant professor;  
E-mail: alex\_izhendeev@mail.ru, Far East State Agricultural University, Blagoveshchensk,  
Russia

## **THE FORMATION OF THE MATRIX OF THE INITIAL STRESS FOR A THIN-WALLED ROD WITH AN OPEN PROFILE**

In this article formed the matrix of the initial stress for a thin-walled rod with an open profile. Used energy criterion for stability of G.N. Bryan. This matrix is symmetrical. Its size is  $14 \times 14$ . The elements of this matrix depend on the longitudinal force and shear forces and bending moments and bending-torsion moment and bending-torsion bimoment. We present formulas of those elements, which depend on the longitudinal forces.

**Key words:** thin-walled rod, stability, finite element method.

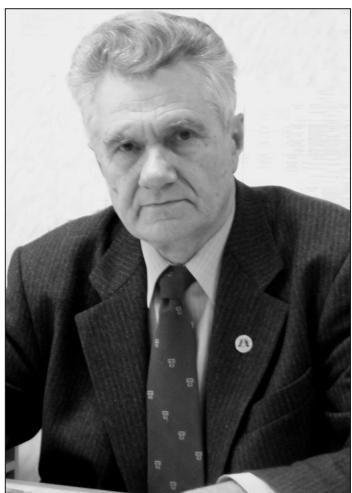
### REFERENCES

1. Vlasov, V.Z. Thin-walled elastic rods [Text] / V.Z. Vlasov.— M. : Fizmatizdat, 1958. — 568 p.
  2. Alfutov, N.A. The basis of calculation on stability of elastic systems [Text] / N.A. Alfutov. — M. : Mashinostroenie, 1978. — 312 p.
  3. Izhendeev, A.V. Optimal design of bar-thin-walled systems under the influence of multiparameter upload [Text] / A.V. Izhendeev. — Blagoveshchensk: Amur State University, 2006. — 168 p.
- 

В № 11–12 за 2012 год в Указателе на стр. 128 допущена техническая ошибка в строке 22 в фамилии автора — должно быть: Колпаков А.В.

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### АЛЕКСЕЮ ИГНАТЬЕВИЧУ ГНЫРЕ — 75



Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительного производства» Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ), заслуженный деятель науки РФ, почетный строитель России, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный профессор ТГАСУ, советник Российской академии архитектуры и строительных наук, действительный член МАН ВШ и Международного института инженеров-строителей (ICE) — аккредитованный инженер.

А.И. Гныря родился 25 января 1938 г., в крестьянской семье в селе Александровка Сүйтского района Алтайского края. По окончании Барнаульского строительного техникума

был направлен в трест «Стройдеталь» г. Томска. Трудовую деятельность начал в качестве лаборанта отдела технического контроля кирпичного завода.

В 1965 г. окончил Томский инженерно-строительный институт (ТИСИ) и был назначен главным инженером «Объединения предприятий строительных материалов».

В 1970 г. избран на должность доцента кафедры «Технология строительного производства» (ТСП) ТИСИ, а с 1972 г. по настоящее время заведует кафедрой ТСП Томского ГАСУ. А.И. Гныря возглавляет научную школу «Теплозащита бетона в зимних условиях». Под его руководством и при его научной консультации подготовлены и защищены 10 кандидатских диссертаций, три докторские диссертации.

Автор 320 публикаций, в том числе 18 изобретений и патентов, 3 монографий, 14 учебных пособий, двух с грифом УМО, соавтор всесоюзных и международных руководств по зимнему бетонированию.

Фундаментальные исследования, выполненные под руководством А.И. Гныри, 7 раз удостоены грантами в области архитектуры и строительства Госкомитета РФ по высшему образованию и включены в государственные и региональные программы.

Программа «Энергосбережение в г. Томске», научным руководителем которой являлся А.И. Гныря, четырежды удостоена дипломами и золотой медалью выставки «Стройсиб-99».

Член диссертационного совета в Томском ГАСУ, научный руководитель направления Сибирского отделения РААСН «Разработка теоретических и инженерно-технологических вопросов энергосбережения в строительстве с учетом региональных условий Сибири», член координационного совета по энергосбережению «Сибирского соглашения» с 1996 по 2003 г. А.И. Гныря продолжает активную научно-педагогическую деятельность.

*Редакция журнала присоединяется к поздравлениям юбиляру и желает ему здоровья, новых творческих успехов и удачи в делах.*

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:  
— сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотацию на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстраций, в том числе фотографий, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2013 г. — из расчета 700 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2013 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1800 р.

Цена отдельного номера — 300 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами  
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ISSN 0536—1052. Известия вузов. Строительство. 2013. № 1 (649). 1–126

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 1 (649) 2013**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Г.П. Рыжкова*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*