

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

№ 2–3 (650–651)  
Февраль–март 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 15.03.13. Формат 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 10,92+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 2512.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Вохмянин И.Т., Немировский Ю.В.** Проектирование равнопрочных упругих круглых и кольцевых пластинок в условиях термосилового нагружения ... 3

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Сулейманова Л.А., Хархардин А.Н.** Распределение частиц композиционного вязкого в ячеисто-бentonной смеси ..... 10

**Горгодзе Г.А., Зимакова Г.А., Кудоманов М.В., Княжев В.В.** Модификация керамических структур углеродсодержащими материалами ..... 16

**Кара-сал Б.К., Куулар Л.Э., Серен Ш.В.** Формирование структуры керамического стенового материала на основе полевошпатоцеолитовой породы ..... 21

**Столбоушкин А.Ю., Столбоушкина О.А., Иванов А.И., Сыромясов В.А., Пляс М.Л.** Стенные керамические материалы матричной структуры на основе отходов обогащения углистых аргиллитов ..... 28

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А.</b> К вопросу оперативного измерения объема грунта, разрабатываемого отвалом землеройно-транспортной машины .....	37
<b>Волков С.В., Волкова Л.В., Шведов В.Н.</b> Особенности проектирования организационно-технологических схем строительства жилых зданий .....	42
<b>Шацкий В.П., Титова И.В.</b> Технология переработки строительных отходов полимеров и анализ измельчающего оборудования .....	48
<b>ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	
<b>Дегтярев-мл. В.В., Ершова Е.Е.</b> К вопросу о постановке граничных условий при численном моделировании открытых потоков в недеформируемом русле .....	54
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Кочев А.Г., Федорова О.В., Соколов М.М.</b> Расчет воздухообменов для осушки конструкций и аэрации в культовых зданиях .....	60
<b>Самарин О.Д., Федорченко Ю.Д., Азивская С.С.</b> Экспериментальная проверка математической модели теплового режима помещения при автоматизации климатических систем .....	68
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Грузин А.В., Дедов А.С., Куликов А.В., Чичканов Р.В.</b> Пневмоударные дроссельные и дроссельно-беззолотниковые механизмы с управляемым расходом воздуха камеры холостого хода .....	73
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Махинов А.Н., Шевцов М.Н., Музыко С.В., Збарацкий А.А., Акименко Н.Ю., Видищева Г.Г.</b> Проблемы загрязнения водных ресурсов горнодобывающих районов и пути их решения .....	78
<b>Бежанова М.В., Вольская Л.Н.</b> О сложении и композиционных особенностях центров крупных городов Сибири — ядер агломераций XXI в. ....	88
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Адищев В.В., Кучеренко И.В., Грачева М.С.</b> Моделирование физических характеристик кирпичных кладок .....	94
<b>Кузнецова Л.В.</b> Тепловой режим изоляции ограждений при экстремальных условиях высокотемпературного воздействия .....	103
<b>Тихомиров В.М.</b> Развитие усталостной трещины в монолитной панели с ребрами	108
<b>Шутов В.А., Миренков В.Е., Полуэктов В.А.</b> К вопросу расчета балки-стенки	116
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Лесовик В.С., Беленцов Ю.А., Куприна А.А.</b> Использование положений геоники при проектировании конструкций для работы в условиях динамических и сейсмических нагрузок .....	121

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3:624.04

И.Т. ВОХМЯНИН, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАВНОПРОЧНЫХ УПРУГИХ КРУГЛЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ПЛАСТИНОК В УСЛОВИЯХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ\*

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) слоистых круглых и кольцевых пластинок в условиях термосилового воздействия и выполнения критерия равнопрочности на внешних поверхностях слоев. Осуществлен сравнительный анализ особенностей НДС пластинок с НДС эллипсоидальных и тороидальных оболочек.

**Ключевые слова:** равнопрочность, температура, интенсивность, напряжение, усилие, момент, вес, упругость, деформирование.

Проектированию упругих равнопрочных слоистых пластинок и оболочек вращения без учета и с учетом термосиловых воздействий посвящены работы [1–4]. Выявлены особенности поведения и эффективность по весу или стоимости рассмотренных тонкостенных элементов конструкций по сравнению с эталонными оболочками и пластинками. Показано, что в результате решения задачи проектирования равнопрочных оболочек не всегда возможно удовлетворение всех классических граничных условий в рамках теории оболочек Кирхгофа–Лява. Поставлена и решена задача проектирования двухслойных упругих равнопрочных оболочек и пластинок с варьированием поверхности спая слоев. Полученные решения свидетельствуют о расширении возможностей удовлетворения всех классических граничных условий оболочек. С варьированием поверхности спая слоев сохраняется основное свойство равнопрочных проектов — условие равнопрочности (условие текучести Мизеса) на внешних поверхностях слоев влечет выполнение этого условия по всему объему при определенном выборе материалов и толщин слоев оболочки. В работах [3–4] сформулирована и решена задача проектирования упругих эллипсоидальных и тороидальных оболочек вращения в условиях термосилового нагружения.

В настоящей работе исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) слоистых круглых пластинок в условиях термосилового воздействия и выполнения критерия равнопрочности на внешних поверхностях слоев. Проведен сравнительный анализ НДС пластинок с НДС эллипсоидальных и тороидальных оболочек [3–4]. Показано, что конструктивная неоднородность, нормальная анизотропия, непрерывность теплового потока и разрывы напряжений при постоянной положительной температуре на внешних поверхностях слоев ведут к возрастанию, а при отрицательных температурах — как к уменьшению, так и возрастанию

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 11-08-00186-а).

интенсивностей напряжений на поверхности спая слоев по сравнению с интенсивностями напряжений на внешних поверхностях слоев.

Рассмотрим двухслойную осесимметрично нагруженную круглую пластинку в цилиндрической системе координат. Первая квадратичная форма отсчетной поверхности:

$$dl^2 = dr^2 + r^2 d\varphi^2, \quad (1)$$

где  $dl$  — длина линейного элемента;  $r$  и  $\varphi$  — полярные координаты.

Главные кривизны  $k_1$  и  $k_2$  для пластиинки равны

$$k_1 = k_2 = 0. \quad (2)$$

Пластиинка выполнена из двух ортотропных слоев: внешнего (первого),  $H_0 \leq \bar{z} \leq Z_1$ , и внутреннего (второго),  $-Z_2 \leq \bar{z} \leq H_0$ ,  $\bar{z} = H_0(r)$  — задаваемая аппликата поверхности спая слоев до отсчетной плоскости,  $Z_1 = H_0 + H_1$ ,  $Z_2 = H_2 - H_0$ ,  $H_1$  и  $H_2$  — толщины слоев,  $H = H_1 + H_2$  — полная толщина пластиинки. Механические характеристики материалов слоев предполагаются различными:  $E_{i(k)}$  — модули упругости;  $v_{(k)}$ ,  $v_{12(k)}$ ,  $v_{21(k)}$  — коэффициенты ортотропии;  $\alpha_{i(k)}$  — коэффициенты линейного теплового расширения;  $\lambda_i$  — коэффициенты теплопроводности ( $i, k = 1, 2$ ). Предположим, что геометрической нелинейностью можно пренебречь.

Уравнения равновесия пластиинки [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d(xn_{11})}{dx} - n_{22} &= 0, \quad \frac{d(xq_1)}{dx} + xq_n / \bar{h} = 0, \\ \frac{d(xm_{11})}{dx} - m_{22} - 2xq_1 / \bar{h} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} n_{ii} &= N_{ii} / N_0, \quad m_{ii} = M_{ii} / M_0, \quad q_1 = Q_1 / Q_0, \quad q_n = \bar{q}_n / q_0, \\ x &= r / R, \quad \bar{h} = \bar{H} / R, \quad N_0 = Q_0 = 2\sigma_0 \bar{H}_0, \quad M_0 = \sigma_0 \bar{H}_0^2, \quad q_0 = 2\sigma_0, \end{aligned}$$

где  $N_{ii}$ ,  $M_{ii}$  и  $Q_1$  — усилия, моменты и перерезывающая сила;

$\bar{q}_n$  — нормальная нагрузка;

$\sigma_0$  и  $2\bar{H}$  — предел текучести и толщина эталонной пластиинки, служащей для сравнения с ней проектов пластиинок при одинаковых геометриях, нагрузлениях и опираннях.

Деформации  $\varepsilon_{0i}$  и изменения кривизн  $\bar{\kappa}_i$  отсчетной поверхности:

$$\varepsilon_{01} = \bar{h} \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_{02} = \frac{\bar{h}u}{x}, \quad \kappa_1 = \bar{h} \frac{d\vartheta}{dx}, \quad \kappa_2 = \frac{\bar{h}}{x} \vartheta, \quad \vartheta = -\bar{h} \frac{dw}{dx}. \quad (4)$$

Здесь

$$\kappa_i = \bar{H}_0 \bar{\kappa}_i (i = 1, 2), \quad u = U / \bar{H}_0, \quad w = W / \bar{H}_0,$$

где  $U$  и  $W$  — окружное и нормальное перемещения.

Для рассматриваемой пластиинки правомерно введение вектор-столбцов напряжений  $\bar{\sigma}_{(k)}$ , деформаций  $\bar{\varepsilon}_0$ , изменений кривизн  $\bar{\kappa}$ , усилий  $\bar{n}$ , моментов  $\bar{m}$  и коэффициентов линейного теплового расширения  $\bar{\alpha}_{(k)}$ , формулировки закона Дюамеля–Неймана, закона Фурье, допущения в исследовании теплового потока, критерия Мизеса–Хилла равнопрочного проекта на поверхностях  $z = z_1 = Z_1 / \bar{H}_0$  и  $z = z_2 = Z_2 / \bar{H}_0$ , приведенное в [1–4].

На основании равенств (4), с учетом уравнения (2), получим условия совместности деформаций:

$$\frac{d\varepsilon_{02}}{d\theta} = \frac{1}{x}(\varepsilon_{01} - \varepsilon_{02}), \quad \frac{d\kappa_2}{d\theta} = \frac{1}{x}(\kappa_1 - \kappa_2). \quad (5)$$

Из второго и четвертого равенств (4) следует дифференциальное уравнение для определения прогиба  $w$ :

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{x}{h^2} \kappa_2. \quad (6)$$

Уравнения (3), (5), (6) и (11) работы [4], в которых следует заменить величину  $\kappa_1$  на  $h$ , представляют полную систему из семи нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, определяющих равнопрочные проекты двухслойных круглых пластинок с переменными толщинами слоев.

Для удобства записи полученной системы уравнений введем вектор-столбцы искомых функций  $\bar{Y} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7)'$  и правых частей  $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7)'$ ,

где

$$\begin{aligned} y_1 &= \omega_1, \quad y_2 = \omega_2, \quad y_3 = h_1 = H_1 / \bar{H}_0, \\ y_4 &= h_2 = H_2 / \bar{H}_0, \quad y_5 = q_1, \quad y_6 = \omega, \quad y_7 = T_{1(1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (3), (5), (6) и (11) работы [4] в переменных (7) примет вид:

$$\frac{d\bar{Y}}{d\theta} = \bar{F}, \quad \bar{F} = (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7)'. \quad (8)$$

Выражения для вектора  $\bar{F}$  правых частей уравнения (8) приведены в работе [3], в которых следует учесть соответствующие выражения в уравнениях (3)–(5).

В рассмотренных частных случаях после исключения седьмого уравнения системы (8) получим систему уравнений шестого порядка. Тогда следует принять  $f_{10}^t = f_{20}^t = f_{30}^t = f_{40}^t = 0$  [3].

Естественные граничные условия на краях ( $x = x_0$ ,  $x = 1$ ) пластинки [1]:

- а) свободный край —  $n_{11} = m_{11} = q_1 = 0$ ;
- б) шарнирный, неподвижно опертый край —  $u = w = m_{11} = 0$ ;
- в) жесткая заделка —  $u = w = \theta = 0$ .

Для изотропных круглых пластинок, закрепленных только на внешнем контуре ( $x = 1$ ), граничные условия в центре ( $x = 0$ ) имеют вид:

$$u = 0, \quad n_{22} = n_{11}, \quad m_{22} = m_{11}.$$

Последние граничные условия получены с учетом симметрии в центре пластинки.

В результате поставлена двуточечная краевая задача с семью нелинейными дифференциальными уравнениями (8) и шестью граничными условиями для определения равнопрочного проекта неоднородной ортотропной двухслойной пластиинки.

Для пластиинки справедлив анализ граничных условий шарнирного опирания и представление их на краю  $x = x_0$  в виде [3]:

$$y_1 = \omega_1, \quad y_2 = \omega_2(h_1, \omega_1), \quad y_3 = h_1, \quad y_4 = h_2(\omega_1, h_1), \quad y_5 = q_1, \quad y_6 = 0, \quad y_7 = T_{1(1)}. \quad (9)$$

Здесь величины  $h_1$  и  $\omega_1$  являются параметрами, в число которых включим также перерезывающую силу  $q_1$ . На параметры  $h_1$  и  $\omega_1$  наложим требование положительности  $h_1$  и  $h_2$  на краю пластиинки  $x = x_0$ .

Остается неизменным седьмое граничное условие, связанное с двумя рассмотренными в [3] особенностями поставленной задачи.

Решив численно задачу Коши с уравнениями (8) и граничными условиями (9), относительный по отношению к эталонной пластиинке вес  $v$  или стоимость  $c$  неоднородной пластиинки определим из следующих выражений:

$$v = \frac{1}{(1-x_0^2)} \int_{x_0}^1 (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) x dx, \quad c = \frac{1}{(1-x_0^2)} \int_{x_0}^1 (c_1 \rho_1 h_1 + c_2 \rho_2 h_2) x dx.$$

Здесь

$$v = \frac{V}{V_s}, \quad c = \frac{C}{C_s}, \quad \rho_k = \frac{\rho_k^0}{\rho_s}, \quad c_k = \frac{c_k^0}{c_s},$$

причем  $\rho_s$  и  $\rho_k^0$  — удельные плотности;

$c_s$  и  $c_k^0$  — удельные стоимости материалов;

$V_s$  и  $V$  — веса;

$C_s$  и  $C$  — стоимости эталонной и проектируемой пластиинок соответственно.

Проекты относительных минимальных веса или стоимости определим из решений поставленной задачи Коши варьированием параметров  $\omega_1$ ,  $h_1$  и  $q_1$ , а также коэффициентов  $a_1$  и  $b_1$  линейного уравнения для поверхности спая слоев

$$h_0 = ((b_1 - a_1)x + a_1 - b_1 x_0) / l, \quad l = 1 - x_0.$$

В приведенных ниже примерах решение задачи Коши получено методом Фельберга с делением интервала  $l$  на 20000 подинтервалов и контролем точности и устойчивости. В примерах рассмотрены шарнирно опертые на одном краю ( $x = x_0$ ) пластиинки под действием внешнего равномерного давления с одинаковыми параметрами:

$$\bar{h} = 0,01; \quad x_0 = 0,2; \quad v_{12(k)} = v_{21(k)} = 0,3. \quad (10)$$

В первом примере первый слой двухслойной пластиинки выполнен из дюралюминия, а второй — из стали, с дополнительными к равенствам (10) параметрами:

$$e_{i(1)} = 0,36 \cdot 10^3; \quad e_{i(2)} = 10^3; \quad \tau_{(1)} = 1; \quad \tau_{(2)} = \tau_{(1)} e_{i(2)} / e_{i(1)} = 2,77; \quad \lambda_1 = 0,394;$$

$$\lambda_2 = 0,185; \quad \alpha_1 = 2,2 \cdot 10^{-5}; \quad \alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-5}; \quad \rho_1 = 0,33; \quad \rho_2 = 1; \quad c_1 = 1; \quad c_2 = 1.$$

При таком выборе пределов текучести интенсивности деформаций на внешних поверхностях слоев равны.

Во втором примере оба слоя двухслойной пластиинки изготовлены из одного материала — стали, с дополнительными к равенствам (10) параметрами:

$$e_{i(1)} = e_{i(2)} = 10^3; \quad \tau_{(1)} = \tau_{(2)} = 1; \quad \lambda_1 = \lambda_2 = 0,185; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-5};$$

$$\rho_1 = \rho_2 = 1; \quad c_1 = c_2 = 1.$$

Такую пластиинку можно рассматривать как однородную.

Эталонная пластиинка выполнена из одного материала, как во втором примере, и шарнирно оперта по краям [1]. Нагрузка по допустимой величине  $\tau_{(k)} = 1$  в какой-либо одной точке определена для эталонной пластиин-

ки по линейной теории упругих пластинок методом ортогональной прогонки и равна  $q_n = -0,333 \cdot 10^{-3}$ .

Вычисления проведены с учетом уравнения (11) работы [3] для функций, характеризующих распределение температуры. Зависимости в обозначениях работы [3]  $z_{01} = h_0 + h_1$ ,  $z_{02} = h_2 - h_0$ ,  $h = h_1 + h_2$ ,  $h_0$ ,  $w$ ,  $m_1$ ,  $T_{11}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  от координаты  $x$ ,  $x_0 \leq x \leq 1$  для первой пластиинки с температурами на внешних поверхностях слоев  $T_1 = 100^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 200^\circ\text{C}$  ( $v = 0,276$ ) показаны на рис. 1–2, с температурами  $T_1 = -100^\circ\text{C}$  и  $T_2 = -200^\circ\text{C}$  ( $v = 0,270$ ) на рис. 3–4, с температурами  $T_1 = T_2 = 100^\circ\text{C}$  ( $v = 0,257$ ) на рис. 5 и с температурами  $T_1 = T_2 = -100^\circ\text{C}$  ( $v = 0,268$ ) на рис. 6. Зависимости  $z_{01}$ ,  $z_{02}$ ,  $h_0$ ,  $w$ ,  $m_1$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  от координаты  $x$  для второй пластиинки с одинаковыми температурами на внешних поверхностях слоев  $T_1 = T_2 = 100^\circ\text{C}$  ( $v = 0,600$ ) представлены на рис. 7, а с температурами  $T_1 = T_2 = -100^\circ\text{C}$  ( $v = 0,507$ ) на рис. 8.

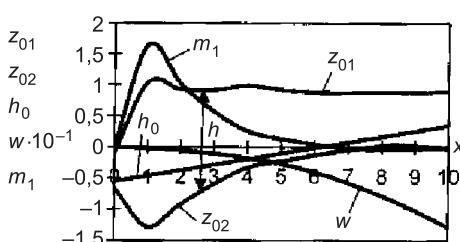


Рис. 1

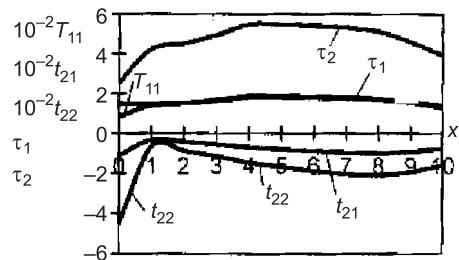


Рис. 2

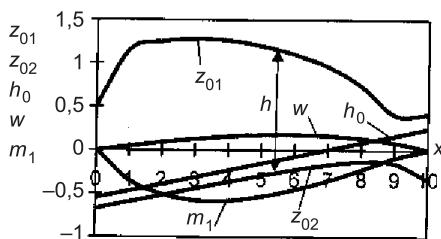


Рис. 3

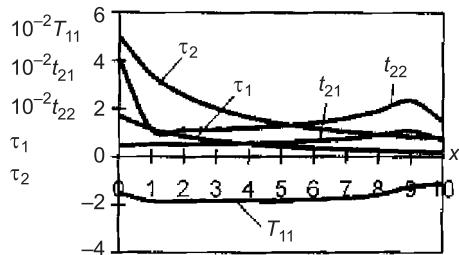


Рис. 4

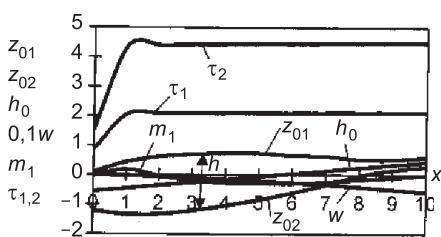


Рис. 5

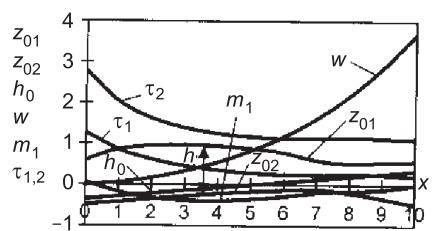


Рис. 6

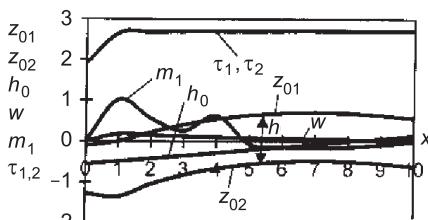


Рис. 7

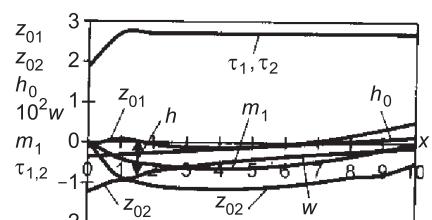


Рис. 8

**Выводы.** 1. Сохраняются затруднения, связанные с выполнением естественных граничных условий и отмеченные в работах [1–4]. Как правило, при точном обеспечивании граничных условий на одном крае нетрудно осуществить одно из трех граничных условий на другом крае пластинки. В примерах достаточно точно выполнено граничное условие — равенство нулю изгибающего момента (см. рис. 1, 6). Равнопрочное предельное состояние под действием заданного внешнего давления создается установкой подвижного шарнира вдоль нормали с приложением поперечной и радиальной силы. В частном случае одинаковой температуры на внешних поверхностях слоев осуществлены граничные условия — равенство нулю изгибающего момента и прогиба (см. рис. 7, 8). Невыполнение естественных граничных условий приводит к выводу, что НДС равнопрочной слоистой пластинки является предельным состоянием упругой слоистой пластинки с предельными нагрузками, как в жесткопластическом анализе [2].

2. Градиенты температур при нагреве внешних поверхностей первой пластинки ведут к увеличению интенсивностей напряжений на поверхности спая слоев более чем в 2 раза (см. рис. 2), а с охлаждением внешних поверхностей — к снижению интенсивностей напряжений, за исключением краевых эффектов (см. рис. 4). Уменьшение интенсивностей напряжений имеет место и при одинаковых температурах охлаждения на внешних поверхностях несущих слоев первой пластинки, за исключением краевых эффектов (см. рис. 6). Однако при одинаковом нагреве внешних поверхностей первой пластинки отмечено превышение интенсивностей напряжений на поверхности спая по сравнению с пределами текучести материалов слоев (см. рис. 5).

3. НДС и распределения температур пластинок, как правило, характеризуются немонотонными зависимостями от координаты.

4. Для второй пластинки с охлаждением, в отличие от эллипсоидальной и торoidalной оболочек [3–4], интенсивность напряжений на поверхности спая  $z = h_0$  превышает в 2,7 раза предел текучести, за исключением краевого эффекта (см. рис. 8). Следовательно, охлаждение внешних поверхностей слоев так же, как и при нагреве (см. рис. 7), может быть причиной разрушения во внутренних областях пластинки.

Из полученных решений следует существенная зависимость веса, распределения толщин, интенсивностей напряжений от выбранной формы поверхности спая слоев. Принятая простейшая линейная зависимость для поверхности спая слоев не отражает всего многообразия особенностей напряженно-деформированного состояния и оптимизации элементов тонкостенных конструкций в условиях термосилового нагружения. Численные исследования также показывают различный характер влияния температуры на предельные состояния при нагреве и охлаждении внешних поверхностей пластинок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В о х м я н и н, И.Т. О проектировании двухслойных колецевых пластин по критерию равнопрочности [Текст] / И.Т. Вохмянин, Ю.В. Немировский // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности : Тр. XVIII Межресп. конф., Кемерово, 1–3 июля 2003 г. / под ред. В.М. Фомина. — Новосибирск : Нонпарель, 2003. — С. 27–37.
2. В о х м я н и н, И.Т. О равнопрочности и несущей способности упругих слоистых оболочек вращения [Текст] / И.Т. Вохмянин, Ю.В. Немировский // Динамика сплошной среды : сб. науч. тр. / Ин-т гидродинамики СО РАН. — Новосибирск, 2007. — Вып. 125 : Механика структурно-неоднородных сред. — С. 32–35.

3. В о х м я н и н, И.Т. Проектирование равнопрочных упругих эллипсоидальных оболочек вращения в условиях термосилового нагружения [Текст] / И.Т. В охм янин, Ю.В. Немировский // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. — Минск, 2010. — Вып. 25. — С. 127–137.
4. В о х м я н и н, И.Т. Проектирование равнопрочных упругих торoidalных оболочек вращения в условиях термосилового нагружения [Текст] / И.Т. В охм янин, Ю.В. Немировский // Докл. Акад. наук высш. шк. — 2011. — № 2(17). — С. 65–77.

*ВОХМЯНИН Иван Тимофеевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: vokhmyanin@mbit.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 15.01.13

**Vokhmyanin Ivan Timofeevich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: vokhmyanin@mbit.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 Sciense, Novosibirsk, Russia

## **EQUAL-STRONG DESIGN OF ELASTIC ROUND AND CIRCULAR TWO-LAYERED PLATES IN CONDITIONS OF THERMO-FORCE LOADING**

A study of layered round and circular plates stress and deformation state (SDS) under impact thermo-force loading and fulfillment of equal-strong criterion to the outer surfaces of the layers has been fulfilled. A comparative analysis of the characteristics of SDS plates with SDS of elliptical and toroidal shells has been executed.

**Key words:** equal-strong, temperature, intensity, stress, force, torque, weight, elasticity, deforming.

### REFERENCES

1. V o k h m y a n i n, I.T. About designing two-layered circular plates by equal-strong criterion [Text] / I.T. Vokhmyanin, Yu.V. Nemirovsky // Numerical methods of the theory of elasticity and plasticity : works. XVIII Interrep. conf., Kemerovo, 1 — July 3, 2003/ed. by V.M. Fomin. — Novosibirsk : Nonparel, 2003. — P. 27–37.
2. V o k h m y a n i n, I.T. On equal-stronghold and bearing capacity of layered elastic shells of revolution [Text] / I.T. Vokhmyanin, Yu.V. Nemirovsky // Dynamics of solid environment : Col. scientific. wo. / In-t hydrodynamics of SB RAS. — Novosibirsk, 2007. — Iss. 125 : Mechanics of structurally-heterogeneous environments. — P. 32–35.
3. V o k h m y a n i n, I.T. Design of equal-strong elastic ellipsoidal shells of revolution in conditions of thermo-force loading [Text] / I.T. Vokhmyanin, Yu.V. Nemirovsky // Theoretical and applied mechanics : Intern. science and technology book. — Minsk, 2010. — Iss. 25. — P. 127–137.
4. V o k h m y a n i n, I.T. Design equal-strong elastic toroidal shells of revolution in conditions of thermo-force loading [Text] / I.T. Vokhmyanin, Yu.V. Nemirovsky // Reports of the Academy of Sciences of higher school. — 2011. — N 2 (17). — P. 65–77.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327.001

Л.А. СУЛЕЙМАНОВА, А.Н. ХАРХАРДИН

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО В ЯЧЕИСТО-БЕТОННОЙ СМЕСИ

Рассмотрено взаимодействие газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего в ячеисто-бетонной смеси. Газовые пузырьки в цементном тесте окружены жидкой фазой с мелкими частицами композиционного вяжущего. В результате взаимодействия дисперсных фаз, снижения внутренней энергии и самоорганизации системы газобетонной смеси происходит распределение по размерам частиц композиционного вяжущего, образование мелкокристаллической структуры и повышение прочности ячеистого бетона.

**Ключевые слова:** распределение частиц, композиционное вяжущее, ячеисто-бетонные смеси, ячеистый бетон.

Газобетон содержит как мелкие поры нано- и микрометрового размера, так и в большей мере крупные (до 2 мм) с положительным в данной системе зарядом поверхности. В строительном материаловедении актуальны вопросы о взаимодействии газовых пузырьков с частицами композиционного вяжущего и о распределении частиц вяжущего в ячеисто-бетонной смеси. Данная задача может быть рассмотрена с позиций формирования структуры цементного камня на поверхности межфазного слоя с газовыми пузырьками с учетом электростатического взаимодействия пузырьков с мелкими частицами цемента в цементном teste. Распределение по размерам частиц композиционного вяжущего (кинкерная составляющая до 70 %, гипс — до 5, наполнитель — до 30, суперпластификатор — до 1 % [1]) способствует образованию мелкокристаллической структуры и повышенной прочности ячеистого бетона.

В основу процессов положены представления о взаимодействии сольватированных частиц композиционного вяжущего с заряженной поверхностью межфазного слоя пузырьков. При этом частицы композиционного вяжущего имеют заряд противоиона по отношению к заряду катионов щелочных металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ) в межфазном слое газовых пузырьков [2]. Мелкие частицы композиционного вяжущего должны сосредоточиваться на поверхности межфазного слоя, так как гравитационная сила осаждения в водной фазе меньше или равна силе электростатического их взаимодействия с газовыми пузырьками, а крупные частицы — вытесняться в межузловые объемы — в области Плато (рисунок).

Взаимодействие газовых пузырьков между собой и с частицами твердой фазы в цементном teste (растворе) рассмотрено с позиций теории устойчивости гидрофобных коллоидов ДЛВО (DLVO) [3].

---

© Сулейманова Л.А., Хархардин А.Н., 2013

Распределение сил взаимодействия газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего в цементном (тесте) строительном растворе можно записать в виде:

$$f_1 + f_2 - f_3 = 0, \quad (1)$$

где  $f_1, f_2$  — сила электростатического взаимодействия соответственно газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего;  $f_3$  — сила молекулярного взаимодействия газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего [3].

Выразим силы взаимодействия газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего через потенциальную энергию их взаимодействия:

$$\frac{U_{\text{пп.}}}{R} + \frac{U_{\text{щ}}}{r} - \frac{A^*}{h^2} = 0, \quad (2)$$

где  $U_{\text{пп.}}, U_{\text{щ}}$  — потенциальная энергия взаимодействия соответственно газовых пузырьков и частиц композиционного вяжущего;

$A^*$  — молекулярная константа взаимодействия частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков (константа Гамакера);

$h$  — расстояние, на которое сближаются заряженные частицы (пузырьки) в результате сил взаимодействия;

$r, R$  — радиус частиц и газовых пузырьков, м.

Для сферических заряженных частиц твердой фазы в коллоидных системах энергетическое уравнение взаимодействия имеет вид [2]:

$$U = U_s + U_m = 2\pi\epsilon\epsilon_0\phi_{\delta}^2 \cdot \ln[1 + \exp(-xh)] - \frac{A^*r}{12h}, \quad (3)$$

где  $U_s, U_m$  — энергия электростатического отталкивания и межмолекулярного притяжения;

$\epsilon, \epsilon_0$  — относительная и абсолютная величина диэлектрической проницаемости воды и вакуума,  $\epsilon = 80$ ;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

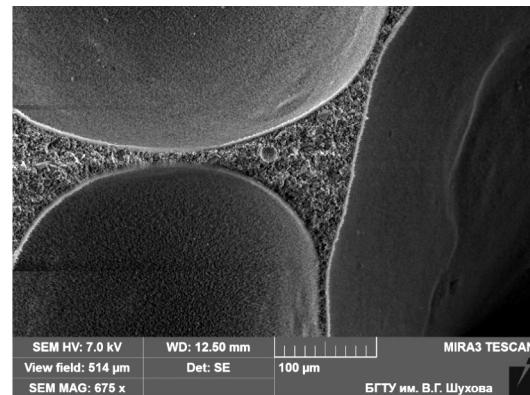
$\phi_{\delta}$  — потенциал диффузного слоя в двойном электрическом слое (ДЭС) при минимальной концентрации противоионов ( $\text{OH}^-$ ),  $\phi_{\delta} = 10-20$  мВ;

$x$  — величина, обратная толщине диффузной части ДЭС;

$A^*$  — константа молекулярных сил взаимодействия (константа Гамакера,  $A^* \approx (0,5-1,0) \cdot 10^{-19}$  Дж/м [2]);

$r, h$  — радиус частиц и среднее расстояние между ними, м.

Первый член этого выражения учитывает энергию электростатического отталкивания элементов структуры в системе (частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков) —  $U_s > 0$ , второй — энергию межмолекулярного притяжения  $U_m < 0$ . На малых и очень больших расстояниях между частицами и газовыми пузырьками преобладает притяжение. Это обусловливает притяжение частиц композиционного вяжущего к поверхности межфазного слоя пузырьков и, соответственно, сближение газовых пузырьков, имеющих ДЭС. На средних расстояниях может преобладать отталкивание.



Микроструктура ячеистого бетона

Уравнение (3) является моделью «коллоидная частица — плоский ДЭС» и описывает взаимодействие частиц коллоидных размеров (2–50 нм).

Приведем уравнение (3) к выражению для взаимодействия заряженных частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков реальных размеров в газобетонной смеси. Для этого воспользуемся величиной показателя степени в законе Кулона для расстояния между заряженными частицами, соответствующему в выражении (3) величине  $h$ . Тогда логарифмический член в уравнении (3) следует принять  $\ln [1 + \exp(-xh^2)] = 1$ , при этом из данного выражения можно вычислять наименьшее значение  $h$ . Введение в уравнение (3) энергии поверхностного натяжения приведет к условию контакта газовых пузырьков и при величине  $h \rightarrow 0$  к удвоенной толщине межфазового слоя.

Для реальных частиц композиционного вяжущего с размером 1–80 мкм, имеющих незначительную кривизну поверхности, в уравнении (3) последний член заменен на выражение для взаимодействия частиц твердой фазы с поверхностью межфазного слоя газовых пузырьков в виде пластины, которое имеет вид  $A^*r / 48\pi h^2$  [3]. В связи с этим уравнение взаимодействия частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков в преобразованном виде

$$2\pi R\epsilon\epsilon_0\varphi_{\delta}^2 = \frac{A^*r}{48\pi h^2}, \quad (4)$$

где  $r$ ,  $R$  — радиус частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков соответственно.

Из этого выражения получим

$$h^2 \leq \frac{0,5 \cdot 10^{-19} r}{96\pi^2 \epsilon\epsilon_0 R \varphi_{\delta}^2}. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (5) известные значения показателей, находим:

$$\begin{aligned} h^2 &\leq \frac{0,5 \cdot 10^{-19}}{96\pi^2 \cdot 80 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (1 \cdot 10^{-2})^2} (r/R) \leq \frac{0,5 \cdot 10^{-19}}{0,67 \cdot 10^{-10}} (r/R) \leq \\ &\leq 0,746 \cdot 10^{-9} (r/R), \end{aligned}$$

$$h \leq [0,746 \cdot 10^{-9} (r/R)]^{1/2} \leq 2,73 \cdot 10^{-4} (r/R)^{1/2}.$$

Отсюда размер частиц композиционного вяжущего, расположенных в один слой на поверхности межфазного слоя газовых пузырьков и в просвете между двумя газовыми пузырьками (мембране), будет равен:

$$r_h \leq \frac{2,73 \cdot 10^{-4}}{4} (r/R)^{1/2} \leq 0,68 \cdot 10^{-4} (r/R)^{1/2}. \quad (6)$$

При  $r = R$  из выражения (6) получим:  $r_h \leq 68 \cdot 10^{-6}$  м (68 мкм).

Принимая радиус пузырьков, равным 1 мм (1000 мкм), из выражения (6)

$$r_h \leq 0,68 \text{ мкм} \left( \frac{68}{1000} \right)^{1/2} \leq 18 \text{ мкм}.$$

При двухслойном расположении частиц композиционного вяжущего на поверхности пузырьков имеем:

$$r_h \leq \frac{2,73 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot \sqrt{3} / 2} (r / R)^{1/2} \leq 0,394 \cdot 10^{-4} (r / R)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\sqrt{3} / 2$  — относительная высота залегания частиц композиционного вяжущего второго слоя во впадинах между частицами первого слоя.

При  $r = R$  из этого выражения получим:

$$r_h \leq 39,4 \cdot 10^{-6} \text{ м (39 мкм)}.$$

Если радиус пузырьков  $R = 1$  мм, то при двухслойном расположении частиц композиционного вяжущего на поверхности газовых пузырьков имеем:

$$r_h \leq 39,4 \text{ мкм} \left( \frac{39,4}{1000} \right)^{1/2} \leq 7,8 \text{ мкм.}$$

Установлено, что экранирование катионного межфазного слоя газовых пузырьков частицами композиционного вяжущего в цементном тесте незначительно влияет на изменение расстояния  $h$  при одном и том же потенциале диффузной части ДЭС. Запишем уравнение равновесного состояния такой системы с учетом экранирования газовых пузырьков частицами композиционного вяжущего

$$2\pi R \epsilon \epsilon_0 \Phi_{\delta}^2 + 2\pi r \epsilon \epsilon_0 \Phi_{\delta}^2 = \frac{0,5A^* r}{48\pi h^2}$$

$$\text{либо } 2\pi \frac{R}{r} \epsilon \epsilon_0 \Phi_{\delta}^2 + 2\pi \epsilon \epsilon_0 \Phi_{\delta}^2 = \frac{0,5A^*}{48\pi h^2}. \quad (8)$$

Подставляя в равенство (8) известные значения его показателей, получим:

$$h^2 \leq \frac{0,5A^*}{96\pi^2 \epsilon \epsilon_0 \Phi_{\delta}^2 \left( \frac{R}{r} + 1 \right)} \leq \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-19}}{96\pi^2 \cdot 80 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} (1 \cdot 10^{-2}) \cdot 2} \left( \frac{r}{R+r} \right). \quad (9)$$

Отсюда, при однослоином электростатическом расположении частиц композиционного вяжущего на поверхности межфазного слоя газовых пузырьков

$$\begin{aligned} r_h &\leq \frac{1}{4} \left[ \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-19}}{0,671 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-16}} \left( \frac{r}{R+r} \right) \right]^{1/2} \leq \frac{2,73 \cdot 10^{-4}}{4} \left( \frac{r}{R+r} \right)^{1/2} \leq \\ &\leq 0,68 \cdot 10^{-4} \left( \frac{r}{R+r} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (10)$$

где величина 4 — число радиусов двух частиц композиционного вяжущего, размещающихся между двумя газовыми пузырьками при электростатическом их притяжении. Если  $R \gg r$ , то  $r_h \rightarrow 0$  происходит отталкивание газовых пузырьков до равновесного расстояния между ними и частичного перекрывания диффузионных слоев ДЭС.

Принимая за наибольший радиус газовых пузырьков  $R = 1000$  мкм (1 мм), из выражения (10) получим:

$$r_h = 68 \text{ мкм} \left( \frac{68}{1000 + 68} \right)^{1/2} = 17,16 \text{ мкм.}$$

Эта величина  $r_h = 17,16$  мкм  $< r_h = 18$  мкм, что и требовалось доказать.

$$\text{Если } R = r, \text{ то } r_h = 68 \text{ мкм} \left( \frac{68}{68 + 68} \right)^{1/2} = 68 \cdot \left( \frac{1}{2} \right)^{1/2} = 48 \text{ мкм.}$$

$$\text{Если } R = 4r, \text{ то } r_h = 68 \text{ мкм} \left( \frac{68}{4 \cdot 68 + 68} \right)^{1/2} = 30 \text{ мкм.}$$

$$\text{Если } R = 6r, \text{ то } r_h = 68 \text{ мкм} \left( \frac{68}{6 \cdot 68 + 68} \right)^{1/2} = 26 \text{ мкм.}$$

При двухслойном расположении частиц композиционного вяжущего на поверхности межфазного слоя газовых пузырьков

$$r_h = \frac{2,73 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4 \cdot \sqrt{3} / 2} \left( \frac{r}{R+r} \right)^{1/2} = 0,394 \cdot 10^{-4} \left( \frac{r}{R+r} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Если  $R = r$ , то из этого выражения получим:

$$r_h = 0,394 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5^{1/2} = 27,8 \text{ мкм.}$$

Следовательно, уравнения (8)–(10) точнее описывают взаимодействие частиц композиционного вяжущего и газовых пузырьков в реальной ячеисто-бетонной смеси, чем уравнения (3)–(6). Минимальное расстояние  $h = 4r$ , на которое сближаются газовые пузырьки в результате сил притяжения при однослойном расположении частиц композиционного вяжущего на их поверхности в цементном тесте (и остающиеся в газобетоне), зависит от относительного их размера и сил (энергии) их взаимодействия.

На заряженной поверхности межфазного слоя газовых пузырьков располагаются мелкие частицы композиционного вяжущего в результате повышенных сил притяжения. Мелкие частицы композиционного вяжущего, обволакивая газовые пузырьки в 1–3 слоя, образуют при затвердевании на стенках пор газобетона мелкокристаллическую структуру, а крупные частицы композиционного вяжущего остаются в пространстве между газовыми пузырьками (в объемах узловых элементов Плато). Таким образом, происходит естественное распределение частиц композиционного вяжущего в цементном тесте с газовыми пузырьками в результате снижения внутренней энергии и самоорганизации системы газобетонной смеси.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Сулейманова, Л.А. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих [Текст] / Л.А. Сулейманова, В.С. Лесовик, А.Г. Сулейманов. — Белгород : КОНСТАНТА, 2010. — 152 с.
- Слюсарь, А.А. Основы коллоидной химии и физико-химической механики [Текст] / А.А. Слюсарь. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. — С. 75–128.
- Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии [Текст] / Д.А. Фридрихсберг. — Л. : Химия, 1984. — С. 240–248.

*СУЛЕЙМАНОВА Людмила Александровна, д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ХАРХАРДИН Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 21.01.13

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

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

## **DISTRIBUTION OF PARTICLES COMPOSITE BINDING IN CELLULAR CONCRETE MIXTURE**

The interaction between gas bubbles and the particles in the composite binding cellular concrete mix. Gas bubbles in the cement paste surrounded by a liquid phase with small particles of composite binding. A result of interaction dispersed phase, reduce the internal energy and self-organization of gas concrete mixture is the particle size distribution of the composite binder, education fine-grained structure and high strength cellular concrete.

**Key words:** distribution of particles, composite binding, cellular mixtures, cellular concrete.

### REFERENCES

1. S uleymanova, L.A. Non-autoclaved aerated concrete in composite binding [Text] / L.A. Suleymanova, V.S. Lesovik, A.G. Suleymanov. — Belgorod : CONSTANTA, 2010. — 152 p.
  2. Slusar, A.A. Fundamentals of colloid chemistry and physicochemical mechanics [Text] / A.A. Slusar. — Belgorod : Publ. House of BSTU, 2010. — P. 75–128.
  3. Fridrikhsberg, D.A. Course of Colloid Chemistry [Text] / D.A. Fridrikhsberg. — L. : Chemistry, 1984. — P. 240–248.
-

УДК 691.421.002.3

Г.А. ГОРГОДЗЕ, Г.А. ЗИМАКОВА, М.В. КУДОМАНОВ, В.В. КНЯЖЕВ

## МОДИФИКАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Описаны экспериментальные исследования по повышению качества грубой строительной керамики путем введения модифицирующей углеродсодержащей добавки. Приведены результаты испытаний в графической форме, а также фотографии микроструктуры, полученные методом электронной микроскопии.

**Ключевые слова:** керамика, углерод, муллitoобразование.

Для развития керамической промышленности в России необходимо вовлечение в технологический процесс новых сырьевых материалов, обладающих более низкими формовочными и технологическими характеристиками, чем традиционно используемые легкоплавкие пластичные и высокопластичные глины. Например, тугоплавкие глины Кыштырлинского месторождения (Тюменская область) являются основным сырьем для грубой строительной керамики в регионе [1]. Минералогическая (монтмориллонитовая) структура этих глин требует тщательной массоподготовки, а также обязательного применения отощающего компонента в значительном количестве для получения рядового керамического кирпича. К тому же структура основного глинообразующего минерала, приведенная схематично на рис. 1, предопределяет высокую чувствительность изделий к термической обработке, а также обуславливает появление в структуре сырца внутренних напряжений из-за неравномерного влагопереноса.

Для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик готовых изделий, а также для получения лицевой керамики, традиционно применяют классические способы модификации сырьевой смеси [2, 3] (табл. 1).

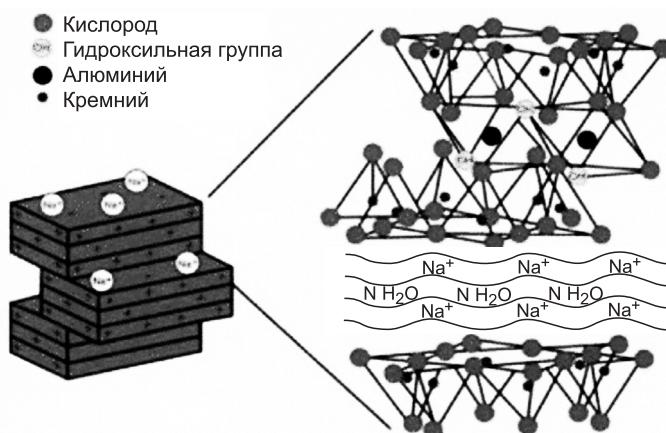


Рис. 1. Структура монтмориллонита

Таблица 1

**Способы модификации керамической шихты**

Способ модификации	Достоинства	Недостатки
Тонкий помол компонентов	Получение гомогенной шихты из непластичных материалов	Высокая энергонапряженность, металлоемкость линии
Введение модифицирующих добавок	Виды добавок практически не ограничены технологией	Сложность получения гомогенной шихты
Вылеживание и вымораживание глины	Использование по максимуму пластических свойств глины	Значительное увеличение времени подготовки сырьевых материалов, сезонность
Смешивание разнородного глинистого сырья	Варьирование цветовой гаммы изделий, улучшение их физико-механических характеристик	Привязанность к месторождениям и транспортным схемам, повышение себестоимости изделий

Для модификации изделий был выполнен эксперимент по введению в шихту графитового сырья, а именно графита искусственного измельченного. Метод выбран на основании того, что добавка такого рода, помимо влияния на физико-механические свойства изделий, за счет своей чешуйчатой структуры, изменяет реологические и прессовочные характеристики массы, что в свою очередь влияет на необходимое давление прессования. Для эксперимента использовался графитовый порошок с размером зерен 0,1–2,5 мм. Гранулометрический и химический состав глины приведен в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Гранулометрический состав глины**

Частицы	Содержание, %
Песчаные 1–0,05 мм	14,5–15,7
Пылеватые 0,05–0,005 мм	18,7–19,9
Глинистые менее 0,005 мм	65,0–66,2

Таблица 3

**Химический состав кыштырлинской глины**

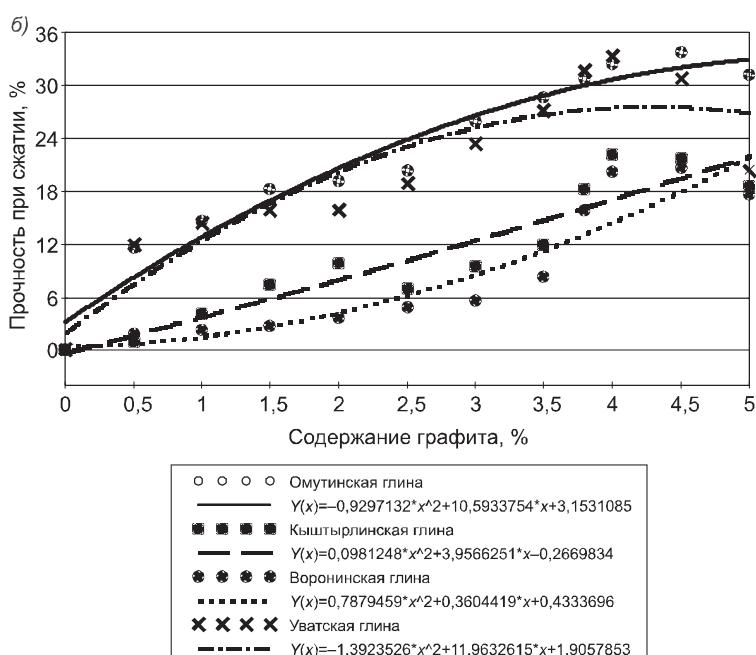
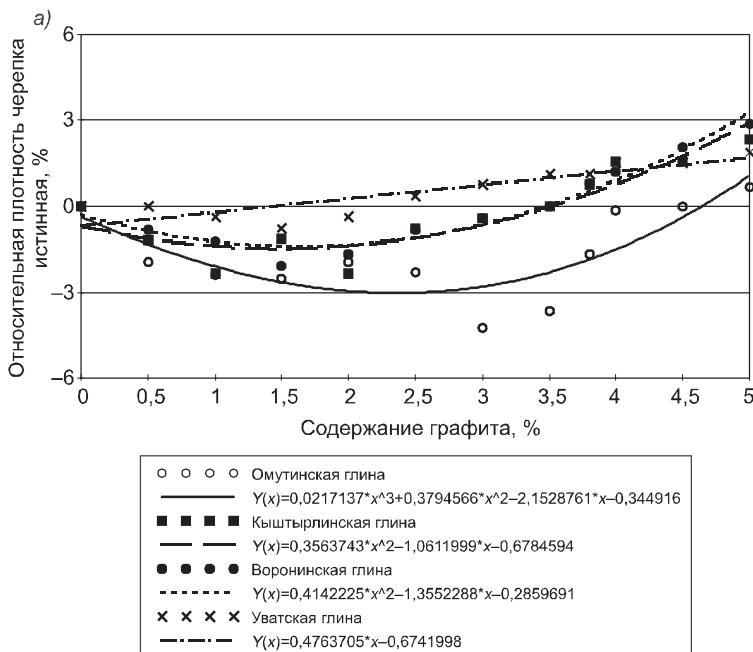
Оксид	Содержание	Оксид	Содержание
SiO <sub>2</sub>	55,30–76,70	CaO	1,37–1,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,58–18,6	MgO	1,62–1,92
TiO <sub>2</sub>	0,77–1,00	SO <sub>3</sub>	1,05–2,01
Na <sub>2</sub> O	0,60–0,70	K <sub>2</sub> O	1,11–2,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,76–8,80	П.п.п.	6,40–7,64

Суть эксперимента сводилась к следующему: из керамической шихты, включающей в себя кыштырлинскую глину и графит, формовались образцы-цилиндры диаметром 50 мм и высотой 50 мм, с формовочной влажностью 15 %. Дозировка графита варьировалась от 0 до 5 % по массе. Образцы высушивались в сушильном шкафу до постоянной массы, а затем обжигались в электропечи, при максимальной температуре выдержки 1000 °C. У полученных изделий определялись: истинная плотность, прочность при сжатии, а также общая усадка. Результаты исследования характеристик оформлялись в графическом виде (рис. 2). Помимо этого были получены фотографии микроструктуры керамики при различном увеличении с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 3).

Из анализа графических зависимостей следует, что введение графита в керамическую шихту оказывает комплексное влияние на свойства обожженного черепка. При увеличении дозировок графита истинная плотность повышается незначительно, в пределах ошибки эксперимента, что говорит о крайне малой доле стеклофазы в структуре, что можно подтвердить и характером изменения общей усадки, тоже незначительном. Значительное повышение прочности материала (до 30 %) свидетельствует о качественном влиянии углеродсодержащей добавки на кристаллооб-

разование в структуре, а именно на увеличение доли муллита в составе кристаллической фазы.

Анализ микрофотографий также подтверждает положительное влияние графита на свойства керамики, обусловленные качеством микроструктуры. Отчетливо видно множество кристаллических образований, формирующих плотный скелет, а также микропоры, в которых заметны игольчатые кристаллы первичного муллита. Такие изменения структуры происходят за счет действия графита в качестве комплексной модифицирующей добавки, повышающей температуру при обжиге внутри черепка, и качественно меняющей газовую среду в изделии, что и делает возмож-



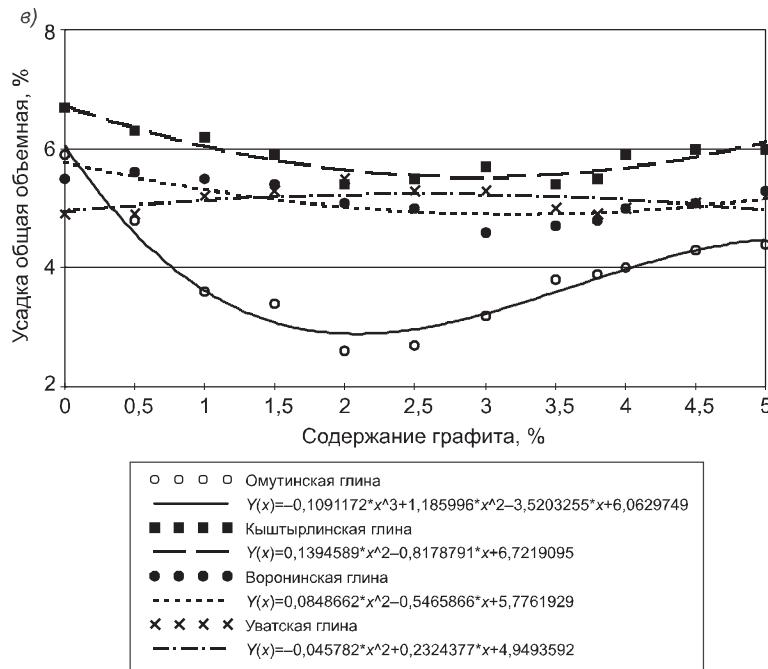


Рис. 2. Средняя плотность (а), прочность при сжатии (б), общая усадка (в) полученных изделий

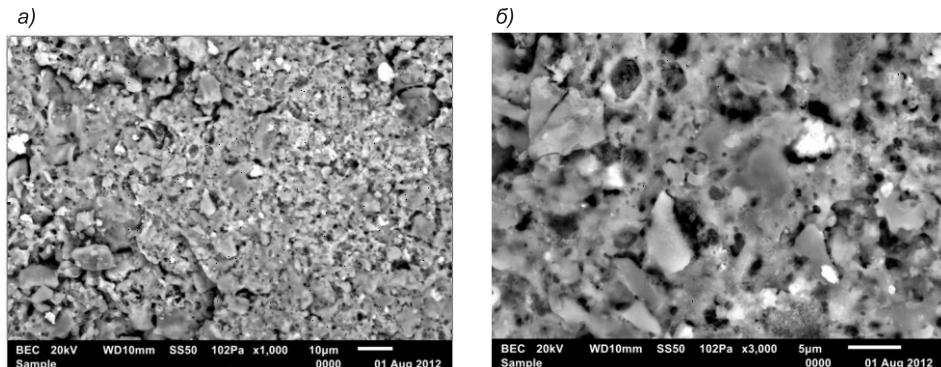


Рис. 3. Структура черепка при увеличении 1000 крат (а) и 3000 крат (б)

ным протекание процесса муллitoобразования при более низкой температуре обжига кирпича.

**Выводы.** 1. Технологическая эффективность минеральных компонентов керамической массы определяется их функциональностью, которая зависит от их природы, состава и механизма действия. Высокая функциональность графита делает его своеобразным центром формирования многокомпонентных составов, обеспечивающих большую часть потребностей технологии керамических материалов.

2. Применение нетрадиционных добавок открывает принципиально новые возможности получения качественных керамических структур, с вовлечением в технологический процесс различного глинистого сырья, не соответствующего требованиям нормативной документации [4]. Такой подход позволяет расширить сырьевую базу для грубой строительной керамики, что является научной и технологической новизной.

3. Для получения строительных изделий с использованием графитовых материалов можно рекомендовать введение графита в сырьевую

смесь в дозировках 2–5 % по массе, в зависимости от основного сырья. Более точный расход нужно устанавливать опытным путем в лаборатории, а при необходимости — изготовлением опытно-промышленной партии продукции. Применение графитовой добавки позволит повысить марку кирпича по прочности и благоприятно скажется на микроструктуре обожженных изделий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по расширению сырьевой базы Западной Сибири для производства керамдора с уточнением требований к сырью [Текст]. — М. : СоюзДорНИИ, 1979. — 46 с.
2. Кондратенко, В.А. Керамические стеновые материалы: оптимизация их физико-технических свойств [Текст] / В.А. Кондратенко. — М. : Композит, 2005. — 512 с.
3. Зорохович, В.С. Производство кирпича [Текст] / В.С. Зорохович. — Л. : Стройиздат, 1988. — 232 с.
4. ГОСТ 9169–75. Сырье глинистое для керамической промышленности [Текст] : Классификация. — Введ. 1979-07-01. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 7 с.

ГОРГОДЗЕ Георгий Автандилович, ассист.; E-mail: g.gorgodze@inbox.ru  
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

ЗИМАКОВА Галина Александровна, канд. техн. наук, доц.

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет  
КУДОМАНОВ Максим Валерьевич, ассист.

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет  
КНЯЖЕВ Вячеслав Васильевич, канд. техн. наук, доц.

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 15.01.13

**Gorgodze Georgy Avtandilovich**, assistant; E-mail: g.gorgodze@inbox.ru, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Zimakova Galina Aleksandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kudomanov Maksim Valerevich**, assistant, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Knyazhev Vyacheslav Vasilevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

#### MODIFICATION CERAMIC STRUCTURE OF CARBONACEOUS MATERIALS

The paper describes experimental research to improve the quality of rough construction ceramics by introducing carbon-modifying agents. The results of tests in graphical form, as well as photographs of the microstructure obtained by electron microscopy.

Key words: ceramic, carbon, mullitizing.

#### REFERENCES

1. Guidelines to increase resource base in Western Siberia for keramdora clarifying requirements for raw materials [Text]. — M. : Publ. House SoyzDorNII, 1979. — 46 p.
2. Кондратенко, В.А. Ceramic wall materials: optimizing their physical and technical properties [Text]/ В.А. Кондратенко. — М. : Composite, 2005. — 512 p.
3. Зорохович, В.С. Manufacture of bricks [Text] / В.С. Зорохович. — Л. : Стройиздат, 1988. — 232 p.
4. State Standart 9169–75. Raw clay for ceramic industry [Text] : Classification. — Enter. 1979-07-01. — М. : Standards Publ. House, 1979. — 7 p.

УДК 691.42:666.31.022.612

Б.К. КАРА-САЛ, Л.Э. КУУЛАР, Ш.В. СЕРЕН

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОШПАТОЦЕОЛИТОВОЙ ПОРОДЫ

Выявлены особенности формирования структуры керамических стеновых материалов на основе чистой полевошпатоцеолитовой породы, которые зависят от температуры обжига и продолжительности изотермической выдержки при конечной рабочей температуре, а также их влияние на эксплуатационные характеристики получаемых изделий.

Ключевые слова: полевошпатоцеолитовая порода, масса, структура, обжиг, свойства.

Изделия строительной керамики в зависимости от назначения эксплуатируются в различных условиях и отличаются придаваемой структурой, которая формируется в результате сложных физико-химических процессов, протекающих при обжиге. Поэтому направленное регулирование структуры материалов при термической обработке является актуальной проблемой в производстве керамических изделий, решение которой требует поиска и исследования сырьевых материалов с разработкой составов масс и новых технологических способов переработки. Учитывая, что в последнее время истощаются запасы качественных пластичных глин и природных добавок, проблема носит острый характер из-за привлечения ранее неиспользуемых сырьевых материалов для производства керамических изделий.

Цель настоящей работы — изучение особенностей структурообразования керамических изделий на основе полевошпатоцеолитовых пород с выявлением оптимальных параметров термической обработки.

В качестве объекта исследования и основного сырьевого материала принята полевошпатоцеолитовая порода, которая является отходом производства дорожной засыпки и ранее не применялась как компонент керамической массы. Целесообразность использования указанной породы связана с особенностями структуры цеолитов, присутствующих в минеральном составе исходного материала. Как известно, цеолиты представляют собой каркасные алюмосиликаты, которые отличаются ионообменными, сорбционными и каталитическими способностями [1], что позволяет предположить о многофункциональном их действии на керамические шихты. Кроме того, значительное наличие полевых шпатов снижает чувствительность массы к сушке и способствует спеканию массы при обжиге [2].

Исследованная местная полевошпатоцеолитовая порода представлена песчаником серо-коричневого цвета, структура мелкозернистая. Средняя насыпная масса отсева (до 5 мм) составляет 1520–1540 кг / м<sup>3</sup>. Анализ химического состава породы (табл. 1) показывает, что наряду с высоким содержанием железистых соединений (более 5 %), щелочно-земельных элементов (CaO и MgO более 6 %) в значительном количестве присутствуют щелочные оксиды (K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O), что очень важно для спекания массы.

Таблица 1  
Химический состав сырьевых материалов

Оксид	Массовое содержание, %	Оксид	Массовое содержание, %
SiO <sub>2</sub>	61,05	CaO	4,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,84	MgO	1,83
TiO <sub>2</sub>	0,34	K <sub>2</sub> O	2,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,76	Na <sub>2</sub> O	2,14
П.п.п.	9,88		

Работа выполнялась по следующей методике. Полевошпатоцеолитовая порода в виде отсева размером частиц 0,14–3 мм измельчалась в шаровой мельнице сухим способом до остатка на сите 0063 не более 2 %. Из увлажненной массы формовочной влажностью 10 % полусухим способом формировались опытные образцы-цилиндрики диаметром и высотой 35 мм, которые сначала сушились на воздухе, затем в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С. Обжиг проводился в лабораторной электропечи при 800–1100 °С с изотермической выдержкой 1 ч.

Определение технологических свойств массы и физико-механических характеристик обожженных изделий выполнялось согласно ГОСТ 21216.1–93 и 1960.20–89.

Микроструктура образцов исследована с помощью оптического микроскопа LEICA-DMLB (Германия) со встроенной аналого-цифровой фотокамерой и сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV (Япония) с системой химического анализа. Изображения получены с поверхности образцов и со шлифов соответственно. Параметры пористой структуры черепка изучены методом ртутной порометрии.

Результаты исследований показывают, что структуру и свойства обжигаемого материала в основном отражают физико-химические процессы, протекающие при обжиге. Различные фазовые превращения, дегидратация, разложение, аморфизация и кристаллизация существенно влияют на структурообразование керамического материала и, соответственно, на его свойства.

Методом ртутной порометрии установлено, что до начала термической обработки образцы-сырцы имели пористость 32–34 % с капиллярами размерами 250–600 мкм.

Структурные изменения в обжигаемом материале наступают с началом дегидратации цеолитовых и глинистых минералов. С удалением химически связанный воды и последующим разложением карбонатов структура черепка разрыхляется, и в пределах 600–750 °С пористость черепка увеличивается до 38–40 %. В структуре материала наблюдаются поры в виде капилляров, сообщающихся между собой и представляющих сложную систему. Ширина капилляров увеличивается до 1000 мкм. Обожженный материал представляет собой в основном механическую смесь обожженных цеолитовых (клиноптиолит) и глинистых (монтмориллонит) частиц, ортоклаза, зерен кварца, оксида железа и других примесей. Цвет черепка изменяется от красного до серого в зависимости от углубления к центру образца.

Значительные изменения структуры изделий наблюдаются после 900 °С с образованием жидкой фазы, о чем свидетельствует усадка образ-

Минеральный состав полевошпатоцеолитовой породы, по данным рентгенофазового анализа, представлен ортоклазом, клиноптиолитом, кварцем, монтмориллонитом и железистыми соединениями. При этом содержание основных минералов породы следующее, %: ортоклаза — 38–44, цеолита — 14–18, кварца — 22–26, монтмориллонита — 6–10, гидроксидов железа — 5–7, кальцита — 3–5.

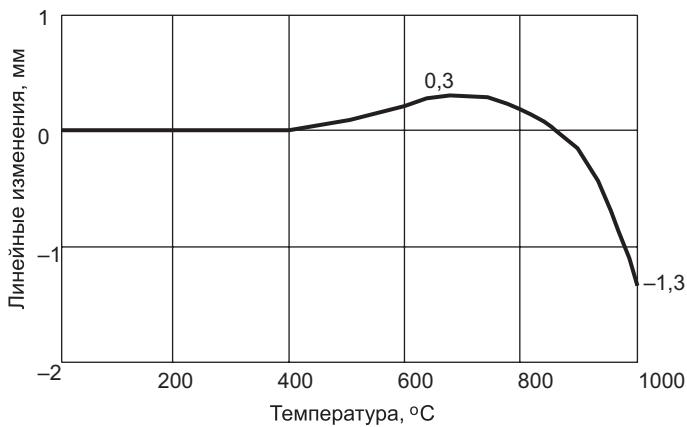


Рис. 1. Изменение линейных размеров образцов

цов согласно дилатометрической кривой (рис. 1). Как видно из рис. 2, *a*, где приведена структура образцов, обожженных при 900 °C, аморфизованные цеолитовые и глинистые частицы соединены точечно. Между твердыми частицами четко видны сквозные щелевые пустоты размерами 150–400 мкм, светло-серая стеклофаза (белые участки). По данным ртутной порометрии, объем внутренней пористости образцов уменьшается до 22–24 %.

С дальнейшим увеличением температуры до 1000 °C (рис. 2, *б*) усиливается накопление жидкой фазы, которая, заполняя межзерновые пустоты, начинает склеивать твердые частицы ортоклаза, кварца, аморфизованных и разложившихся остатков цеолитовых и глинистых минералов. Границы многих твердых частиц оплавлены при взаимодействии с жидкой фазой. Размеры пустот уменьшены до 250 мкм, объем внутренних пустот равен 16–18 %.

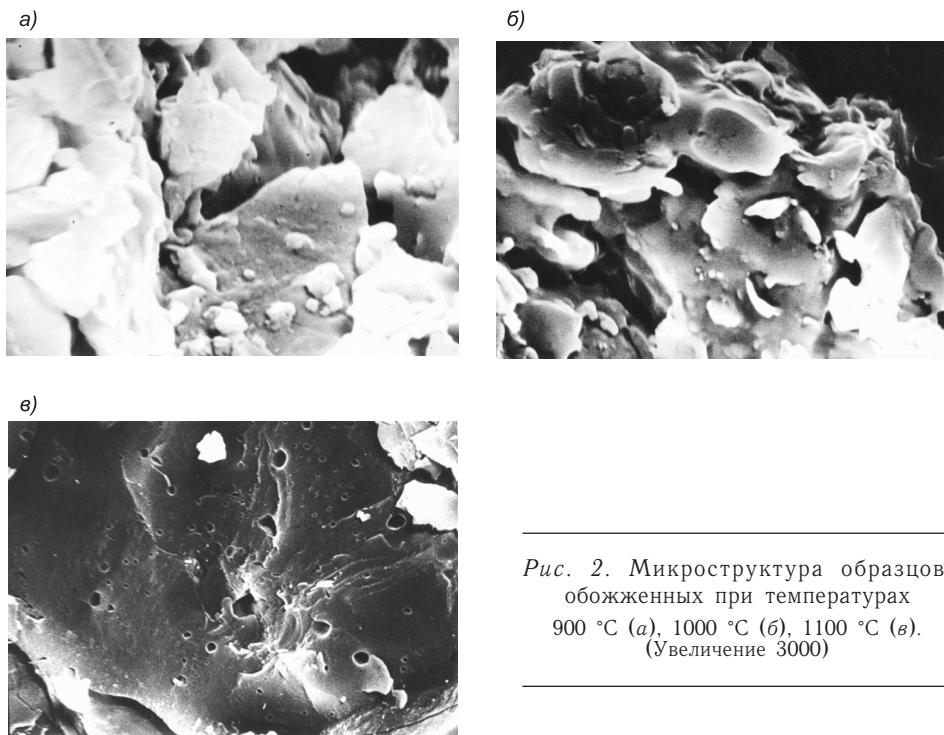


Рис. 2. Микроструктура образцов, обожженных при температурах 900 °C (*а*), 1000 °C (*б*), 1100 °C (*в*).  
(Увеличение 3000)

Структура керамического черепка, обожженного при 1100 °С (рис. 2, в), отличается значительным уплотнением материала из-за существенного накопления жидкой фазы, которая заполняет внутренние пустоты между твердыми частицами, образуя единый монолитный материал. Поры закрыты, имеют диаметр от 14 до 60 мкм. Наличие мелких и крупных пор связано с тем, что расплав, заполняя межзерновые пустоты, захватывает газы, образующиеся в результате окислительно-восстановительных реакций между основными компонентами массы и газовой среды зоны обжига. Пористость уплотненного материала в пределах 7–8 %. На снимках электронной микроскопии в структуре уплотненного материала морфологически различить кристаллы ортоклаза, кварца, морденита, остатки глинистых частиц и гематита, которые соединены стеклофазой, затруднительно. На снимке наблюдаются структурные элементы, представленные кристаллами, агрегатами аморфизированных и распадавшихся цеолитовых и глинистых веществ сложного состава и значительным количеством стекловидной фазы (до 38 %).

Результаты исследований показывают, что формирование структуры керамического материала на основе чистой полевошпатоцеолитовой породы зависит от температуры обжига, что вызывает изменение фазового состава материала с образованием жидкого расплава, который играет главную роль в создании необходимой структуры. С увеличением температуры обжига до 1100 °С происходит уплотнение материала за счет заполнения пор жидким расплавом, объем пор и их размеры значительно уменьшаются.

Еще одним технологическим параметром, влияющим на формирование структуры черепка, является продолжительность изотермической выдержки при конечной температуре обжига. Выявлено, что с увеличением продолжительности изотермической выдержки от 0,5 до 1,5 ч существенно изменяются пористость и содержание жидкой фазы. Как показано в табл. 2, при температуре обжига 1100 °С, при продолжительности изотермической выдержки 0,5; 1,0; 1,5 ч, объем внутренней пористости образцов равен 16–18; 7–9 и 4–5 % соответственно. С увеличением времени изотермической выдержки повышается содержание жидкой фазы от 20 до 44 %. Установлено, что существенное накопление расплава и заполнение им межзерновых пустот наблюдается при времени изотермической выдержки в 1 ч, а увеличение продолжительности выдержки рабочей температуры до 1,5 ч не вызывает значительных изменений структуры и пористости материала.

Изменение структуры материала в зависимости от температуры обжига и продолжительности изотермической выдержки соответственно влияет на физико-механические свойства обожженных изделий.

Анализ эксплуатационных характеристик обожженных образцов (табл. 3) показывает, что для получения керамических обыкновенных стеновых материалов с определенной пористостью на основе чистых полевошпатоцеолитовых пород наиболее rational обжиг при температуре 1000 °С с изотермической выдержкой 1 ч. Керамические ст-

Продолжительность изотермической выдержки, ч	Объем внутренней пористости, %	Содержание жидкой массы, объемное, %
0,5	16–18	20
1,0	7–9	38
1,5	4–5	44

Таблица 3

## Свойства образцов после обжига

Продолжительность изотермической выдержки, ч	Температура обжига, °C	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Огневая усадка, %	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа
0,5	800	1,72	0,2	22,4	14,7
	900	1,74	0,8	19,7	18,6
	1000	1,77	1,9	18,1	24,2
	1050	1,80	3,7	11,3	31,9
	1100	1,97	18,4	4,8	49,2
1,0	800	1,73	0,4	20,9	16,5
	900	1,75	1,1	18,4	21,3
	1000	1,78	2,7	16,4	30,4
	1050	1,82	4,8	9,5	48,7
	1100	1,99	22,1	0,8	88,2
1,5	800	1,74	0,6	11,4	18,4
	900	1,76	1,1	17,5	25,3
	1000	1,79	3,1	13,7	34,7
	1050	1,84	5,9	6,2	51,6
	1100	Деформировались			

новые материалы, обожженные при таких режимах термической обработки, имеют водопоглощение 16,7 % (более 10 %) и механическую прочность при сжатии 30,4 МПа.

Для изготовления керамических облицовочных материалов наружной отделки с более плотным черепком (водопоглощение менее 8 %), на основе массы из той же породы, следует поднять температуру обжига до 1050 °C и увеличить продолжительность изотермической выдержки до 1,5 ч. Уменьшение времени выдержки до 1 ч с повышением температуры обжига до 1100 °C вызывает большую огневую усадку (до 22 %).

Следует отметить, что из керамической массы на основе чистой полевошпатоцеолитовой породы после обжига при 1100 °C с изотермической выдержкой 1 ч получен плотный черепок с водопоглощением 0,8 %. Ранее [3] установлено, что из местных глинистых пород Тувы монтмориллонитовой и гидрослюдистой основы, после обжига при 1100 °C, невозможно изготовить керамический материал с водопоглощением 1–2 %. Получение черепка с водопоглощением менее 1 % при температуре 1100 °C свидетельствует об удачном сочетании химико-минералогических составов исходной полевошпатоцеолитовой породы, что способствует образованию эвтектических расплавов с пониженной вязкостью при низких температурах. Как отмечено в работе [4], из цеолитсодержащих пород при значительном содержании щелочных оксидов возможно образование легкоплавкого расплава пониженной вязкости и формирование более прочного и плотного керамического черепка.

Изучение структуры образцов, обожженных при 1000 °C с изотермической выдержкой 1 ч, показало, что наряду с кристаллическими составляющими и стекловидной фазой, содержание которой 36–38 %, наблю-

дались крупные сообщающиеся поры объемом 28–32 %. При этом длина и ширина капилляров колеблются от 50 до 300 мкм. Диаметр мелких пор 10–30 мкм.

С повышением температуры до 1100 °С и выдержки до 1,5 ч происходит резкое уплотнение материала, количество и размер значитель но уменьшается, что обусловлено ростом количества и снижением вязкости стекловидной фазы, соответственно, наступает деформация образцов. Интенсивное спекание массы, содержащей значительное количество полевых шпатов и цеолитов, с увеличением изотермической выдержки при температурах 1050 и 1100 °С, объясняется, очевидно, активным участием ионов Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> в формировании стекловидной фазы и их вхождением в состав алюмосиликатных эвтектик.

Таким образом, наиболее важными факторами, влияющими на формирование структуры керамических стеновых материалов на основе чистой полевошпатоцеолитовой породы, являются параметры спекания масс — температура обжига и продолжительность изотермической выдержки. Кроме того, определяющее влияние на степень спекания и эксплуатационные свойства материалов оказывают количество и вязкость стекловидной фазы.

Промышленные испытания в научно-производственном центре Тувинского государственного университета, где проведена подготовка масс и формование кирпичей-сырцов, и на кирпичном заводе ООО «Жилье» (обжиг в кольцевой печи при температуре 1000–1020 °С) подтвердили обоснованность и правильность оптимальных температурно-временных параметров обжига разработанной керамической массы. Керамические кирпичи полусухого прессования имели водопоглощение 16–18 %, прочность при сжатии 13,4–15,8 МПа, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 530–2007.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко, Г.И. Цеолиты в строительных материалах [Текст] / Г.И. Овчаренко, В.Л. Свиридов, Л.К. Казанцева. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. — 320 с.
2. Августиник, А.И. Керамика [Текст] / А.И. Августиник. — Л. : Стройиздат, 1975. — 592 с.
3. Карапасал, Б.К. Использование глинистых пород Тывы для производства керамических изделий [Текст] / Б.К. Карапасал // Стройт. материалы. — 2003. — № 11. — С. 43–45.
4. Ашмарин, А.Г. Цеолитсодержащие глинистые породы как сырье для производства стеновых материалов [Текст] / А.Г. Ашмарин, А.С. Власов // Стройт. материалы. — 2005. — № 2. — С. 52–53.

*КАРА-САЛ Борис Комбуй-оолович, д-р техн. наук, доц.*

*Тувинский государственный университет*

*КУУЛАР Лодой Эртинеевич, инж.*

*Тувинский государственный университет*

*СЕРЕН Шораан Владимирович, ст. препод.*

*Тувинский государственный университет*

Получено 21.01.13

**Cara-sal Boris Kombuy-oолович**, doctor of technical sciences, assistant professor, Tuva State University, Russia

**Kuular Lodoj Ertineevich**, engineer, Tuva State University, Russia

**Seren Shoraan Vladimirovich**, senior lecturer, Tuva State University, Russia

## **FORMATION OF THE STRUCTURE OF CERAMIC WALL MATERIAL BASED ON POLEVOSHPATOTSEOLIT ROCK**

The features of formation of ceramic wall materials on the basis of pure polevoshpatotseolit rock are revealed in the paper. These features depend on the baking temperature and duration of isothermal holding at the final temperature, as well as impact on the performance of the obtained products.

**Key words:** polevoshpatotseolit rock, mass, structure, baking, properties.

### **REFERENCES**

1. Ovcharenko, G.I. Tseolits in building materials [Text] / G.I. Ovcharenko, V.L. Sviridov, L.K. Kasantseva. — Barnaul : Altai STU Publ., 2000. — 320 p.
  2. Avgustinik, A.I. Ceramics [Text] / A.I. Avgustinik. — L. : Stroyizdat, 1975. — 592 p.
  3. Cara-sal, B.K. The use of argillaceous rocks of Tuva for ceramic production [Text] / B.K. Cara-sal // Building materials. — 2003. — N 11. — P. 43–45.
  4. Ashmarin, A.G. Argillaceous rocks containing tseolit as raw material for wall material production [Text] / A.G. Ashmarin, A.S. Vlasov // Building materials. — 2005. — N 2. — P. 52–53.
-

УДК 691.42:666.31

А.Ю. СТОЛБОУШКИН, О.А. СТОЛБОУШКИНА, А.И. ИВАНОВ,  
В.А. СЫРОМЯСОВ, М.Л. ПЛЯС

## СТЕНОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛИСТЫХ АРГИЛЛИТОВ

Установлена зависимость влияния основных технологических параметров грануляции на формирование рационального состава гранул, обеспечивающего получение бездефектного сырца полусухого прессования. Приведены результаты исследования матричной структуры керамического черепка на основе техногенного сырья. Проведены опытно-промышленные испытания технологии керамического кирпича из отходов обогащения углистых аргиллитов.

**Ключевые слова:** углистые аргиллиты, грануляция, матричная структура, керамический кирпич, опытно-промышленные испытания, строительные композиционные материалы.

Одним из перспективных направлений строительного материаловедения в XXI в. является создание и развитие композиционных строительных материалов нового поколения [1]. Формирование матричных пространственно-организованных структур зачастую служит необходимым условием достижения требуемых эксплуатационных характеристик керамических стеновых материалов на основе техногенного и низкокачественного природного сырья. Отходы добычи и обогащения угля — перспективное сырье для производства стеновой керамики [2]. Как правило, при угледобыче открытым способом на 1 т угля приходится 4 т вскрышных пород, складирование которых приводит к значительному загрязнению окружающей среды.

Цель настоящего исследования — разработка ресурсосберегающей технологии стеновых керамических материалов матричной структуры на основе углеотходов. В качестве техногенного сырья для производства керамического кирпича были выбраны отходы обогащения углистых аргиллитов Коркинского буроугольного разреза (Челябинская область). За время работы разреза в отвалах площадью 1160 га накоплено около 5 млрд т отходов, которые представлены в основном аргиллитами, алевролитами, углистыми аргиллитами и сланцами [3].

Углистые аргиллиты Коркинского месторождения представляют собой смесь минеральных веществ с угольной дисперсной массой, равномерно распределенной среди минерального вещества, содержание углерода может достигать 18 %. По химическому составу углеотходы относятся к группе полукислого сырья ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 16–20 %), с высоким содержанием красящих оксидов ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  — 7–8 %) (табл. 1). Содержание свободного кварца составляет 50–53 %.

Исследование фазового состава рентгеновской порошковой дифрактометрией (дифрактометр Shimadzu XRD-6000) показало, что минераль-

© Столбоушкин А.Ю., Столбоушкина О.А., Иванов А.И., Сыромясов В.А.,  
Пляс М.Л., 2013

Таблица 1

## Химический состав сырьевых материалов

Сырье	Содержание оксидов, % на сухое вещество								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
Отходы обогащения углистых аргиллитов Коркинского месторождения	42,85	1,03	16,90	9,97	0,20	2,80	3,35	2,15	19,2
Суглинок новокузнецкий	59,9	0,9	14,2	4,9	0,2	2,4	4,4	3,8	5,4

ный состав аргиллита представлен кварцем, каолинитом, сидеритом, мусковитом, присутствуют доломит, гематит и полевой шпат (рис. 1, табл. 2). Наличие каолинита определено по линиям с  $d/n$  0,720; 0,448; 0,256 нм, кварца —  $d/n$  0,425; 0,334; 0,181, мусковита —  $d/n$  0,499; 0,319; 0,150 нм. По характерному гало на дифракционной картине установлено рентгеноаморфное вещество в отходах (бурый уголь).

Данные рентгенофазового анализа подтверждают результаты термического анализа (дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрия, дериваторграф Setaram LabSys Evo) (рис. 2). При нагревании аргиллитов наблюдается эндоэффект при температуре 69,1 °C, связанный с выделением адсорбционной влаги из углистых пород. На дифференциальной термической кривой нагрева можно выделить два экзоэффекта деструкции (331,8 °C) и окисления (477,5 °C) органического вещества, потеря массы при этом составляет 11,87 %. Присутствие каолинита подтверждается характерным пиком — 556,2 °C, связанным с протеканием эндотермической реакции дегидратации глинистого минерала. Диссоциация карбонатов кальция и магния происходит при температуре

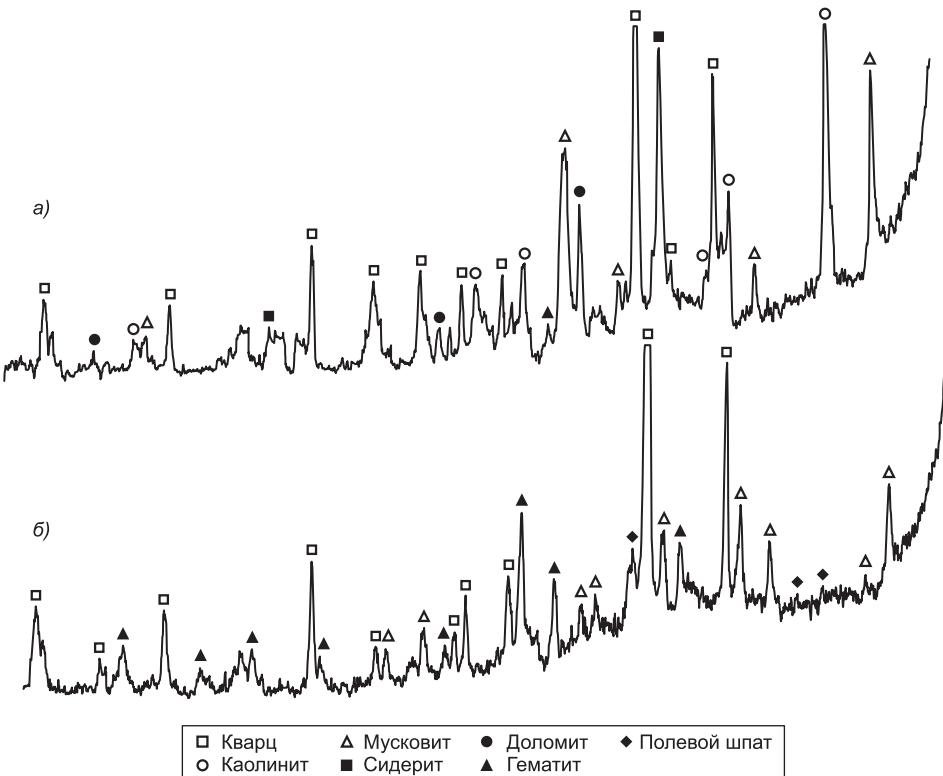


Рис. 1. Рентгенограммы аргиллита исходного (а) и прокаленного при температуре 850 °C (б)

Таблица 2

**Расшифровка минералов керамических образцов на основе обогащения углистых аргиллитов**

$d/n$ , нм	Минерал	$d/n$ , нм	Минерал	$d/n$ , нм	Минерал
Исходный аргиллит					
1,000	Мусковит	0,289	Доломит	0,197	Кварц
0,720	Каолинит	0,280	Мусковит	0,181	Кварц
0,499	Мусковит	0,270	Гематит	0,178	Доломит
0,448	Каолинит	0,256	Каолинит	0,172	Сидерит
0,425	Кварц	0,245	Кварц	0,154	Кварц
0,384	Кварц	0,234	Каолинит	0,150	Мусковит
0,358	Сидерит	0,228	Кварц	0,148	Каолинит
0,334	Кварц	0,219	Доломит	0,143	Доломит
0,319	Мусковит	0,212	Кварц	0,137	Кварц
Аргиллит, прокаленный при температуре 850 °C					
1,000	Мусковит	0,323	Полевой шпат	0,201	Мусковит
0,840	Мусковит	0,295	Мусковит	0,197	Кварц
0,643	Полевой шпат	0,285	Мусковит	0,183	Гематит
0,566	Полевой шпат	0,269	Гематит	0,181	Кварц
0,501	Мусковит	0,252	Гематит	0,169	Гематит
0,448	Мусковит	0,245	Кварц	0,159	Гематит
0,425	Кварц	0,228	Кварц	0,153	Кварц
0,367	Гематит	0,223	Кварц	0,148	Гематит
0,351	Мусковит	0,220	Гематит	0,145	Кварц
0,334	Кварц	0,212	Мусковит	0,137	Кварц

780,1 °C с потерей 3,43 % массы. Общие потери массы после нагрева отходов до 1000 °C составили 22,64 %.

В работе использовались углистые аргиллиты класса 13–40 мм. После грубого дробления в щековой дробилке проводилась их механоактивация путем измельчения в лабораторных бегунах в течение 1 ч. Грануло-

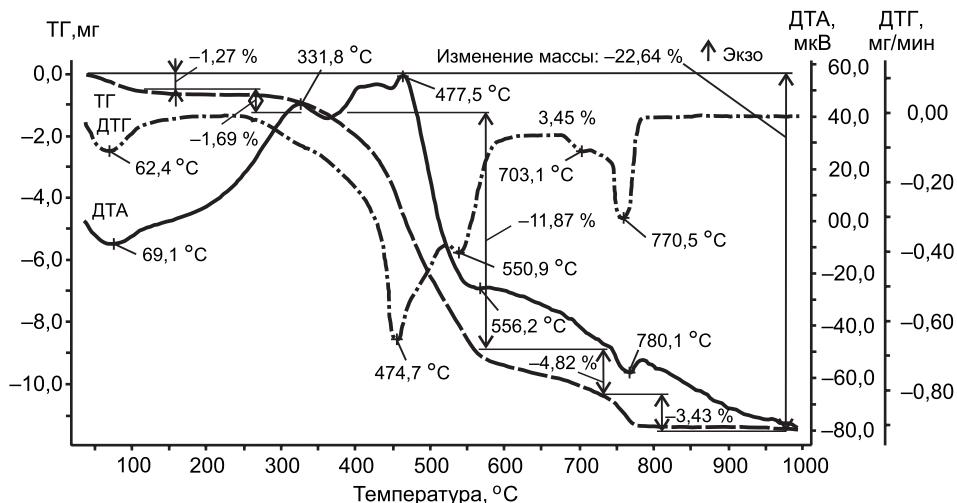


Рис. 2. Термограмма отходов обогащения углистых аргиллитов

T — температура нагрева образца; ДТА — дифференциально-термическая кривая; ТГ — изменение массы; ДТГ — скорость изменения массы

метрический состав отходов после тонкого измельчения определялся на лазерном гранулометре марки Mastersizer 2000. По результатам анализа содержание фракций составило, мас. %: менее 0,005 мм — 28, 0,05–0,005 мм — 50, 1–0,05 мм — 22. По пластичности измельченные аргиллиты относятся к малопластичным материалам (число пластичности  $\approx 6,0$ ); по сушильным свойствам — малочувствительные к сушке (коэффициент чувствительности к сушке  $< 1$ ); по степени спекаемости — к неспекающемуся сырью.

В качестве корректирующих добавок при составлении керамической шихты вводились умеренно-пластичный (число пластичности 11,5) новокузнецкий суглинок и стеклобой. Суглинок новокузнецкий по минеральному составу принадлежит к глинистому сырью гидрослюдисто-монтмориллонитового типа, с низким содержанием крупнозернистых включений.

Предварительные исследования показали, что керамические образцы на основе отходов обогащения углистых аргиллитов, отпрессованные из порошков, приготовленных по «классической» сушильно-помольной технологии для полусухого прессования кирпича, имеют характерные трещины расслаивания.

На первом этапе для устранения отмеченных недостатков были проведены исследования в лабораторных условиях. Керамический пресс-порошок готовился запатентованным способом [4]. Массоподготовка включала сушку исходного сырья до остаточной влажности 2–3 % и механоактивацию путем измельчения на бегунах до прохождения через сито 0,63. Стеклобой измельчался в шаровой мельнице до удельной поверхности 3000–3500 см<sup>2</sup>/г.

Из высушенного и измельченного сырья на турболопастном смесителе-грануляторе периодического действия марки ТЛ-020 К01 были приготовлены гранулированные пресс-порошки следующего вещественного состава, мас. %:

Отходы обогащения углистых аргиллитов	65
Суглинок новокузнецкий	25
Стеклобой	10

Грануляция проводилась при различном увлажнении порошка: 8,2; 9,9 и 13,8 % по массе. Вода подавалась капельным распылением на лопасти гранулятора при различных скоростях вращения в интервале от 400 до 1800 об/мин. Внешний вид гранулята при скорости вращения 1600 об/мин и номограмма рассева приведены на рис. 3.

Экспериментальным путем определены оптимальные параметры грануляции для исследуемого материала: скорость вращения лопастей гранулятора — 1600 об/мин; влажность гранулята — 9–10 %; продолжительность грануляции — 3–5 мин. Формование образцов-цилиндров диаметром 50 мм и высотой 45–50 мм при давлении 20 МПа и влажности гранулированной шихты 8–10 %, обычных для технологии полусухого прессования стеновой керамики, показало, что предварительная механоактивация и грануляция тонкомолотых отходов с последующим их опудриванием обеспечивают бездефектное прессование сырца.

Обжиг отпрессованных керамических образцов на основе отходов обогащения углистых аргиллитов проводился с изотермической выдержкой в течение 1,5 ч при температуре 900–1100 °С. Результаты физико-механических испытаний образцов приведены в табл. 3. При температуре 1100 °С происходит оплавление и вслучивание образцов, поэтому макси-

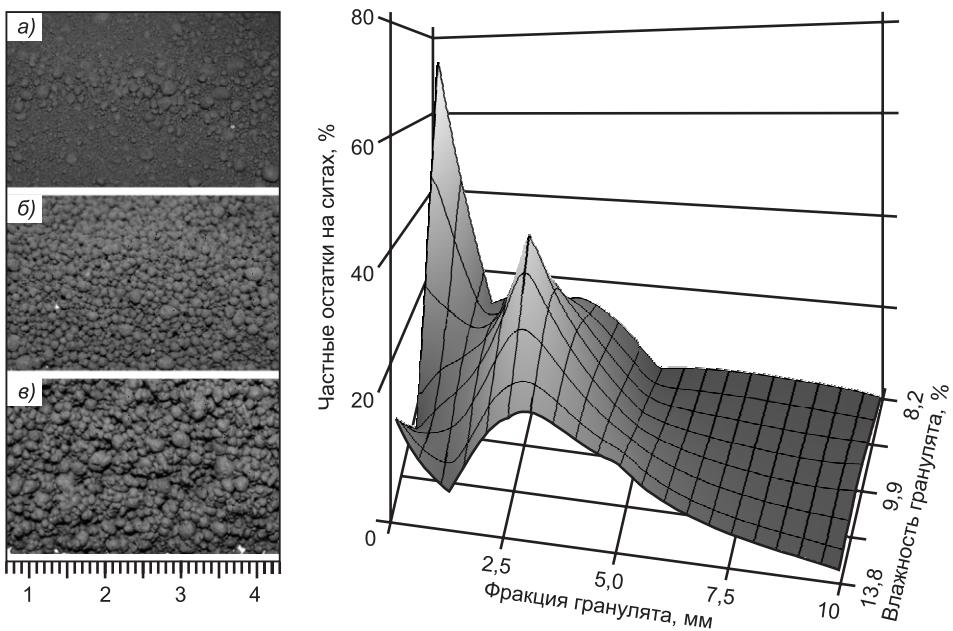


Рис. 3. Внешний вид и распределение фракций гранулята на основе отходов обогащения углистых аргиллитов при скорости вращения лопастей гранулятора 1600 об/мин и влажности 8,2 % (а); 9,9 % (б); 13,8 % (в)

Таблица 3

**Влияние температуры обжига на физико-механические свойства керамических образцов**

Показатель	Температура обжига, °С			
	900	950	1000	1050
Прочность при сжатии, МПа	18,7	21,6	24,7	25,6
Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	1770	1780	1770	1750
Коэффициент конструктивного качества	10,6	12,1	14,0	14,6
Водопоглощение, %	15,3	15,1	14,8	14,5

Примечание. При температуре 1100 °С произошло оплавление и вспучивание образцов.

мальная температура обжига керамических изделий не должна превышать 1050 °С, а ее оптимальный интервал составляет 1000–1030 °С.

Грануляция и опудривание при приготовлении пресс-порошка, наряду с рациональной гранулометрией и бездефектной формовкой образцов, обеспечили после обжига формирование керамического матричного композита на основе отходов обогащения углистых аргиллитов.

На рис. 4 приведены петрографические исследования структуры керамических образцов из углеотходов. Керамический черепок на макроуровне имеет выраженную ячеисто заполненную структуру (рис. 4, а). Ячейки каркаса размерами 1–3 мм, сформированные из гранулированных отходов, заполнены мелкозернистым материалом. Границы между гранулами более аморфизован, имеет толщину 80–150 мкм и выделяется бурой окраской. После обжига материал имеет характерные границы раздела фаз по поверхности контакта гранул (рис. 4, б) и может быть отнесен к классу керамических матричных композитов.

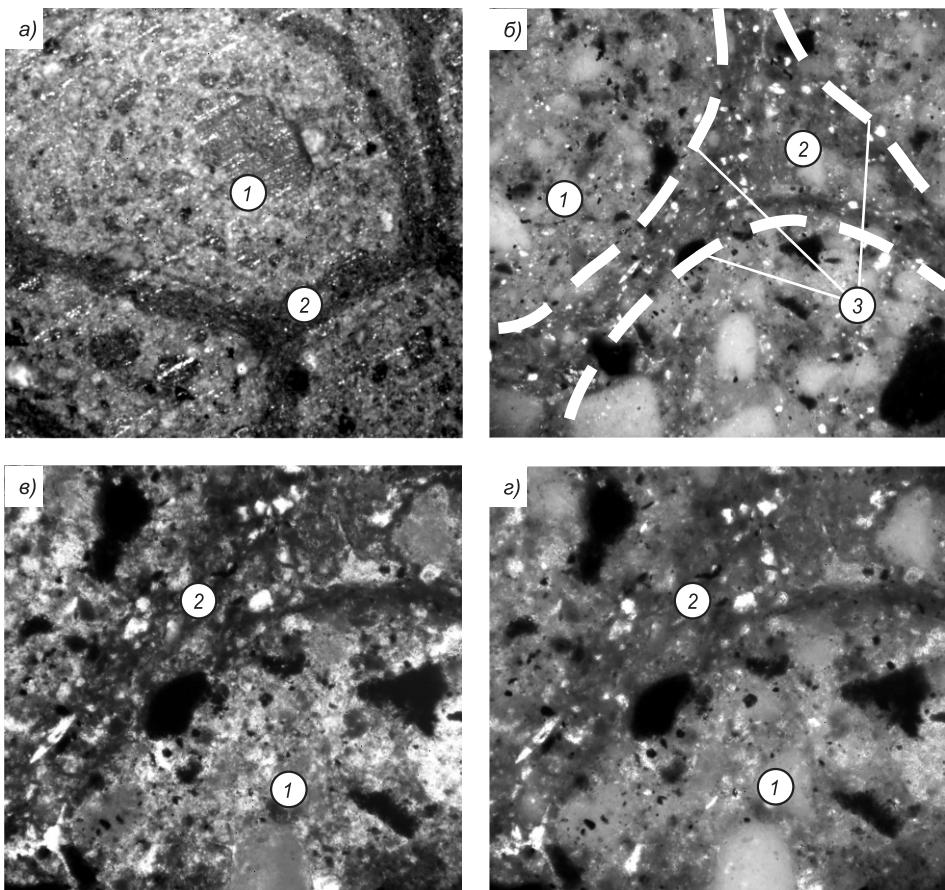


Рис. 4. Петрография керамических образцов на основе углистых аргиллитов  
а — николи  $\times$ , 50 $\times$ ; б — николи  $\times$ , 100 $\times$ ; в — николи II, 150 $\times$ ; г — николи  $\times$ , 150 $\times$   
1 — тело гранулы, 2 — граничный слой, 3 — условная граница раздела фаз

В гранулах и на границе композита присутствуют непрозрачные обособления бурого и темного цвета, отчетливо видимые при параллельных и скрещенных николях (рис. 4, в, г). Аллотриоморфные минеральные новообразования не имеют выраженной огранки, более плотные и не прозрачны в проходящем свете. Очевидно, они имеют железистую природу и представляют собой разновидности гематита или ферритов кальция переменного состава. Помимо новых минеральных фаз в значительном количестве присутствуют реликтовые минералы кварца и полевых шпатов. Особенно отчетливо в скрещенных николях выражены оплавленные частицы кварца угловатой формы размерами от 30 до 250 мкм (см. рис. 4, б), претерпевшего полиморфные превращения в процессе обжига.

Наблюдаемое под микроскопом явное отсутствие четких ограничений полиминеральных фаз в стеклофазе, сформировавшейся из расплава и частично кристаллизовавшейся после охлаждения, свидетельствует о протекании процессов твердо- и жидкокристаллического спекания в материале. Стеклофаза является цементирующим веществом, заполняющим межзерновые пустоты и частично макропоры. Таким образом, на макро- и микроравнениях обеспечиваются структурное единство и повышение прочностных показателей материала.

На втором этапе результаты экспериментальных исследований были апробированы в заводских условиях. Опытно-промышленные испытания

проводились в две стадии. Вначале готовились сухие тонкодисперсные порошки следующего состава, мас. %:

Отходы обогащения углистых аргиллитов	60–70
Суглинок новокузнецкий	20–25
Стеклобой	5–10
Отходы газоочистки рукавных фильтров	0–5

Сухой помол новокузнецкого суглинка и отходов осуществлялся на установке УСП-С-04.55 научно-производственного предприятия ООО «Баскей» (г. Новосибирск), промышленная партия стеклобоя нарабатывалась в лабораторных условиях. На турболопастном смесителе-грануляторе периодического действия марки ТЛ-100 конструкции ООО «Дзержинсктехномаш» были приготовлены опытно-промышленные партии гранулированных пресс-порошков.

Технология получения пресс-порошков из опудренных гранул состояла в следующем. Основное по составу техногенное сырье — отходы обогащения углистых аргиллитов — смешивалось со стеклобоем и частью новокузнецкого суглинка и гранулировалось при увлажнении до формовочной влажности 9,5–10 %. Гранулы размером 1–3 мм опудривались оставшейся частью новокузнецкого суглинка (15 мас. %). Для улучшения декоративных свойств изделий в качестве окрашивающей добавки вводилась пыль рукавных фильтров газоочистки от дуговых электросталеплавильных печей (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк), состоящая преимущественно из гематита. Перед опудриванием гранулята суглинок в сухом состоянии смешивался с отходами газоочистки.

Готовый гранулированный пресс-порошок был упакован в биг-бэги с полиэтиленовыми вкладышами для сохранения влажности и отправлен на кирпичный завод полусухого прессования ООО «Красный кирпич» (г. Шарыпово, Красноярский край) для формования и обжига керамического кирпича.

Формовка кирпича осуществлялась на прессах СМ-1085Б. Влажность гранулированного пресс-порошка составляла 9,9 %. Прессование

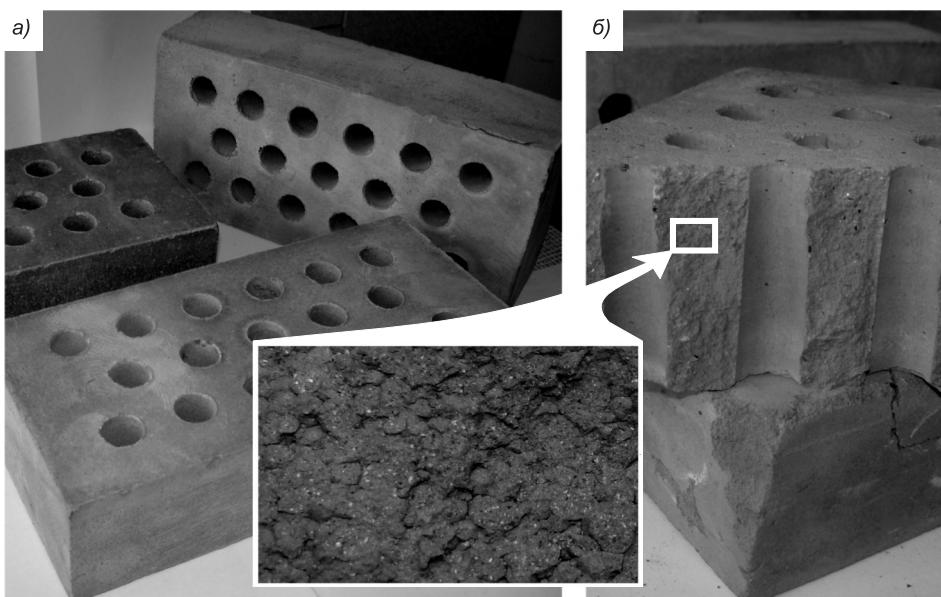


Рис. 5. Пустотелый керамический кирпич формата 1 НФ на основе гранулированных отходов обогащения углистых аргиллитов (а) и макроструктура черепка после физико-механических испытаний (б)

Таблица 4

**Физико-механические свойства керамического кирпича**

№ кирпича для испытания	Предел прочности, МПа		Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Морозостойкость, цикл.
	при сжатии	при изгибе			
1	12,6	3,8	1,576	16,3	25
2	12,4	2,9	1,549	17,0	25
3	11,8	3,1	1,533	18,4	25
4	12,0	2,6	1,550	18,2	25
5	11,8	2,8	1,535	16,5	25
Среднее	12,12	3,04	1,549	17,28	25

велось при показаниях амперметра 78–80 А, соответствующих удельному давлению 17–18 МПа. Отпрессованные кирпичи в количестве 800 шт. имели нормальный внешний вид без трещин расслаивания и перепрессовки. Сушка и обжиг кирпича проводились в туннельной печи в течение 72 ч по обычному режиму, установленному на заводе в соответствии с технологическим регламентом.

Общая выбраковка изделий на всех технологических переделах составила не более 1,5 %. Обожженные кирпичи имели фиолетово-коричневый цвет (рис. 5). На керамических кирпичах обжиговых трещин, вздутий и искривлений не наблюдалось. Из обожженных изделий были отобраны кирпичи для физико-механических испытаний.

Результаты заводских испытаний (табл. 4) показали, что полученный керамический кирпич на основе техногенных отходов имеет четкие грани, геометрические размеры и соответствует ГОСТ 530–2007 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия». Изделия отвечают требованиям для кирпича пустотелого, рядового, одинарного, размера 1НФ; марка по прочности изделий — М100; класс средней плотности — 2,0; марка по морозостойкости — F25.

Условием выпуска качественного керамического кирпича полусухого прессования из данного вида техногенных отходов являются тонкий помол сырьевых материалов сухим способом и использование в технологии массоподготовки агломерационных процессов (агрегирование и грануляция). Рациональный гранулометрический состав гранулированных шихт обеспечивает получение равноплотных прессовок и, в конечном итоге, формирование бездефектной структуры кирпича-сырца.

В результате лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний в заводских условиях получен керамический кирпич из отходов обогащения углистых аргиллитов, отвечающий требованиям ГОСТ 530–2007. Разработанная технология стеновых керамических материалов матричной структуры позволит использовать многотоннажные отходы угледобычи для производства кирпича с заданными свойствами.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- Чернышов, Е.М. К проблеме развития исследований и разработок в области материаловедения и высоких строительных технологий : основные акценты [Текст] / Е.М. Чернышов // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии : Материалы XV Академических чтений РААСН — Междунар. науч.-техн. конф. / КазГАСУ. — Казань, 2010. — Т. 1. — С. 8–9.
- Ашмарин, Г.Д. Энерго- и ресурсосберегающая технология керамических стеновых материалов [Текст] / Г.Д. Ашмарин, В.В. Курносов, В.Г. Ласточкин // Стройматериалы. — 2010. — № 4. — С. 24–27.

3. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году : гос. докл. [Текст] / Российская Федерация. М-во природ. ресурсов и экологии. — М., 2010.
4. Пат. 2005702 Россия, С1 C 04 B 33/00. Способ изготовления керамических изделий [Текст] / Г.И. Стороженко, А.Ю. Столбoushkin, Г.В. Болдырев и др. — Опубл. 15.01.1994, Бюл. № 1.

*СТОЛБОУШКИН Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доц.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

*СТОЛБОУШКИНА Оксана Андреевна, канд. техн. наук, ст. препод.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

*ИВАНОВ Александр Иванович, ассист.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

*СЫРОМЯСОВ Вадим Александрович, студ.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

*ПЛЯС Марк Леонидович, студ.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

Получено после доработки 29.01.13

**Stolboushkin Andrey Yurievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

**Stolboushkina Oksana Andreevna**, candidate of technical sciences, senior lecturer, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

**Ivanov Alexander Ivanovich**, assistant, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

**Syromyasov Vadim Alexandrovich**, student, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

**Plyas Mark Leonidovich**, student, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

## **WALL CERAMIC MATERIALS OF MATRIX STRUCTURE FROM CLEANING REJECTS OF COALY ARGILLITES**

The dependence of the effect of main granulation technological parameters on the formation of rational granule composition, which allows to obtain a defect-free semidry pressed adobe, are determined. The study results of ceramic crock matrix structure from technogenic raw materials are presented. Experimental-industrial tests of technology of the ceramic bricks from cleaning rejects of coaly argillites are carried out.

**Key words:** coaly argillites, granulation, matrix structure, ceramic brick, experimental-industrial tests, building composite materials.

### REFERENCES

1. Chernyshov, E.M. To the problem of research and developments in the field of material science and high building technology: the main accents [Text] / E.M. Chernyshov // Achievements and problems of materials technology and modernization of the building industry: Materials of XV Academic Readings RAABS — International scientific and technical conference / KSUAE. — Kazan, 2010. — Vol. 1. — P. 8–9.
2. Ashmarin, G.D. Energy and resource saving technology of ceramic wall materials [Text] / G.D. Ashmarin, V.V. Kurnosov, V.G. Lastochkin // Building materials. — 2010. — N 4. — P. 24–27.
3. On the State and Environmental Protection of the Russian Federation in 2009 : State report [Text] / The Russian Federation. Ministry of Natural Resources and Ecology. — M., 2010.
4. Patent 2005702. Russian, С1 C 04 B 33/00. The manufacturing method of ceramic products [Text] / G.I. Storozhenko, A.Yu. Stolboushkin, G.V. Boldyrev et al. — Publ. 15.01.1994, Bull. N 1.

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.878.23 : 62-52

Ю.В. АВДЕЕВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ

## К ВОПРОСУ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ГРУНТА, РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ОТВАЛОМ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

Рассмотрены способы построения высокочастотного радиоволнового датчика объема грунта для систем автоматического управления отвалом землеройно-транспортной машины, использующих в качестве одного из информационных параметров непрерывно измеряемое текущее значение объема грунта перемещаемого рабочим органом.

Ключевые слова: землеройно-транспортные машины, разработка грунта, измерение объема, системы автоматического управления.

Значительное повышение эффективности использования землеройно-транспортных машин (ЗТМ) и улучшение условий труда оператора возможны в результате применения систем автоматического управления (САУ). У ЗТМ непрерывного действия транспортирование грунта осуществляется одновременно с его вырезанием (эти процессы неразрывны), поэтому автоматическое управление не может с достаточной точностью осуществляться только по грунту, вырезаемому в плотном теле (массиве), так как кроме силы сопротивления резанию грунта на косопоставленный отвал достаточно значимо действуют силы сопротивления, связанные с перемещением грунта и скольжением грунта по отвалу<sup>1</sup>, которые также будут приводить к увеличению нагрузки и, как следствие, изменению действительной скорости движения машины. Тем более, что при многих технологических процессах на отвал поступает не только грунт, вырезанный при данном проходе, но и грунт, отведенный в сторону в результате предыдущего прохода. Отсутствие учета такого количества грунта, перемещаемого косопоставленным отвалом, для эффективного автоматического управления рабочим органом является недопустимым. Описание процесса копания как двух отдельных стадий (начала — вырезания грунта и завершения копания — транспортирования грунта) для косопоставленного отвала может быть применено скорее к отдельной частице, а не ко всему объему грунта перед отвалом, и то при чисто теоретическом рассмотрении вне связи с практической реализацией САУ.

Кроме того, определение, например, производительности только по грунту, вырезанному в массиве, предполагает использование текущего значения площади поперечного сечения стружки грунта, вычисляемой

<sup>1</sup> Волков Д.П., Крикун В.Я., Тотолин П.Е. и др. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

через ширину резания и толщину срезаемой стружки. Однако в реальном процессе форма поверхности грунта перед рабочим органом не является ровной и непрерывно меняется как в продольном (относительно движения машины), так и в поперечном (вдоль поверхности отвала) направлении, т.е. площадь поперечного сечения вырезаемой в массиве грунта стружки в каждый момент времени имеет собственное численное значение. Известные способы измерения не позволяют оперативно учитывать неровности поверхности грунта перед рабочим органом по всей ширине полосы разработки.

Для повышения эффективности ЗТМ необходимо организовывать управление по параметрам, характеризующим прямые показатели эффективности, отражающие реально выполняемую работу, что возможно с помощью САУ, использующих в качестве одного из информационных сигналов измеряемый текущий объем грунта, перемещаемого рабочим органом.

Варианты САУ, базирующиеся на управлении по параметрам, характеризующим прямые показатели эффективности, были представлены во многих работах<sup>2,3,4</sup>, защищены авторскими правами [1–3], показали работоспособность и высокую эффективность применения<sup>5</sup>. Следует отметить, что прямые показатели эффективности по сути своей отражают выполняемую работу, а разработанные САУ используют управление не по абсолютным значениям, а по непрерывному сравнению предыдущего и текущего значений, характеризующих параметр эффективности.

Текущий объем грунта может измеряться одним из известных [4] вариантов радиоволнового высокочастотного датчика:

- 1) оценка объема грунта интерференционным измерителем;
- 2) частотный способ измерения устройством с передающей и приемной частью;
- 3) метод, базирующийся на измерении сдвига фаз;
- 4) измерение с использованием простого сверхрегенеративного детектора-преобразователя.

Все четыре указанных варианта реализации показали свою работоспособность в реальных полевых условиях, однако задача совершенствования этих датчиков с целью повышения точности измерений остается открытой. Наиболее современными из перечисленных являются датчик, базирующийся на измерении сдвига фаз, и устройство с использованием простого сверхрегенеративного детектора-преобразователя. К сожалению, даже они не лишены некоторых недостатков. Так, относительная сложность точных преобразований фазовых измерений в аналоговый и цифровой сигналы несколько затрудняет применение приведенного в [4] варианта устройства, основанного на измерении сдвига фаз между током и напряжением.

<sup>2</sup> Никулин П.И., Тепляков И.М., Енин В.И., Кононов А.А. Повышение эффективности процесса копания грунта колесными землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 6. С. 105–107.

<sup>3</sup> Устинов Ю.Ф., Жулай В.А., Кононов А.А. Повышение эффективности планировки грунта основным отвалом автогрейдера // Механизация строительства. 2009. № 8. С. 12–14.

<sup>4</sup> Устинов Ю.Ф., Кононов А.Д., Кононов А.А., Иванов С.А. Повышение эффективности процесса разработки грунта косопоставленным отвалом землеройно-транспортной машины // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 1. С. 69–72.

<sup>5</sup> Никулин П.И., Тепляков И.М., Жулай В.А., Кононов А.А. Сравнительные испытания работы автогрейдера ДЗ-199 при ручном и автоматическом управлении отвалом // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 11. С. 91–93.



Рис. 1. Измеритель объема с использованием простого сверххреженеративного детектора-преобразователя

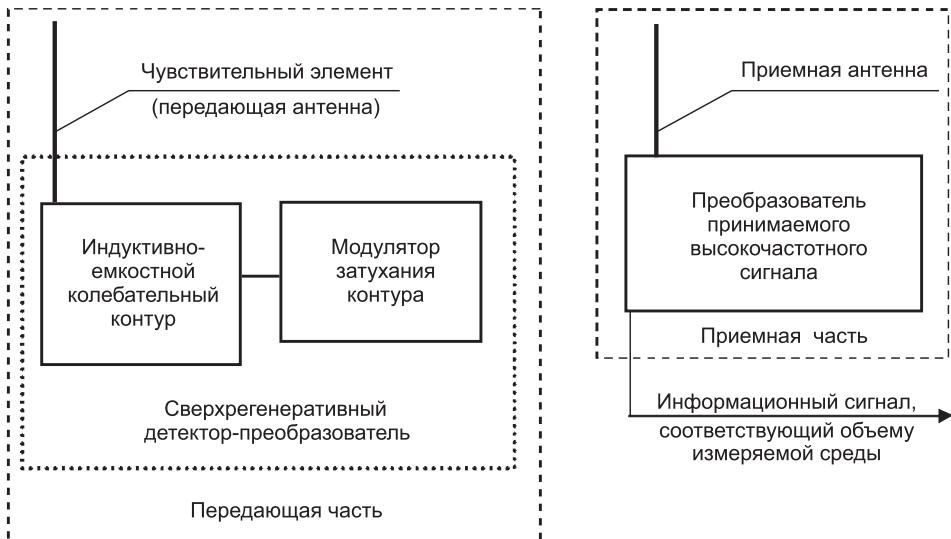
Структурная схема измерителя объема с использованием простого сверххреженеративного детектора-преобразователя представлена на рис. 1. Датчик состоит из сверххреженеративного детектора-преобразователя, к колебательному контуру которого подключен чувствительный элемент в виде антенны, представляющей собой электрический линейный излучатель.

Устройство работает следующим образом. До заполнения зоны действия датчика измеряемой средой частота автосуперизаций устанавливается соответствующей некоторому начальному значению по сопротивлению антенны. При изменении измеряемого текущего объема изменяется активная составляющая сопротивления антенны, что ведет к изменению частоты автосуперизаций сверххреженеративного детектора-преобразователя. Изменение частоты напрямую зависит от изменения измеряемого объема грунта. Последовательность импульсов с переменной частотой может подаваться в качестве информационного сигнала на вход устройства управления или (в упрощенном варианте) на вход частотомера для визуального наблюдения за измеряемым значением объема грунта.

В качестве недостатка известного [4] простого сверххреженеративного измерителя объема можно указать то, что изменение электрических параметров антенны при определенных условиях может вызвать некоторую неустойчивость в работе, которая приведет к случайному отклонению частоты колебаний, что может отрицательно сказаться на точности измерений.

С целью повышения точности бесконтактного непрерывного измерения объема грунта радиоволновым методом, с исключением возможности снижения точности измерений из-за случайных отклонений частоты колебаний при возможной неустойчивости в работе, которую может вызвать изменение электрических параметров антенны, ниже предлагается вариант построения датчика (рис. 2), состоящего из передающей части, содержащей чувствительный элемент в виде передающей антенны и сверххреженеративный детектор-преобразователь, составными частями которого являются индуктивно-емкостной колебательный контур и модулятор затухания контура, и приемной части, включающей в себя приемную антенну и преобразователь принимаемого высокочастотного сигнала, соответствующий текущему объему измеряемой среды.

Устройство работает следующим образом. До заполнения зоны действия измерителя объема измеряемой средой активное сопротивление чувствительного элемента (передающей антенны) соответствует некоторому начальному значению по сопротивлению антенны. Частота колебаний выбирается соответствующей оптимальной длине волны для конкретной высоты подвеса, что дает возможность расширять зону чувстви-



*Rис. 2. Сверхрегенеративный измеритель объема*

тельности и проводить измерения объема. При появлении (а далее — изменении объема) измеряемой среды в зоне действия датчика происходит непрерывное изменение активной составляющей сопротивления антенны, приводящее к изменению затухания контура. Последнее влияет на длительность вспышек на индуктивно-емкостном колебательном контуре, и соответственно, длительность импульсов сигнала, который передается дистанционно с передающей антенны, подключенной к колебательному контуру, входящему наряду с модулятором затуханий контура в состав сверхрегенеративного детектора-преобразователя передающей части, на приемную антенну, содержащуюся в приемной части, откуда поступает на вход преобразователя принимаемого высокочастотного сигнала, с выхода которого после преобразования в нем (определения длительности импульсов) получают сигнал, где информативной является длительность импульсов, следующих непрерывной последовательностью. По длительности импульсов судят об объеме измеряемой среды. Полученный таким образом непрерывный сигнал может подаваться в качестве информационного параметра на вход устройства управления технологическими процессами, или, в упрощенном варианте, на вход прибора для визуального наблюдения за непрерывно измеряемым объемом.

Исследования имеют практическое значение и могут быть полезны специалистам, работающим в области автоматизации ЗТМ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2327011 РФ. Система автоматического управления рабочим органом автогрейдера [Текст] / Ю.Ф. Устинов, В.А. Жулай, А.А. Кононов. — Опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17.
2. Пат. 2291254 РФ. Система автоматического управления рабочим органом землеройно-транспортной машины [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.Д. Кононов, А.А. Кононов. — Опубл. 10.01.2007, Бюл. № 1.
3. Пат. 2327010 РФ. Система автоматического управления рабочим органом землеройно-транспортной машины в процессе копания грунта [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.А. Кононов. — Опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17.
4. Устинов, Ю.Ф. Измерение текущего объема грунта, разрабатываемого отвалом землеройно-транспортной машины [Текст] / Ю.Ф. Устинов, В.А. Жулай, Ю.В. Авдеев, А.А. Кононов // Механизация строительства. — 2008. — № 12. — С. 5–6.

*АВДЕЕВ Юрий Валентинович, канд. техн. наук, доц.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*КОНОНОВ Александр Давыдович, канд. физ.- мат. наук, доц.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*КОНОНОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 18.01.13

**Avdeev Yuriy Valentinovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Aleksandr Davydovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Andrey Alexandrovich**, doctor of technical sciences; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **TO A PROBLEM OF OPERATING MEASURING OF VOLUME OF A GROUND DEVELOPED BY DUMP OF THE MOTORGRADERS, SCRAPERS AND BULLDOZERS**

The expedients of build-up of a high-frequency radioundular transmitter of volume of a ground for automatic control systems by dump of the motorgraders, scrapers and bulldozers operating surveyed as one of information parameters a continuously measured flowing value of volume of a ground displaced by dump.

**Key words:** motorgraders, scrapers and bulldozers, development of a ground, measuring of volume, automatic control system.

### REFERENCES

1. Pat. 2327011 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of an autograder [Text] / Yu.F. Ustinov, V.A. Gulai, A.A. Kononov. — Publ. 20.06.2008, Bull. N 17.
2. Pat. 2291254 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of the autograders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.F. Ustinov, A.D. Kononov, A.A. Kononov. — Publ. 10.01.2007, Bull. N 1.
3. Pat. 2327010 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of the autograders, scrapers and bulldozers during a digging of a ground [Text] / Yu.F. Ustinov, A.A. Kononov. — Publ. 20.06.2008, Bull. N 17.
4. Ustinov, Yu.F. Measuring of flowing volume of a ground developed by dump autograders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.F. Ustinov, V.A. Gulai, Yu.V. Avdeev, A.A. Kononov // Mechanization of building. — 2008. — N 12. — P. 5–6.

**УДК 69.003:658.387**

**С.В. ВОЛКОВ, Л.В. ВОЛКОВА, В.Н. ШВЕДОВ**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

Выявлены особенности проектирования организационно-технологических схем строительства жилых зданий, предложены пути решения проблем организационно-технологического проектирования, предусматривающие разработку методов и методик в зависимости от особенностей проектирования организационно-технологических схем.

**Ключевые слова:** организационно-технологическое проектирование, моделирование, организационно-технологические схемы строительства, организация и технология строительства.

Важнейшим стратегическим направлением развития строительной отрасли является формирование основных принципов и методологических основ организации строительного производства, как системы взаимоувязанных экономических, организационных, технологических, технических и управлеченческих решений по обеспечению возведения современных зданий и сооружений, подготовки и осуществления строительства запроектированными темпами с целью своевременного ввода объектов в установленные сроки, с высоким качеством и оптимальной стоимостью [1]. Переход на качественно новый организационный уровень достигается благодаря формированию промышленно-строительных процессов возведения объектов, применению обоснованных организационно-технологических и конструктивных схем зданий, с учетом максимальной заводской готовности материалов и конструкций, высокому уровню механизации и автоматизации процессов строительного производства.

Строительная отрасль имеет ряд особенностей, отличающих ее от других отраслей экономики страны, которые объясняются характером конечной продукции, специфическими условиями труда, спецификой применяемой техники, технологии, материально-техническим обеспечением, организации и управления производством, финансирования и др. Особенности строительства подразделяются на общие, присущие всей строительной отрасли независимо от назначения сооружаемых объектов, и специальные, характерные для отдельных видов строительства: промышленного, жилого, общественного, транспортного, сельскохозяйственного и др.

Общие особенности строительной отрасли и их характерные черты представлены в табл. 1.

Для жилых объектов характерными особенностями являются:  
— соблюдение последовательности и очередности комплексной застройки;

— качественные и количественные изменения отдельных зданий, сооружений и всего жилищного фонда в целом;

Таблица 1

**Общие особенности строительной отрасли**

Общие особенности	Характерные черты общих особенностей
Нестационарный, временный характер строительного производства	С вводом объектов в эксплуатацию строительно-монтажные работы (СМР) прерываются, а средства производства и ресурсы перемещаются на новое место
Строительная продукция — стационарна, неподвижна	Строительная продукция создается в течение длительного времени и используется там, где она закреплена территориально, является предметом длительного пользования: десятки, сотни лет
Строительное производство и продукция всегда индивидуальны, не однотипны	Строительные объекты не повторяются (не копируются), каждому новому объекту присущи черты, характерные только для него, в зависимости от географических, климатических, природных, ландшафтных и других условий
Строгая последовательность выполнения отдельных процессов технологии строительного производства	Существует технологическая взаимосвязь всех операций процесса строительного производства: завершение одного рабочего процесса предшествует началу другого
Своеобразие организационных форм управления строительным производством	Создание до начала СМР временных зданий, сооружений и инженерных коммуникаций; отвлечение средств из хозяйственного оборота на длительный срок; пересмотр решений в ходе строительства по мере совершенствования технологии производства; строительную продукцию нельзя накапливать на промежуточных складах
Различные (неустойчивость) соотношения СМР в течение планового периода	В течение месяца объемы СМР могут изменяться по видам и сложности, что затрудняет расчеты численности и квалификационного состава рабочих
Участие многих организаций в производстве строительной продукции	В строительстве объектов одновременно участвуют несколько подрядных и субподрядных специализированных организаций, создающих отдельные виды работ, конструктивные элементы (части) здания, и каждая организация самостоятельно реализует изготовленную часть (вид работы)
Тесная связь строительной отрасли с другими отраслями экономики страны	Строительство связано и зависит от развития ряда других отраслей, особенно промышленности, которые обеспечивают его техническую оснащенность. Выполняя СМР для других отраслей по договорам подряда, строительные организации неразрывно связаны с заказчиками. Ряд отраслей являются поставщиками и потребителями строительной продукции
Роль и влияние климатических и местных условий на строительное производство	Высокие значения отрицательных и положительных температур требуют выполнения специальных мероприятий, обеспечивающих строительство объектов в таких условиях. Сейсмичность, особый рельеф местности, геологическое строение грунта требуют специальных расчетно-конструктивных решений и способов доставки строительных материалов, конструкций на строительную площадку. Рабочие подвергаются воздействию таких условий, от них требуется концентрация больших сил по сравнению с нормальными условиями труда

— преобразование структуры и состава жилищного фонда в соответствии с современными требованиями;

— совместное развитие наряду с жилищным фондом дорог, сетей школ, детских дошкольных учреждений, объектов торговли, здравоохранения, досуга, культуры, спорта, бытового обслуживания в соответствии с санитарными и градостроительными нормами.

Организационно-технологическое проектирование (ОТП) строительства жилых зданий в современных рыночных условиях заключается в выработке решений, обеспечивающих готовность объектов и строительных организаций к выполнению строительно-монтажных работ (СМР). В процессе ОТП осуществляется планирование строительства, решение вопро-

сов обеспечения всеми видами ресурсов, разработка организационно-технологических схем (ОТС) и организационно-технологических моделей (ОТМ) возведения зданий, выбор методов организации и производства СМР на основе современных технологий, оборудования и объемно-планировочных решений. Кроме того, ОТП предусматривает согласование деятельности всех участников строительства, выполнение СМР в полном объеме в строгой технологической последовательности, технически обоснованное совмещение (увязку) выполнения работ, безусловное соблюдение правил техники безопасности и охраны труда, выполнения необходимых мер и мероприятий по качеству [2].

ОТМ объектов являются наиболее эффективным средством планирования и организации строительного производства и представляют собой нормализованную организацию и технологию возведения зданий. Моделирование объектов должно быть адекватным, направленным на достижение конкретной цели возведения здания, и обеспечивать выполнение всего комплекса СМР с учетом всех наиболее важных свойств объекта. ОТМ должны быть устойчивыми и адаптивными к изменениям в данных конкретных условиях строительства объектов. Моделирование должно учитывать многовариантность осуществления строительного производства, в зависимости от времени года, погодных и климатических условий, развития строительных технологий, материалов и оборудования, вероятностный характер изменений объемов выполнения СМР, сроков и стоимости строительства [3].

ОТС возведения зданий жилищного и гражданского назначения должны определять оптимальные организационно-технологические решения и включать в себя:

1. Пространственное членение здания, комплекса на участки, захваты, частные фронты.
2. Последовательность возведения здания, комплекса с указанием технологической последовательности СМР.
3. Характеристику основных методов возведения здания, комплекса и др.

Исходными данными для разработки ОТС являются проектные решения по объекту (комплексу), организационно-технологические решения по аналогичным объектам и фактические данные по их реализации, а также данные о материально-технической базе строительных организаций, участвующих в реализации проекта здания, комплекса. При разработке ОТС следует исходить из возможности реализации наиболее прогрессивных методов возведения зданий (поточный, комплектно-блочный, узловой и др.) и необходимого технологического обеспечения [4].

В ОТП строительства жилых зданий в современных условиях существуют следующие проблемы:

1. Низкая эффективность организационно-технологических решений строительства жилых зданий, следствием которой являются:
  - 1.1) большая продолжительность строительства по сравнению с нормативной;
  - 1.2) высокая трудоемкость СМР;
  - 1.3) низкая производительность труда;
  - 1.4) низкий уровень подготовки, организации и управления строительством;
  - 1.5) низкое качество СМР и др.

2. Отсутствие методик, рекомендаций по разработке организационно-технологических решений, схем строительства жилых зданий, в том числе:

2.1) обоснование и выбор частных фронтов, захваток объекта при разделении (расчленении) общего строительного пространства;

2.2) обоснование и выбор метода организации строительства (параллельный, поточный, узловой и др.);

2.3) определение, выбор и увязка комплексов работ в строгой технологической последовательности;

2.4) недостаточный набор параметров, устанавливаемых в процессе разработки ОТС (современная методика устанавливает три обязательных параметра — пространственное членение объекта на фронты (захватки), выбор и увязка комплексов работ, выбор метода организации строительства).

3. Низкий уровень организации и управления материально-техническими ресурсами в строительстве жилых зданий: задачи и функции управления ресурсами не определены и не выполняются, что ведет к срыву сроков и удорожанию строительства.

4. Отсутствие типовых схем, технологических решений, моделей организации строительства жилых зданий с учетом практики объемно-планировочных и конструктивных решений.

5. Причинение различного вида неудобств населению и вреда окружающей природной среде вследствие производимых СМР, а также в ходе подготовки и реализации проектов строительства объектов: шум, грязь, мусор, нарушение внутридворовой транспортной схемы движения.

6. Недостаточная обоснованность принимаемых в ходе календарного планирования решений, причинами которой являются:

6.1) отсутствие четких методик по выбору состава бригад, выполняющих комплексы СМР;

6.2) неопределенность границ продолжительности выполнения комплексов работ, приводящая к необоснованным расчетам продолжительности в практике проектирования.

7. Номенклатура объектов строительства для определения нормативной продолжительности не соответствует объемно-планировочным и конструктивным решениям современных жилых зданий.

В целях решения проблем ОТП были выявлены особенности проектирования ОТС строительства жилых зданий (табл. 2).

Анализ особенностей ОТС показал, что для устранения проблем, связанных с ОТП строительства жилых зданий, необходимо решить следующие задачи:

1. Уточнить состав документов, разрабатываемых при ОТП строительства жилых зданий.

2. Разработать современный метод проектирования ОТС строительства жилых зданий, отличающийся тем, что при проектировании схем вводятся две дополнительные, решаемые последовательно задачи:

2.1) уточнение расчетной продолжительности строительства на основе сравнительного анализа стоимости реализации проекта строительства по нескольким вариантам ОТС;

2.2) расчет продолжительности и стоимости строительства объекта с учетом дополнительного объема работ, связанного с необходимостью выполнения задач по обеспечению требуемого договором (контрактом) уровня качества (входной и операционный контроль, технический надзор заказчика и др.).

Таблица 2

**Особенности проектирования ОТС жилых зданий**

Общие особенности отрасли строительства	Особенности проектирования ОТС жилых зданий
Нестационарный, временный характер	При проектировании ОТС следует применять инвентарные, многократно используемые временные здания и сооружения: бытовки, элементы сетей, ограждения площадки строительства, сборные дорожные плиты, оборудование, оснастка и т.д.
Строительная продукция (объекты строительства) — стационарна, неподвижна	Необходимо проектировать временные дороги, площадки, сети, пожарные гидранты на месте будущих постоянных дорог, площадок, сетей и т.д.
Строительное производство и строительная продукция всегда индивидуальны, не однотипны	Максимальное использование банка данных типовых организационно-технологических решений и элементов для повторного применения
Строгая последовательность выполнения отдельных процессов технологии	Разработка ОТС на основе методики определения комплексов СМР и методики пространственного членения объектов на частные фронты, захватки
Своеобразие организационных форм управления	Разработка ОТС на основе методики определения и выбора методов организации строительства и методики управления ресурсами строительного производства
Различные соотношения (неустойчивость) СМР в течение планового периода	Планирование ритмичной равнонапряженной работы на основе рационального определения численности и состава бригады, сменности, современного оборудования и инструмента
Участие многих организаций в производстве строительной продукции	Комплектная поставка материалов и оборудования на стройплощадку, рациональная организация складского хозяйства, бытовых помещений на основе определения рационального количества подрядных организаций
Тесная связь строительной отрасли с другими отраслями экономики страны	Проектирование ОТС на основе маркетинговых исследований рынков труда, строительных материалов, оборудования, оснастки в конкретном регионе строительства объектов
Роль и влияние климатических и местных условий	Проектирование ОТС на основе наиболее рационального режима трудовой деятельности с учетом рекомендаций по организации работ в данных климатических условиях

## 3. Разработать методики:

3.1) по определению частных фронтов (захваток) пространственного членения зданий в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений;

3.2) обоснованию состава комплексов работ и правил их увязки в строгой технологической последовательности;

3.3) обоснованию и выбору метода организации строительства;

3.4) определению допустимых границ (коридоров), за пределы которых не может выходить расчетная продолжительность выполнения комплексов работ.

В результате анализа выявлены особенности проектирования ОТС строительства жилых зданий.

Предложены пути решения проблем ОТП, предусматривающие разработку соответствующих методов и методик в зависимости от особенностей проектирования ОТС.

Дальнейшие исследования совершенствования методологических основ ОТП необходимо проводить с учетом выявленных особенностей, в направлении определения показателей качества организационно-технологических решений, совершенствования нормативной базы и методов ОТП.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Организация строительства : СНиП 12-01-2004. — Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2009. — 32 с. — (Сер. Строительство).
2. Пособие по разработке проектов организации строительства и проектов производства работ для жилищно-гражданского строительства (к СНиП 3.01.01-85). — М. : Стройиздат, 1989. — 105 с.
3. Небритов, Б.Н. Организационно-технологическое проектирование в строительстве [Текст] / Б.Н. Небритов. — М. : Вуз. кн., 2011. — 144 с.
4. Этенко, В.П. Менеджмент в архитектуре : Основы методики управления архитектурным проектом. — 2-е. изд. — М. : кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 224 с.

*ВОЛКОВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ВОЛКОВА Людмила Васильевна, канд. экон. наук, доц.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ШВЕДОВ Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 14.01.13

**Volkov Sergey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Volkova Lyudmila Vasilevna**, candidate of economical sciences, assistant professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

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

## DESING FEATURE OF ORGANIZATION-TECNOLOGICAL SCEAM OF CONSTRUCTION REZIDENTIONAL BUILDINGS

Features of design of organizational-technological diagrams of construction of residential buildings are revealed, ways of the decision of problems of the organizational-technological design, providing development of methods and procedures depending on features of design of organizational-technological diagrams are determined.

**Key words:** organizational-technological design, modelling, organizational-technological diagrams of construction, the organization and technology of construction.

## REFERENCES

1. The organization of construction : SN&R 12-01-2004. — Novosibirsk : Sib. univ. Publ. House, 2009. — 32 p. — (Ser. Construction).
2. The grant on development of projects of the organization of construction and projects of manufacture of works on construction engineering construction (to SN&R 3.01.01-85). — M. : Stroyizdat, 1989. — 105 p.
3. N e b r i t o v, B.N. Organizational design in construction [Text] / B.N. Nebritov. — M. : High School Book, 2011. — 144 p.
4. A t e n k o, V.P. Management in architecture: Bases of a procedure of management of the architectural project [Text] / V.P. Atenko. — 2<sup>nd</sup> ed. — M. : Book House «LIBROCOM», 2009. — 224 p.

**УДК 666.9.022.3**

**В.П. ШАЦКИЙ, И.В. ТИТОВА**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРОВ  
И АНАЛИЗ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Рассматриваются строительные отходы, их состав и предлагаемая технология переработки пластмассовых отходов, включающая в себя перерабатывающее измельчающее оборудование с их техническими характеристиками.

**Ключевые слова:** технология переработки, отходы полимеров, строительные отходы, перерабатывающее измельчающее оборудование.

Понятие «строительные отходы» условное и употребляется, чтобы отличить специфические отходы, образующиеся при строительной деятельности, от других отходов производства. Снос здания делится на несколько основных этапов: проектирование, получение разрешительной документации на снос зданий, подготовка здания к сносу, демонтаж, вывоз или переработка мусора. Прежде всего, из здания удаляется максимальное количество материалов, которые можно переработать отдельно. Это доски пола, линолеум, сантехническое оборудование, трубы, столярка, оконные стекла, пластмассовые отходы. Проблема утилизации строительных отходов остро стоит во всем цивилизованном мире. При сносе домов, производстве строительно-монтажных и сопутствующих работ образуется значительное количество отходов, большая часть которых вывозится на полигоны и свалки, в том числе, несанкционированные, что отрицательно влияет на экологическую ситуацию [1]. До недавнего времени единственным путем утилизации строительных отходов было захоронение на специально отведенных полигонах и свалках, но, по сути, это всего лишь откладывание решения проблемы. Кроме того, такой способ утилизации создает большие экологические проблемы.

За рубежом проблема утилизации отходов решается системно на государственном уровне. Строительные отходы содержат 20 % отходов пиломатериалов, 1 — стеклобоя, 10,3 — металлического скрата, 40 — полимерного материала, 8 — песка, 8 % камней, щебня, гравия и др. Малая насыпная масса и обусловленные этим большие объемы, занимаемые строительными отходами при их захоронении, приводят к перегруженности свалок, привлечению большого числа транспортных средств, значительному расходу топлива. Строительные отходы включают в себя пластиковые окна, сантехнические полимерные трубы, двери и т.д. Все полимеры, пластмассы и прочие подобные отходы необходимо подвергать дополнительной обработке, чтобы не нанести вред окружающей среде. С помощью переработки строительного мусора вторую «жизнь» обретают пластмассы. Следует подчеркнуть, что вторичной переработке могут быть подвергнуты только термопластичные полимерные отходы, т.е. материалы, которые под воздействием температуры приобретают свойство

---

**© Шацкий В.П., Титова И.В., 2013**

пластичности и могут формироваться в различные изделия. Термопрессивные синтетические материалы и соответственно отходы из них не могут повторно переходить в пластичное состояние в виду их химической природы [2].

Рассмотрим вторичную переработку полимеров. Нами предлагается технология переработки пластмассовых отходов (рис. 1).

Наиболее энергоемкой операцией подготовки отходов вторичных полимерных материалов к переработке является их измельчение до размеров, пригодных для переработки в червячных литьевых машинах. Используемое измельчающее оборудование характеризуется увеличивающимся количеством выполняемых функций, возрастающей сложностью конструктивного исполнения, широкой номенклатурой. Поэтому с целью обеспечения сравнимости показателей нами рассмотрены дробилки Кузнецкого машиностроительного завода, находящегося в г. Кузнецке Пензенской области, и импортного производства. С 1961 г. завод производит оборудование для переработки полимеров. АО «Кузполимермаш» — ведущий российский производитель полимерного оборудования, выпускающий оборудование для переработки пластмасс<sup>1</sup>. Дробилки, рассматриваемые нами, предназначены для измельчения пластиковых отходов. Чтобы сделать правильный выбор дробилки, нужно определить, какой материал и в виде чего будет загружаться в дробилку, его размеры. Необходимо знать производительность дробилки, так как она влияет на ее размер и стоимость [3].

Технические характеристики дробилок представлены в табл. 1.

Также были рассмотрены дробилки импортного производства<sup>2</sup> (табл. 2).

Аппроксимация выполнялась с помощью программы simpleformula v.1.5. Были получены зависимости мощности дробилок, цены, массы, площади, занимаемой дробилками от их производительности. Для этих

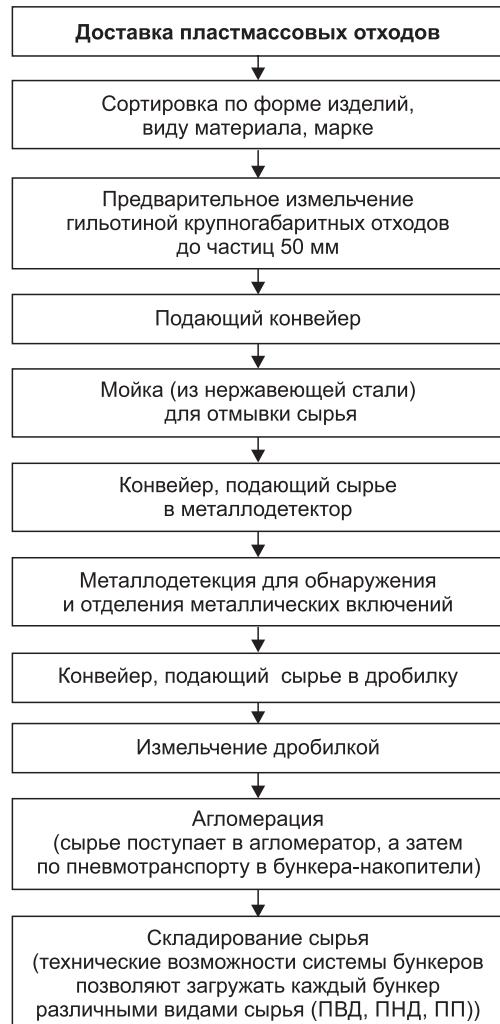


Рис. 1. Блок-схема технологии переработки пластмассовых отходов

ПВД — полиэтилен высокого давления; ПНД — полиэтилен низкого давления; ПП — полипропилен

<sup>1</sup> Каталог. Кузполимермаш. Полимерное оборудование: <http://www.kuzpolimer.ru/>

<sup>2</sup> Каталог. Оборудование для производства изделий из пластмасс: <http://ssb.plastelectro.ru/>

Таблица 1  
Характеристика отечественного измельчающего оборудования, выпускаемого Кузнецким заводом полимерного машиностроения

Показатели	ИПР-200	ДПР-150	ИПР-150М	ИПМ-500	ИПМ-400	ИПРТ-300	ИПР-450М	ИПМ-500
Максимальные размеры пустотелых отходов, мм	350×300×200	150×75×75	150×75×75	350×300×200		500×350×200	400×200×200	
Толщина стенки до, мм	3	1–5	1–5	2		1–10	1–10	
Производительность, в зависимости от отходов до, кг/ч	120	100	80	175	180	200	250	125
Диаметр отверстий в калибрующей решетке (в стандартной комплектации), мм	8; 4	8	8	4–30		8; 10	10	4–20
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	750	1125	1125	1500	750	750	675	1500
Мощность привода, кВт	5,5	3,2	3,2	7,5	11,8	30	30	11
Габаритные размеры, мм:								
длина	1335	572	960	1000	1750	1565	1885	830
ширина	850	590	590	650	870	1205	1420	700
высота	700	1250	1410	1400	820	1940	2285	1700
Масса, кг	330	220	250	280	740	1500	2416	275
Цена, руб.	103520	96104	102802	163192	150000	275842	534755	75000

Таблица 2

**Характеристика машин импортного производства**

Модель	Скорость вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Мощность, кВт	Производительность, кг/ч	Габаритные размеры (L×W×H), м	Масса, кг	Цена, руб.
SG-2028	290	2,2	80	0,7×0,5×1,3	225	89000
SG-2042	290	4,0	110	0,7×0,6×1,3	270	120000
SG-2324 E	415	5,5	90	0,995×0,55×1,43	320	95000
SG-2336 E	415	7,5	120	0,995×0,66×1,43	360	125000
SG-2348 E	415	11,0	150	0,995×0,78×1,43	425	150000
SG-3048 E	415	11,0	185	1,2×0,81×1,46	500	185000
SG-3060 E	415	15,0	220	1,2×0,93×1,46	530	260000
SG-3048	415	11,0	185	0,98×1,0×1,72	560	190000
SG-3060	415	15,0	220	0,98×1,12×1,72	590	390000

зависимостей выбран ряд функций по критерию наименьшей остаточной дисперсии (рис. 2).

Зависимости имеют вид:

$$1. \text{ Мощности: } N_d = 0,563 \cdot 10^{-3} Q^2 - 0,014Q, \text{ кВт.} \quad (1)$$

Корреляционная зависимость мощности измельчителей от производительности (рис. 2, а) описывается возрастающей кривой второго порядка. Нарастание интенсивности кривой по мере повышения производительности дробилки (увеличения угла наклона касательной к кривой мощности) подтверждает нецелесообразность завышения мощности машины в связи с неоправданным ростом расходов на электроэнергию. Рациональное использование электроэнергии будет наблюдаться в том случае, когда машина загружена на полную производительность.

$$2. \text{ Цены: } \Pi_d = e^{10^{-5} \cdot 3,3Q^2 + 4,23}, \text{ руб.} \quad (2)$$

На графике зависимости цены от производительности (рис. 2, б) наблюдается незначительный рост цены при малой производительности (до 100 кг/ч) и заметный — при повышении ее производительности до 260 кг/ч. Это объясняется не только увеличением массы машины, но и условиями работы ее деталей. Повышение производительности приводит к возрастанию нагрузки на элементы конструкции машины, ужесточает требования к конструкционным материалам и способам изготовления деталей. Поэтому изменение производительности дробилки при малых ее значениях слабо отражается на цене машины, а при значениях, превышающих 220 кг/ч, — существенно изменяет цену машины, следовательно, и удельную себестоимость измельчаемого материала.

$$3. \text{ Массы: } m_d = e^{14 \cdot 10^{-3} Q + 4,15}, \text{ кг.} \quad (3)$$

Масса дробилок растет с увеличением производительности машин (рис. 2, в). Это вполне объяснимо. При повышении производительности растут габаритные размеры машины, нагрузки на детали. Как следствие, увеличивается толщина стенок корпусов, диаметры валов, размеры других деталей, что повышает массу машины.

$$4. \text{ Площади: } S_d = 4,26 \cdot 10^{-5} Q^2 + 0,98, \text{ м}^2. \quad (4)$$

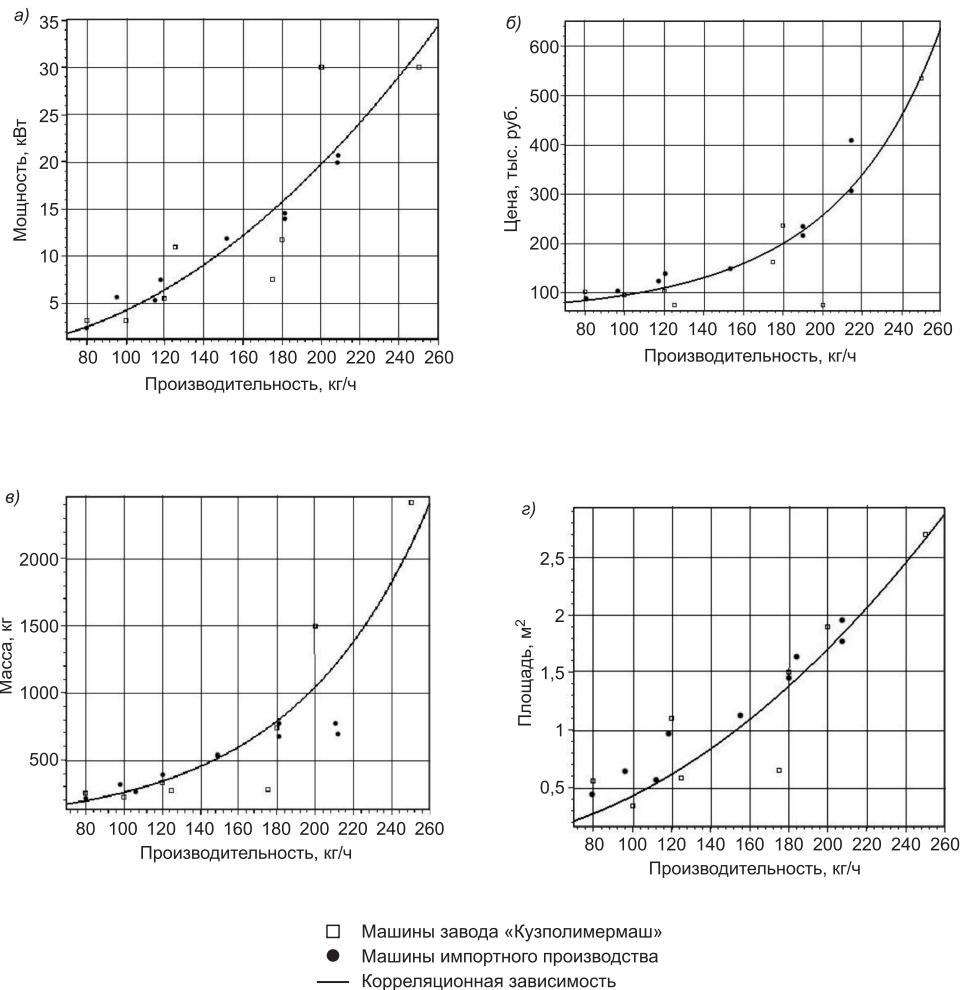


Рис. 2. Зависимость мощности (а), цены (б), массы (в) и площади (г) от производительности дробилки

С увеличением производительности дробилок производственная площадь, занимаемая машиной, возрастает по закону квадратичной параболы (рис. 2, г). Однако кривизна кривой меньше, чем зависимость массы или цены от производительности. Тем не менее приведенная зависимость говорит о том, что покупка предприятием дробилки с завышенной производительностью вызовет непроизводительное потребление производственной площади, а следовательно, и снижение эффективности производства.

На графиках видно, что показатели дробилок импортного производства существенно не отличаются от значений показателей дробилок «Кузполимермаш». Для потребителей не имеет значения страна-изготовитель и марка, им необходимо подбирать оборудование по техническим характеристикам, например, по производительности.

Для успешной работы действующих и создаваемых вновь комплексов по переработке полимерных отходов необходимы отсутствующая сегодня нормативная база, строго регламентирующая обязанности строительных фирм-подрядчиков по предварительной сортировке и вывозу отходов на комплексы по переработке, наличие в сметах на строительные работы расходов на утилизацию отходов взамен вывоза и депонирования их на

свалках, контроль за соблюдением этих нормативов со стороны городской инспекции [4].

Таким образом, нами предлагается новая технология переработки полимерных строительных отходов по полному технологическому циклу. Полученные уравнения и корреляционные зависимости позволят потребителю подбирать измельчающее оборудование, подходящее по мощности, стоимости, массе и производственной площади, занимаемой оборудованием, в зависимости от требуемой производительности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоров, Л.Г. Управление отходами в крупных городах и агломерационных системах поселений [Текст] / Л.Г. Федоров. — М. : Прима-Пресс-М, 1999. — 113 с.
2. Проблема обращения с твердыми бытовыми отходами [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://ekology28.h11.ru/> index.php?page=1.
3. Абрамов, В.В. Оценка состояния рынка оборудования для переработки пластмасс в России [Текст] / В.В. Абрамов, Н.М. Чалая // Пласт. массы. — 2001. — № 5. — С. 5–6.
4. Титова, И.В. Особенности дифференцированной технологии переработки полимерных отходов в системе АПК [Текст] / И.В. Титова, В.К. Астанин, Е.В. Пухов, А.А. Измайлова, И.С. Воронков, А.Л. Тоцкий // Междунар. науч. журн. — 2012. — № 3. — С. 75–80.

*ШАЦКИЙ Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф.*

*Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I  
ТИТОВА Ирина Вячеславовна, канд. техн. наук, ст. препод.*

*Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I*

Получено после доработки 22.01.13

**Shatsky Vladimir Pavlovich**, doctor of technical sciences, professor, Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, Russia

**Titova Irina Vyacheslavovna**, candidate of technical sciences, senior lecturer, Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, Russia

#### **TECHNOLOGY OF BUILDING POLIMERIC WASTE PROCESSING AND CRUSHING EQUIPMENT ANALYSIS**

Building wastes, their composition and proposed plastic waste processing technology including processing crushing equipment and their technical characteristics are considered.

**Key words:** processing technology, building waste, plastic waste, processing crushing equipment.

#### REFERENCES

1. Fedorov, L.G. Waste management in large cities and agglomeration of settlement systems [Text] / L.G. Fedorov. — M. : Prima-Press Edition-M, 1999. — 113 p.
2. The problem of hard domestic waste [Electronic resource]. — Access mode : <http://ekology28.h11.ru/> index.php?page=1.
3. Abramov, V.V. The evaluation of market conditions of plastic processing equipment in Russia [Text] / V.V. Abramov, N.M. Chalay // Plastics. — 2001. — N 5. — P. 5–6.
4. Titova, I.V. Peculiarities of differentiated polymeric waste processing technology in the system of agricultural and industrial complex [Text] / I.V. Titova, V.K. Astanin, E.V. Pukhov, A.A. Ismaylov, I.S. Voronkov, A.L. Totsky // Intern. sci. j. — 2012. — N 3. — P. 75–80.

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.131.001.24

В.В. ДЕГТЯРЕВ-мл., Е.Е. ЕРШОВА

### К ВОПРОСУ О ПОСТАНОВКЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОТКРЫТЫХ ПОТОКОВ В НЕДЕФОРМИРУЕМОМ РУСЛЕ

В рамках модели несжимаемой жидкости изучена структура течения в открытом канале. Рассмотрены различные граничные условия на свободной поверхности потока. Исследовано влияние этих условий на структуру потока.

**Ключевые слова:** установившееся движение, открытый поток, численное моделирование, граничное условие.

Численное моделирование безнапорных водных потоков в недеформируемых и деформируемых руслах является ключевой составляющей многочисленных по назначению и наполнению задач речной гидравлики и гидротехники. Их решение многие исследователи основывают на использовании системы полных уравнений Навье–Стокса [1, 2], которые могут быть адаптированы для задачи настоящей работы.

В статье рассматривается численное моделирование установившегося движения водного потока в трехмерной постановке в русле-канале прямоугольного поперечного сечения и бесконечной длины. В процессе решения возникает вопрос о постановке граничных условий задачи на свободной поверхности. Ниже будет проанализировано влияние двух видов последних на полученное решение.

**Основные уравнения и методы решения.** В качестве характерных величин для обезразмеривания системы полных уравнений Навье–Стокса выбраны скорость течения на входе  $U_0$ , ширина канала  $l$ , плотность жидкости  $\rho_0$  и сформированные из них размерные величины  $\tau_0 = \frac{l}{U_0}$

— время и  $p_0 = U_0^2 \rho_0$  — гидродинамическое давление.

В безразмерных переменных система уравнений Навье–Стокса, как известно, состоит из уравнений неразрывности и движения и имеет вид:

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{d\bar{\mathbf{u}}}{dt} = -\nabla \bar{p} + \frac{1}{Re} \Delta \bar{\mathbf{u}}, \quad i=1, 2, 3, \quad (1.2)$$

где  $\bar{\mathbf{u}} = (u_1, u_2, u_3)$  — вектор скорости,  $Re = \frac{\rho_0 U_0 l}{\mu}$  — число Рейнольдса,

$\mu$  — сдвиговая вязкость.

Для системы (1.1)–(1.2) на дне канала ставится условие прилипания:

$$u_i \Big|_{x_3=0} = 0, \quad i=1, 2, 3.$$

На стенках канала — условия симметрии в виде:

$$\begin{aligned} u_1(-l/2, x_2, x_3, t) &= u_1(l/2, x_2, x_3, t), \\ u_2(-l/2, x_2, x_3, t) &= u_2(l/2, x_2, x_3, t), \\ u_3(-l/2, x_2, x_3, t) &= u_3(l/2, x_2, x_3, t), \\ p(-l/2, x_2, x_3, t) &= p(l/2, x_2, x_3, t). \end{aligned}$$

На входном и выходном сечениях (верхней и нижней границах) — периодические условия.

На свободной поверхности потока рассматриваются два варианта условий: свободная поверхность —

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad (1.3)$$

свободный выход —

$$\mathbf{p} = 1. \quad (1.4)$$

Начальные условия при численном моделировании задаются следующим образом:

$$u_1 \Big|_{t=0} = u_3 \Big|_{t=0} = 0, \quad u_2 \Big|_{t=0} = 1, \quad p \Big|_{t=0} = 1. \quad (1.5)$$

**Разностная схема.** Система уравнений (1.1)–(1.2) с описанными выше граничными и начальными условиями решается численно с помощью явно-неявной конечно-разностной схемы Ковени–Яненко, учитывающей расщепление по физическим процессам и переменным. В операторном виде система (1.1)–(1.2) записывается следующим образом:

$$(s^n - s^{n-1})/\tau + L_h [\delta s^n + (1-\delta)s^{n-1}] = F_h^n, \quad (1.6)$$

здесь  $s^n = (u_{1ij}^n, u_{2ij}^n, u_{3ij}^n, p_{ij}^n)$  — сеточная вектор-функция решения на  $n$ -м временном слое;  $h_1 = h_2 = h_3 = h$  — шаг пространственной сетки;  $\tau$  — шаг по времени;  $\delta$  — весовой параметр. Оператор  $L_h$  включает симметричные аппроксимации со вторым порядком первых и вторых пространственных производных по каждой пространственной координате. Оператор  $F_h^n$  рассматривается как вектор правых частей.

На регулярной сетке с шагом  $h$  по всем трем координатам схема (1.6) аппроксимирует систему (1.1)–(1.2) с порядком  $O(\tau + h^2)$  и является абсолютно устойчивой при весовом параметре  $\delta \geq 1/2$  [3]. В расчетной области сетка содержала  $18 \cdot 40 \cdot 20 = 14400$  узлов с шагом по пространственным координатам  $h = 0,016$  и шагом по времени  $\tau = 0,016$ .

Рассматривалась задача развития решения вплоть до выхода его на стационар, определявшегося из условия

$$|\mathbf{u}^n - \mathbf{u}^{n-1}| < 10^{-12}.$$

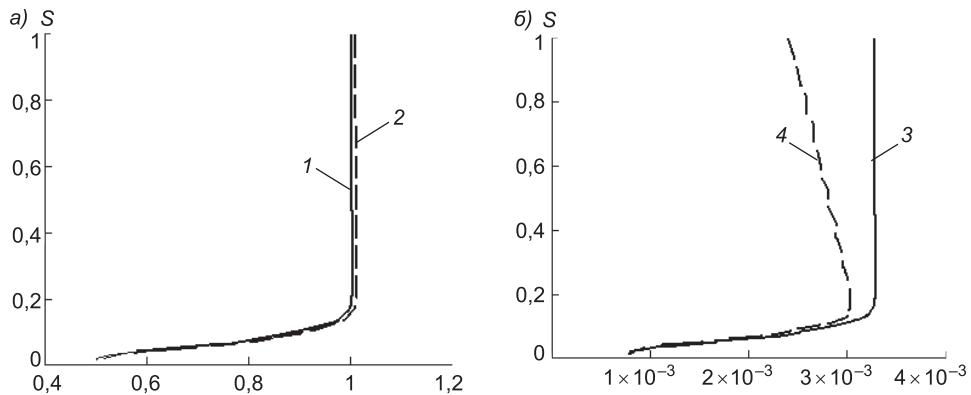


Рис. 1. Продольные (а) и вертикальные (б) составляющие поля скоростей  
 1 — продольная составляющая поля скоростей при условии (1.4); 2 — при условии (1.3); 3 — вертикальная составляющая поля скоростей при условии (1.4); 4 — при условии (1.3)

Таблица 1  
**Вертикальные и продольные составляющие поля скоростей**

$S$	$u_2$	$u'_2$	$u_3$	$u'_3$
0,001	0,140023	0,141223	0,000458171	0,000335972
0,010	0,140049	0,14125	0,000458298	0,000348771
0,020	0,140081	0,141255	0,000458428	0,000358543
0,030	0,140115	0,141281	0,000458537	0,000365179
0,040	0,140157	0,141312	0,000458696	0,000373967
0,050	0,140196	0,141358	0,000458849	0,000382048
0,060	0,14024	0,141399	0,000459064	0,000391207
0,070	0,140295	0,141476	0,000459306	0,000402479
0,080	0,140351	0,141515	0,000459575	0,00041232
0,090	0,140394	0,141564	0,000459684	0,000418743
0,100	0,138922	0,140215	0,000455913	0,000423417
0,110	0,116023	0,118066	0,000351813	0,000335213
0,118	0,069958	0,0715958	0,000110549	0,000110479

В результате было получено, что для его обеспечения требовалось 5000 шагов по времени.

**Обсуждение результатов.** Ставилась цель — оценить влияние граничных условий на поверхности канала на изменения значений поля скоростей течения внутри потока.

Результаты, полученные в точке с координатами  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ , где  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 25l$ , а  $x_3$  пробегает все свои значения, обозначенные  $S$ , представлены на рис. 1.

Сопоставительный анализ расчетов показывает, что изменение граничных условий на поверхности не оказывает существенных качественных отличий результатов, но и количественные тоже достаточно малы. Так, для продольных компонент поля скоростей результаты практически одинаковы, а для вертикальных — имеют различия в 5–6-м знаке после запятой (табл. 1).

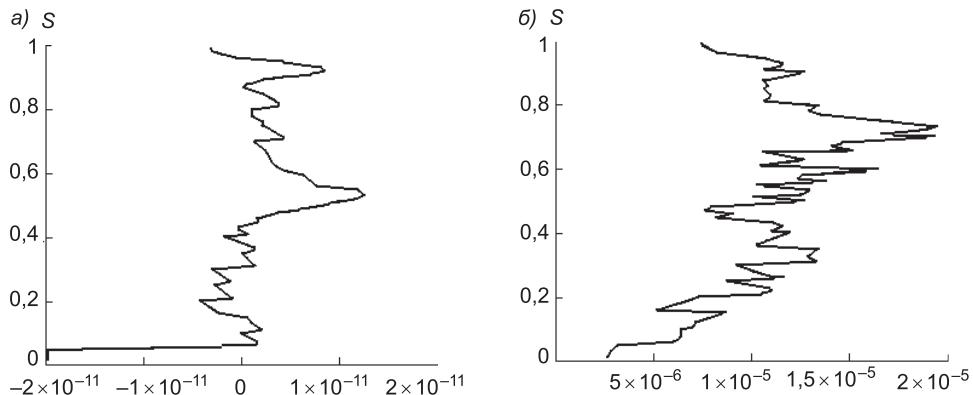


Рис. 2. Поперечная составляющая поля скоростей при условии (1.4) (а) и при условии (1.3) (б)

Таблица 2

**Значения трех составляющих поля скоростей при условии (1.4)**

$S$	$u_1$	$u_2$	$u_3$
0,001	-4,3092e - 013	0,140023	0,000458171
0,010	9,72702e - 013	0,140049	0,000458298
0,020	4,77348e - 013	0,140081	0,000458428
0,030	2,69193e - 013	0,140115	0,000458537
0,040	3,48485e - 013	0,140157	0,000458696
0,050	9,58126e - 013	0,140196	0,000458849
0,060	1,23112e - 012	0,14024	0,000459064
0,070	1,00588e - 013	0,140295	0,000459306
0,080	7,57054e - 014	0,140351	0,000459575
0,090	-3,69164e - 013	0,140394	0,000459684
0,100	-3,28047e - 013	0,138922	0,000455913
0,110	1,69904e - 013	0,116023	0,000351813
0,118	-2,78487e - 012	0,069958	0,000110549

Таблица 3

**Значения трех составляющих поля скоростей при условии (1.3)**

$S$	$u'_1$	$u'_2$	$u'_3$
0,001	1,04623e - 006	0,141223	0,000335972
0,010	1,49356e - 006	0,14125	0,000348771
0,020	1,53024e - 006	0,141255	0,000358543
0,030	2,37606e - 006	0,141281	0,000365179
0,040	2,11157e - 006	0,141312	0,000373967
0,050	1,7608e - 006	0,141358	0,000382048
0,060	1,77895e - 006	0,141399	0,000391207
0,070	1,54577e - 006	0,141476	0,000402479
0,080	1,80097e - 006	0,141515	0,00041232
0,090	1,23087e - 006	0,141564	0,000418743
0,100	7,31865e - 007	0,140215	0,000423417
0,110	8,97636e - 007	0,118066	0,000335213
0,118	3,72706e - 007	0,0715958	0,000110479

Таблица 4

## Поперечные компоненты поля скоростей

$S$	$u_1$	$u'_1$
0,001	-4,3092e - 013	1,04623e - 006
0,010	9,72702e - 013	1,49356e - 006
0,020	4,77348e - 013	1,53024e - 006
0,030	2,69193e - 013	2,37606e - 006
0,040	3,48485e - 013	2,11157e - 006
0,050	9,58126e - 013	1,7608e - 006
0,060	1,23112e - 012	1,77895e - 006
0,070	1,00588e - 013	1,54577e - 006
0,080	7,57054e - 014	1,80097e - 006
0,090	-3,69164e - 013	1,23087e - 006
0,100	-3,28047e - 013	7,31865e - 007
0,110	1,69904e - 013	8,97636e - 007
0,118	-2,78487e - 012	3,72706e - 007

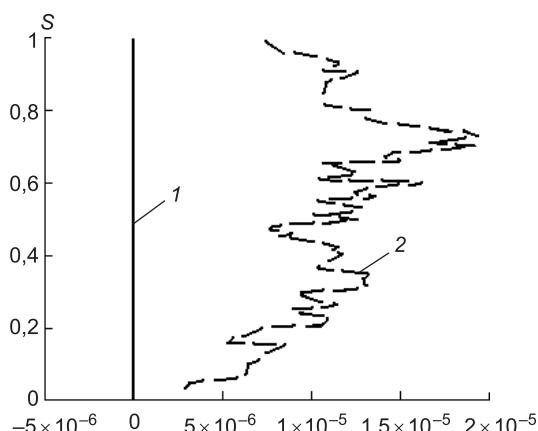


Рис. 3. Поперечные составляющие поля скоростей

1 — вертикальная составляющая поля скоростей при условии (1.4); 2 — при условии (1.3)

но пренебречь этой компонентой (табл. 3).

Тем не менее можно утверждать, что при изменении вида граничных условий на свободной поверхности поперечные компоненты поля скоростей наиболее чувствительны и изменения их величин наиболее значительны, так как они отличаются на 5–6 порядков, что достаточно существенно. Сопоставим полученные результаты в табл. 4 и на рис. 3.

Рассмотрев течение в канале бесконечной длины прямоугольного поперечного сечения, можно утверждать, что изменение граничных условий на поверхности оказывает значительное влияние только на поперечные компоненты поля скоростей, причем их значения настолько малы, относительно двух других компонент, что ими можно пренебречь.

Поперечные компоненты поля скоростей приведены на рис. 2. Судя по порядку величины поперечной компоненты скорости в первом случае, ее изменения незначительны по сравнению с двумя другими компонентами, причем настолько, что ими можно пренебречь (табл. 2). Во втором случае величина изменений поперечной компоненты поля скоростей на 2–3 порядка меньше, чем у вертикальной компоненты, а от продольной компоненты отличается уже на 5–6 порядков. Таким образом, и в этом случае можно

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коchin, Н.Е. Теоретическая гидромеханика [Текст] / Н.Е. Коchin, И.А. Кибель, Н.В. Розе. — 6-е изд. испр. и доп. — М. : Физматлит, 1963. — 583 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — 3-е изд., испр. — М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — Т. 6 : Гидродинамика. — 736 с.
3. Ковеня, В.М. Метод расщепления в задачах газовой динамики [Текст] / В.М. Ковеня, Н.Н. Яненко. — Новосибирск : Наука, 1981. — 254 с.

*ДЕГТЬЯРЕВ-мл. Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ЕРШОВА Елена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: elena ee@ngs.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 16.01.13

**Degtyarev-Jr. Vladimir Vladimirovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gts@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Ershova Elena Evgenyevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: elena ee@ngs.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### TO THE PROBLEM ON STATEMENT OF THE BOUNDARY CONDITIONS AT NUMERICAL MODELING OF THE OPEN FLOWS IN THE NON-DEFORMATION CHANNEL

Within the framework of model of an incompressible viscous liquid the structure of current in the open channel is investigated. The various boundary conditions on a free surface of a flow were considered. The influence of these conditions on structure of a flow is investigated.

**Key words:** the established movement, open flow, numerical modeling, boundary condition.

### REFERENCES

1. Kotschin, N.E. Theoretische Hydromechanik [Text] / N.E. Kotschin, I.A. Kibel, N.V. Rose. — 6<sup>th</sup> ed., corrected. — M., 1963. — 583 p.
2. Landau, L.D. Theoretical physics [Text] / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. — 3<sup>th</sup> ed., corrected. — M. : Science, 1986. — Vol. 6 : Hydrodynamics. — 736 p.
3. Kovenya, V.M. The method of splitting in the gas dynamics problems [Text] / V.M. Kovenya, N.N. Yanenko. — Novosibirsk : Science, 1981. — 254 p.

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.92:726.5

А.Г. КОЧЕВ, О.В. ФЕДОРОВА, М.М. СОКОЛОВ

### РАСЧЕТ ВОЗДУХООБМЕНОВ ДЛЯ ОСУШКИ КОНСТРУКЦИЙ И АЭРАЦИИ В КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЯХ

Представлены материалы по поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований приведены данные по аэродинамике православных храмов и осушению переуваженных инерционных ограждающих конструкций методом электроосмоса.

Ключевые слова: православные храмы, внешняя аэродинамика, микроклимат, аэродинамические коэффициенты, электроосмос.

Чем выше культура и сознание народа, тем бережнее он относится к своему наследию. В настоящее время возрастает всеобщий интерес к России и ее историческим памятникам. Идет активное восстановление, строительство и реконструкция православных храмов и сооружений, построенных в XVIII–XX вв., в которых инженерные системы практически полностью разрушились в связи с целенаправленным уничтожением или отсутствием квалифицированной эксплуатации. Одной из проблем при их реконструкции становится создание и поддержание требуемых параметров микроклимата в православных храмах<sup>1</sup>.

Применение для осушения стен храмов общепринятых методов гидроизоляции в одних случаях неэффективно, а в других — невозможно из-за потери существующего исторического слоя и несущей способности стен. Для осушки ограждений культовых сооружений предлагается использовать метод электроосмотической осушки, который заключается в перемещении влаги под действием электрического и магнитного полей из конструкций фундамента и стен в направлении, обратном действию капиллярных сил.

Перенос влаги под действием неоднородного переменного электрического поля получил название электродиффузии влаги. Количество электроосмотически перенесенной жидкости  $m$ , кг, для капиллярной системы с площадью  $F$ , м<sup>2</sup>, и длиной  $l$ , м, с учетом обозначения коэффициента электроосмоса  $k_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon \zeta}{\mu}$  для времени  $\tau$ , с, можно записать в виде<sup>2</sup>:

$$m_s = \frac{k_s \Delta \varphi F \tau \rho_0}{l}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Кочев А.Г., Федорова О.В., Кочева Е.А. Кондиционирование микроклимата подклетов православных храмов // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: X междунар. науч. конф.: Тез. докл. / Волгогр. гос. архитектурно-строит. ун-т. Волгоград, 2012. С. 294–299.

<sup>2</sup> Кочев А.Г., Федорова О.В. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в подклетах православных храмов // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 10. С. 9–14.

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками конденсатора;  
 $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $F/m$ ;  
 $\zeta$  — электрохимический потенциал, В;  
 $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости,  $kg/m \cdot s$ ;  
 $\rho_0$  — плотность жидкости (коллоидного раствора),  $kg/m^3$ ;  
 $\Delta\phi$  — разность потенциалов, В.

Скорость движения жидкости при электроосмотическом переносе определяется по уравнению:

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon \Delta\phi \zeta}{\eta l}, \quad (2)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости жидкости,  $kg/m \cdot s$ .

Явление электроосмотического массопереноса увлажненных ограждающих конструкций в значительной степени обусловлено механизмом переноса влаги в этих системах. Он довольно сложен и зависит от многих факторов, таких как форма связи влаги со скелетом тела, его структурно-геометрические характеристики, влагосодержание, термодинамические условия взаимодействия тела с окружающей средой. В связи с этим в реальных конструкциях процессы происходят медленнее, чем в идеальных теоретических моделях. Учесть все факторы в теоретической модели невозможно, поэтому мы предлагаем ввести поправочный коэффициент Кп. Формулы для определения коэффициента Кп представлены в табл. 1 ( $U$  — напряжение, подаваемое на установку в строительной конструкции, В).

Таблица 1  
Значения поправочных коэффициентов Кп

Конструкция	Коэффициент Кп
Глиняный кирпич со штырями	$2 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 + 0,001 \cdot U + 0,0557$
Глиняный кирпич с пластиной и сеткой	$3 \cdot 10^{-4} \cdot U^2 + 0,0178 \cdot U + 0,4379$

Работы по устранению переувлажнения стен сводятся к монтажу системы многопарных гальванических элементов в их толще и установке оборудования по удалению воздуха с высоким влагосодержанием, которые должны осуществляться по специальному проекту. Проектирование установок заключается в определении глубины заложения штырей в толще конструкции и расстояния между парными элементами, рядами электродов и кратностью воздухообмена, а при использовании в установке не штырей, а пластины и сетки — в определении сечения и количества соединяющих их кабелей. Эти данные являются результатом теоретических подсчетов и экспериментальных исследований. За основу приняты инженерный метод расчета О.М. Фридмана [1] и полученные экспериментальные данные.

Электроосмотический метод может найти достаточно широкое практическое применение для ликвидации переувлажнения конструкций памятников древней архитектуры. При подборе оптимальной величины силы постоянного тока следует обеспечить условия, не вызывающие больших градиентов температуры и влажности. Эти мероприятия исключают образование трещин в толще материала, так как интенсивный отвод влаги может привести к появлению локальных напряженных состояний в стене, расслоению материала конструкции и порче старинных росписей. В результате электроосмотического осушения влага из толщи фильт-

руется на поверхность ограждения и испаряется в объем воздуха помещения, из которого ее удаляют системами вентиляции за счет организованного воздухообмена.

Требуемый объемный расход воздуха  $L$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , для удаления избытков влаги из помещения, определяется по формуле:

$$L = \frac{1000m_9}{(d_{yx} - d_{np})\rho_b \tau}, \quad (3)$$

где  $d_{yx}$  — влагосодержание удаляемого воздуха из помещения,  $\text{г}/(\text{кг сухого воздуха})$ ;

$d_{np}$  — влагосодержание приточного воздуха,  $\text{г}/(\text{кг сухого воздуха})$ ;

$\rho_b$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\tau$  — необходимое время сушки, ч;

$m_9$  — масса воды при осушке, кг [1].

Результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные по расходу удаляемого воздуха приведены на рис. 1.

Удаление воздуха из помещений православных храмов можно осуществлять с помощью естественной или механической вентиляции, однако, системы аэрации (естественной вентиляции) в православных храмах наиболее предпочтительны, поскольку они обладают невысокой стоимостью, а также относительно недороги при монтаже и обслуживании по сравнению с механическими. Саморегулируемость расходов естественной системы вентиляции позволяет сэкономить 20–50 % теплоты относительно аналогичных по максимальным расходам воздуха механических систем вентиляции [2]. Системы аэрации не потребляют электрической энергии.

Однако для расчета систем естественной вентиляции в православных храмах требуется знание характеристик, индивидуально определяемых для каждого культового сооружения.

Условно все проводимые исследования для определения данных величин можно разделить на две группы: 1) изучение внешней и 2) внутренней аэродинамики.

При исследовании внешней аэродинамики важную роль играют аэrodinamические коэффициенты, зависящие от геометрических параметров культовых сооружений и определяемые экспериментальным путем для каждого православного храма индивидуально.

При изучении внутренней аэродинамики следует учитывать мощность системы отопления, количество прихожан и свечей, а также расположение отопительных приборов и оконных проемов в наружных стенах храмов [3].

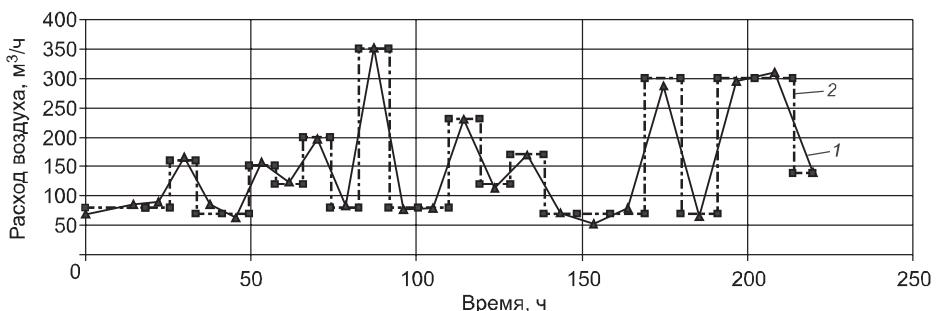


Рис. 1. Зависимость расхода воздуха от времени осушения для глиняного кирпича со штырями при напряжении 30 В

1 — теоретический расчет; 2 — экспериментальные данные

Исследование внешней аэродинамики зданий, в том числе православных храмов, производится в аэродинамических трубах, представляющих собой установки, создающие равномерный поток воздуха или газа для проведения экспериментов с целью изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.

Масштабные модели православных храмов изготавливаются в соответствии с критериями подобия по числам Эйлера  $Eu$ , Архимеда  $Ag$ , иногда Рейнольдса  $Re$  при фиксированном коэффициенте проницаемости  $k_v = 0,3\text{--}0,6$ . В местах расположения открывающихся фрамуг оконных проемов (характерные точки модели) размещаются 5-миллиметровые трубы для измерения статического давления на поверхности модели здания. Измерения для каждой точки производятся для восьми направлений воздушного потока: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ. По результатам исследований строится аэродинамическая характеристика здания в виде диаграммы распределения давлений ветра на поверхности изучаемого сооружения при различных направлениях ветрового потока. Нами были исследованы четыре православных храма [1] (рис. 2).

Полученные аэродинамические коэффициенты могут быть использованы для расчета систем естественной вентиляции как исследованных храмов, так и схожих с ними по размеру и стилю зданий.

Расчет площадей приточных и вытяжных фрамуг выполняется для преобладающих ветров, для летнего и зимнего периодов. Поскольку храмы были испытаны по восьми направлениям, результаты могут быть использованы для любых климатических зон.

Стоит отметить, что при исследовании внутренней аэродинамики православных храмов такие величины, как тепло- и влаговыделения от

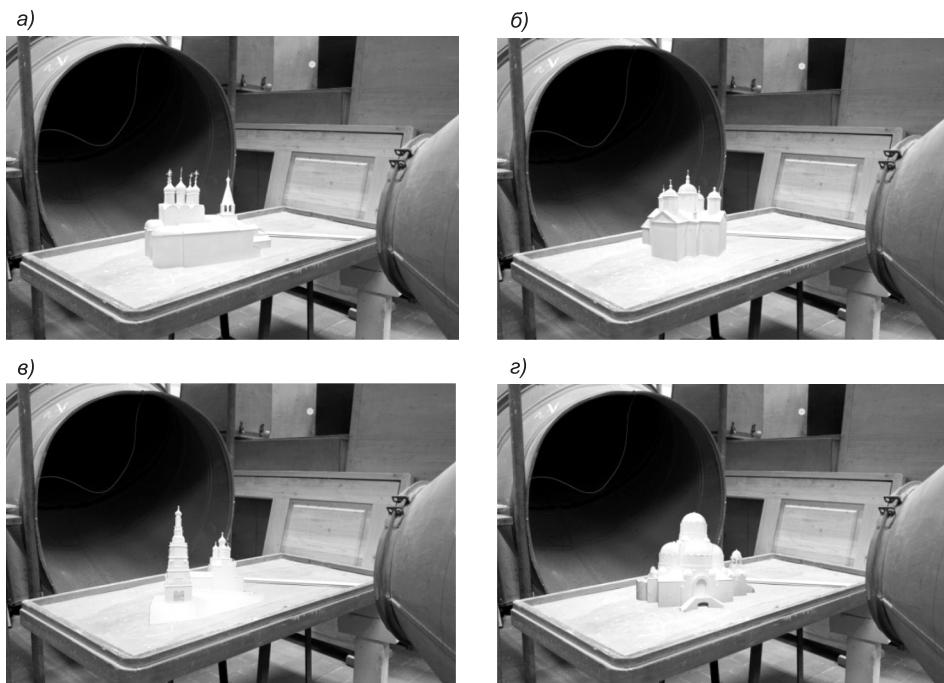


Рис. 2. Исследование внешней аэродинамики церкви Знамения Божией Матери и Жен-Мироносиц (а), Крестовоздвиженского собора (б), Рождественской церкви (в), Спасо-Преображенского собора (г)

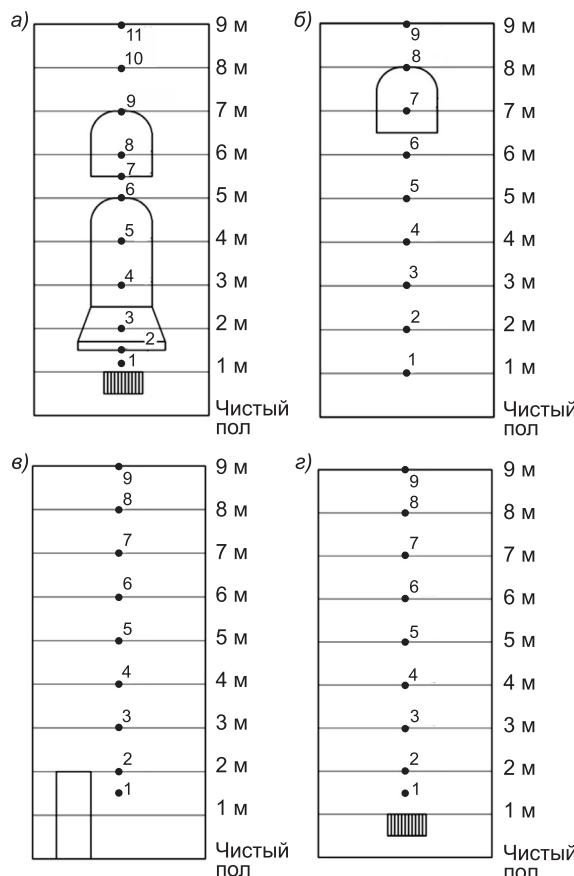
людей и свечей могут быть определены по справочной литературе [4]. Для каждого храма варьировались следующие величины:

- 1) объем молельного зала и другие геометрические параметры храма;
- 2) мощность систем отопления;
- 3) количество прихожан (минимальное, среднее, максимальное);
- 4) количество свечей (в зависимости от числа прихожан).

Неизвестными также остаются значения скоростных и температурных полей у внутренних поверхностей наружных стен. Стоит отметить, что существует четыре варианта расположения оконных проемов и отопительных приборов на наружной стене [2]: а) отопительный прибор и окно; б) только окно; в) глухая стена без отопительного прибора; г) глухая стена с отопительным прибором (рис. 3).

В характерных точках, в храме Вознесения Господня на улице Ильинской в Нижнем Новгороде были проведены замеры температурных полей внутренних поверхностей наружной стены с помощью инфракрасного термометра Raytek Raynger ST20. В начальных точках были измерены температурные и скоростные поля воздуха с помощью термоанемометра ТТМ-2 / 1-06-2А.

У стены без окон температура воздуха достигала 18,6 °С, скорость у поверхности стены принимала значения от 0,05 до 0,2 м/с. Над отопительным прибором (рядом с окном) температура воздуха составила



*Рис. 3. Варианты расположения оконных проемов и приборов на наружной стене*  
*а — отопительный прибор и окно; б — только окно; в — стена без окон; г — стена с отопительным прибором*

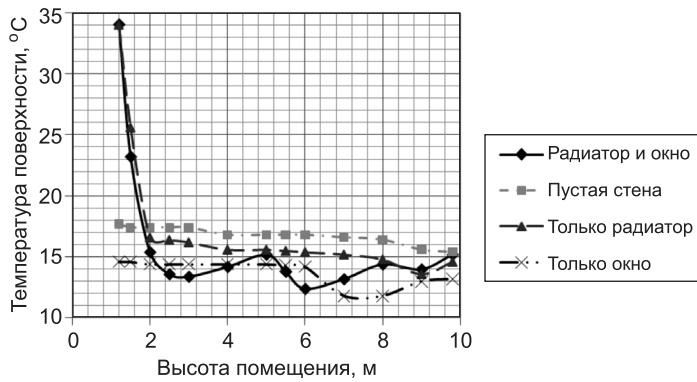


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности наружной стены в православном храме от высоты при различных вариантах расположения окон и отопительных приборов

20,1 °C, скорость воздуха — 0,14–0,32 м/с. В случае с отдельно стоящим отопительным прибором температура воздуха — 21,5 °C, скорость вдоль поверхности — 0,37 м/с.

Результаты исследования температурных полей внутренней поверхности представлены в графической форме на рис. 4. Области самых низких температур приходятся на оконные проемы. На небольшом расстоянии выше отопительного прибора (0,5 м) происходит резкое падение температуры до 13,4–15,8 °C или даже ниже, как в случае со стеной без окон.

На основе теоретических и экспериментальных исследований была разработана инженерная методика для расчета систем естественной вентиляции. Условно методику по расчету систем аэрации можно разделить на два этапа:

1. Определение влаги, вытесненной из наружных ограждающих конструкций, и выделяющейся теплоты от отопительных приборов, людей и свечей.

2. Вычисление площади приточных и вытяжных фрамуг на основании расчета количества удаляемого воздуха системами аэрации (по теплопотерям или по влаговыделению выбираем большее).

Тепловой баланс составляется для трех расчетных периодов года: холодного, переходного и теплого [2, 4].

Наиболее распространенным является расчет аэрации при совместном действии теплоты и ветра ( $0,5P_p \leq P_{dv} \leq 10P_p$ ).

1. Теплопотери определяются исходя из теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий.

2. Для каждого периода года рассматривается минимальное (10 %), среднее (50 %) и максимальное (100 %) количество прихожан от общей вместимости храма.

3. Считаем, что 50 % прихожан женщины, 30 % мужчины и 20 % дети.

4. Количество свечей для каждого периода года и число прихожан подсчитываются с помощью справочных данных [4]. Количество теплоты, выделяемое от свечей, определим по формуле:

$$Q_{cb} = Q_p^h G_{cb}. \quad (4)$$

5. Общая мощность системы отопления для холодного периода года, компенсирующая теплопотери (1 пункт).

Таблица 2

**Значения площадей приточных и вытяжных фрамуг в зависимости от периода года и количества прихожан**

Период	Количество прихожан					
	минимальное (10 %)		среднее (50 %)		максимальное (100 %)	
	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{yx}}$	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{yx}}$	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{yx}}$
Летний	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{l}}$	$F_{\text{yx.мин}}^{\text{l}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{l}}$	$F_{\text{yx.ср}}^{\text{l}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{l}}$	$F_{\text{yx.макс}}^{\text{l}}$
Переходный	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{n}}$	$F_{\text{yx.мин}}^{\text{n}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{n}}$	$F_{\text{yx.ср}}^{\text{n}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{n}}$	$F_{\text{yx.макс}}^{\text{n}}$
Зимний	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{з}}$	$F_{\text{yx.мин}}^{\text{з}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{з}}$	$F_{\text{yx.ср}}^{\text{з}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{з}}$	$F_{\text{yx.макс}}^{\text{з}}$

Примечание.  $F_{\text{пр}}$  — общая площадь приточных фрамуг,  $F_{\text{yx}}$  — общая площадь вытяжных фрамуг.

## 6. Суммарные теплопотери:

$$\Sigma Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{св}} + Q_{\text{от}}. \quad (5)$$

## 7. Величина теплоизбытков, удаляемых аэрацией:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{аэр}} = \Sigma Q - Q_{\text{пот}}. \quad (6)$$

С учетом меняющегося количества прихожан и климатических особенностей Российской Федерации, результаты данного расчета в общем виде могут быть сведены в табл. 2.

Разработанные способы рационального сочетания электроосмотического осушения ограждений и регулируемого воздухообмена позволяют сократить срок осушения переуважненных ограждающих конструкций до равновесной влажности в пределах 4–18 мес. и сохранить исторические слои и росписи. Саморегулируемость аэрационного воздухообмена создает допустимые метеорологические условия в храмах, что обеспечивает сохранность памятников истории и архитектуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Фридман, О.М. Электроосмотический метод ликвидации сырости стен зданий [Текст] / О.М. Фридман. — М. : Стройиздат, 1971. — 95 с.
- Кочев, А.Г. Теоретические и экспериментальные исследования влияния внешних аэродинамических характеристик на параметры микроклимата в православных храмах [Текст] / А.Г. Кочев, М.М. Соколов // Приволжский науч. журн. / Нижегородск. гос. архитектурно-строит. ун-т. — 2011. — № 1 (17). — С. 58–65.
- Кочев, А.Г. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов [Текст] / А.Г. Кочев, М.М. Соколов // Приволжский науч. журн. / Нижегородск. гос. архитектурно-строит. ун-т. — 2012. — № 2 (22). — С. 78–85.
- Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : АВОК Стандарт-2-2004. — Введ. 2004-06-09. — М. : АВОК, 2004. — 14 с. : ил.

**КОЧЕВ Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф.**

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
ФЕДОРОВА Ольга Владимировна, канд. техн. наук, ст. препод.*

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
СОКОЛОВ Михаил Михайлович, асп., ст. препод.*

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 14.01.13

**Kochev Alexey Gennadievich**, doctor of technical sciences, professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Fedorova Olga Vladimirovna**, candidate of technical sciences, senior lecturer, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia  
**Sokolov Mikhail Mikhailovich**, post-graduate student, senior lecturer, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **CALCULATION OF AIR EXCHANGE FOR DRYING STRUCTURES AND AERATION IN RELIGIOUS BUILDINGS**

In the article information on the maintenance of the required parameters of the microclimate in the Orthodox temples were submitted. The data on the aerodynamics of the Orthodox churches and their moistened enclosing structures, which dried by electroosmotic, which based on the results of theoretical and experimental studies were presented.

**Key words:** orthodox temples, external aerodynamics, microclimate, the aerodynamic coefficients, electroosmotic.

### **REFERENCES**

1. Friedman, O.M. Electroosmotic method of dampness elimination of walls of buildings [Text] / O.M. Friedman. — M. : Stroyizdat, 1971. — 95 p.
  2. Kochev, A.G. Theoretical and experimental studies of the influence of external parameters on the aerodynamic characteristics of the microclimate in the Orthodox temples [Text] / A.G. Kochev, M.M. Sokolov // Volga scientific j. / Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. — 2011. — N 1 (17). — P. 58–65.
  3. Kochev, A.G. Physical and mathematical description of the natural convection in the premises of the Orthodox temples [Text] / A.G. Kochev, M.M. Sokolov // Volga scientific j. / Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. — 2012. — N 2 (22). — P. 78–85.
  4. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning : AVOK Standard-2-2004. — Enter. 2004-06-09. — M. : AVOK, 2004. — 14 p.: ill.
-

УДК 697.112.2.001.24

О.Д. САМАРИН, Ю.Д. ФЕДОРЧЕНКО, С.С. АЗИВСКАЯ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА  
ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований температуры воздуха в помещении жилого здания, оборудованного автоматизированной системой воздушного отопления. Проведен анализ полученных данных, позволивший подтвердить теоретические зависимости для изменения температуры при переменных тепловых воздействиях в условиях автоматизации климатических систем.

**Ключевые слова:** теплопоступления, климатические системы, автоматическое регулирование, коэффициент передачи, натурные замеры.

В работе [1] была предложена аналитическая идентификационная модель, описывающая изменение температуры воздуха в помещении  $\Delta t_{\text{в}}$ , °C, под влиянием возмущающего теплового воздействия  $Q_{\text{возм}}$ , Вт, при автоматизации обслуживающих помещение систем вентиляции и кондиционирования воздуха (В и КВ):

$$\Delta t_{\text{в}} \approx \frac{0,9Q_{\text{возм}}K_{\text{пом}}}{\left(\frac{T_{\text{пом}}}{\tau}\right)^{2/3} + 0,9K_{\text{пом}}K_{\text{рег}}} \quad (1)$$

Здесь  $K_{\text{пом}}$  — условный коэффициент передачи помещения, К/Вт;  $T_{\text{пом}}$  — условная постоянная времени помещения, с;  $\tau$  — интервал времени, с, с момента начала появления теплопоступлений. По своему физическому смыслу  $K_{\text{пом}}$  показывает, на сколько градусов изменяется температура в помещении за характерное время порядка  $T_{\text{пом}}$  при единичном тепловом возмущении. Параметры  $T_{\text{пом}}$  и  $K_{\text{пом}}$  подбираются исходя из наилучшего совпадения расчетных и натурных данных. Величина  $K_{\text{рег}}$ , Вт/К, представляет собой коэффициент передачи системы автоматического регулирования (САР), показывающий изменение теплового потока от системы В и КВ при отклонении температуры внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$  от уставки на 1 °C. При заданном уровне  $\Delta t_{\text{в}}$  выражение (1) можно использовать для подбора характеристик регулятора через требуемое значение  $K_{\text{рег}}$ .

Изменение теплоизбыток с течением времени можно аппроксимировать зависимостью, отражающей особенности суточных колебаний основных составляющих теплового баланса [2] — теплопоступлений бытовых, от освещения, солнечной радиации и электробытовых приборов. Ее можно записать в виде:

$$Q_{\text{возм}} = 4Q_{\text{max}}(\tau / 12)(1 - \tau / 12), \quad (2)$$

где  $Q_{\text{max}}$  — максимальное значение теплоизбыток, Вт. Иначе говоря, предполагается, что в течение активной половины суток величина  $Q_{\text{возм}}$

сначала возрастает от нуля до  $Q_{\max}$ , а затем убывает до нуля по параболическому закону и продолжает быть равной нулю за оставшиеся 12 ч. Значение  $Q_{\max}$  подбирается исходя из наилучшего совпадения расчетных и измеренных значений  $t_b$ . Время  $\tau$  при использовании формулы (2) нужно подставлять в часах.

Целью настоящей работы является проверка адекватности модели (1)–(2) в натурных условиях. Для этого в период с 17 по 31 октября 2012 г. были проведены натурные исследования нестационарного теплового режима помещения индивидуального жилого дома (коттеджа), расположенного в Московской области и оборудованного автоматизированной системой механической приточной вентиляции, выполняющей также функции воздушного отопления. При этом замеряли температуры воздуха наружного и внутреннего в характерных точках помещения, в том числе вдали от остекления и на его поверхности, ориентированной на юг, а также непосредственно у задатчика САР. Измерение температуры поверхности светопрозрачного ограждения необходимо для определения интенсивности теплопоступлений от солнечной радиации. Интервал времени для замеров был выбран таким образом, чтобы охватить начало отопительного периода, когда еще велик суточный ход температуры наружного воздуха и достаточно значительны колебания теплопоступлений от солнечной радиации через заполнения световых проемов, а значит, в помещении наблюдаются существенные периодические тепловые возмущения.

В процессе исследования в качестве средств измерений использовался комплект (6 шт.) датчиков температуры «Термохрон» DS1921G-F5 (США) с чувствительностью 0,5 °C. Абсолютная погрешность регистрации температуры составляет  $\pm 1$  °C, относительная находится в пределах  $\pm 5$ –7 %. Запись показаний производилась каждые 15 мин. Температура воздуха в помещении измерялась при помощи четырех датчиков, расположенных на высоте 1,5 м от пола и на расстоянии 1 м от наружной стены и вычислялась как среднее арифметическое из показаний этих датчиков.

Поскольку модель (1)–(2) получена путем сопоставления приближенного аналитического решения и результатов вычислений по программе для ЭВМ, реализующей численную модель процессов в помещении, обслуживаемом автоматизированными климатическими системами, проверку можно осуществлять путем сравнения натурных замеров как с формулами (1)–(2), так и с численными расчетами, что и представлено на рис. 1. Необходимые для работы программы геометрические размеры помещения и конструкции его ограждений принимались по чертежам и на основании натурных замеров, а теплофизические характеристики строительных материалов — по приложению Д СНиП 23-02-2003. Для сопоставления с данными 18 октября 2012 г. было принято  $Q_{\max} = 3750$  Вт, а для 31 октября —  $Q_{\max} = 6250$  Вт.

Коэффициент передачи САР учитывался на минимальном уровне  $K_{\text{пер}} = 14$  Вт/К. Такое значение получается, поскольку в рассматриваемом здании регулируемая система вентиляции совмещена с воздушным отоплением, а расчетные теплопотери помещения при  $t_h = -28$  °C по СНиП 23-01-99\* составляют около 670 Вт. Поэтому в отсутствие теплопоступлений, если контролируемое значение  $t_b = +20$  °C по ГОСТ 30494-96\*, при его отклонении на 1 °C теплопотери изменятся на  $670 \cdot 1 / (20+28) = 14$  Вт, и именно на такую величину должен корректироваться тепловой поток от системы, что по определению и требует значения  $K_{\text{пер}} = 14$  Вт/К.

Легко видеть, что результаты численных расчетов достаточно хорошо соответствуют данным натурных замеров, как в отношении качественного поведения зависимости  $t_{\text{в}}$  от времени, так и с точки зрения количественного совпадения. Во всяком случае, расхождение кривых на графиках, как правило, является величиной того же порядка, что и погрешность измерительных приборов.

Следовательно, использованная численная модель адекватно отражает действительные тепловые процессы в системах В и КВ и обслуживающих их САР, а полученные на ее основе выводы обладают высокой степенью достоверности. Принятая аппроксимация поведения  $Q_{\text{возм}}$  (2) весьма правдоподобно описывает реальный характер изменения теплоизбыток, и такой зависимостью можно пользоваться при создании идентификационных моделей САР.

Заметим, что количественную оценку соответствия экспериментальных и теоретических результатов можно осуществить и путем сопоставления с упрощенным аналитическим решением. В частности, из [3] можно получить, что при автоматическом регулировании систем В и КВ справедливо соотношение:

$$\frac{A_{Q_{\text{возм}}}}{A_{t_{\text{в}}}} \approx 0,9(K_{\text{пер}} + P_{\text{пом}}), \quad (3)$$

где  $A_{Q_{\text{возм}}}$  и  $A_{t_{\text{в}}}$  — амплитуды колебаний  $Q_{\text{возм}}$ , Вт, и  $t_{\text{в}}$ , °C;  $P_{\text{пом}}$  — показатель теплопоглощения помещения, Вт/К. Для рассматриваемого помещения по данным расчета, использующего имеющиеся размеры и теплотехнические характеристики ограждающих конструкций [4],  $P_{\text{пом}} = 368$  Вт/К, поэтому  $0,9(K_{\text{пер}} + P_{\text{пом}}) = 344$  Вт/К. В качестве  $A_{t_{\text{в}}}$  можно взять максимальное отклонение  $t_{\text{в}}$  от исходного уровня и тогда для графика на рис. 1, а  $A_{t_{\text{в}}} = 6,5$  °C, а на рис. 1, б — уже 8 °C. Следовательно, теоретические значения  $A_{Q_{\text{возм}}}$ , под воздействием которых должны наблюдаться такие  $A_{t_{\text{в}}}$ , из выражения (3) должны быть равны соответственно  $6,5 \cdot 344 = 2236$  и  $8 \cdot 344 = 2752$  Вт. Поскольку ранее было принято, что

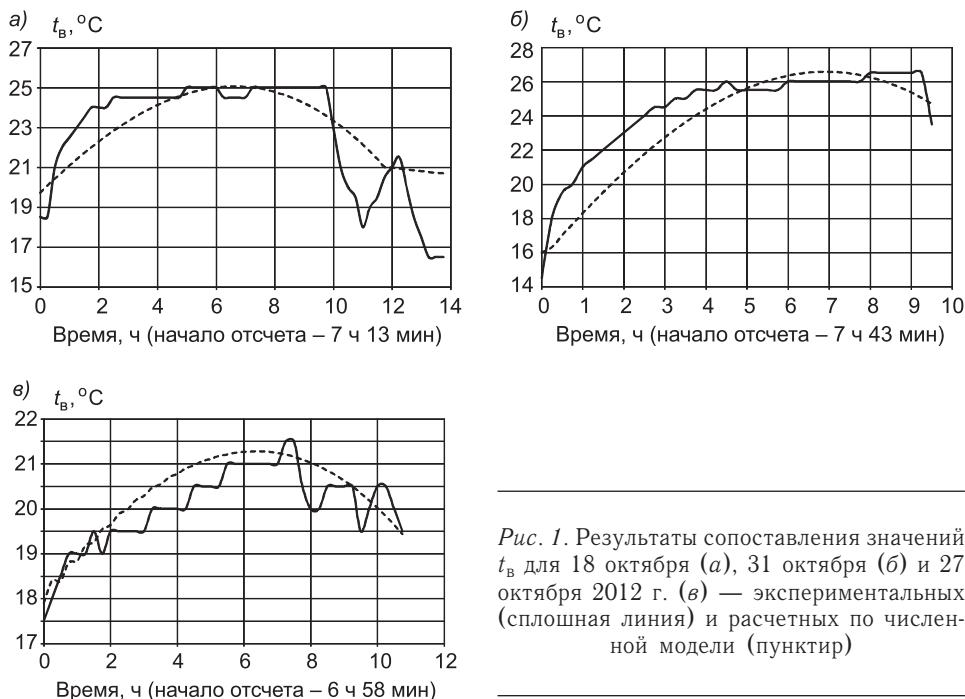


Рис. 1. Результаты сопоставления значений  $t_{\text{в}}$  для 18 октября (а), 31 октября (б) и 27 октября 2012 г. (в) — экспериментальных (сплошная линия) и расчетных по численной модели (пунктир)

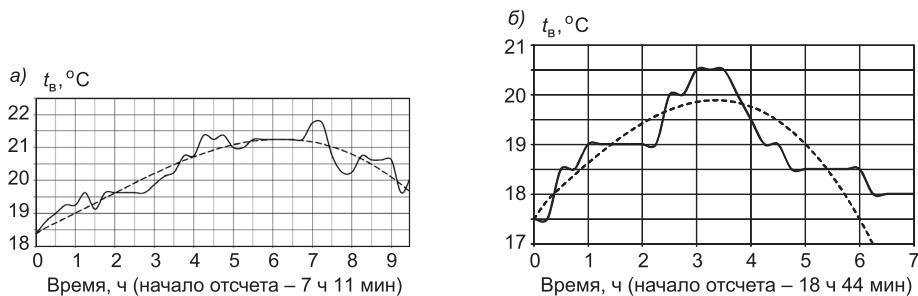


Рис. 2. Результаты сопоставления значений  $t_B$  при сравнении экспериментальных данных (сплошная линия) и аналитической модели (пунктир) для 27 октября (а) и 25 октября 2012 г. (б)

теплопоступления действуют только в течение 12 ч в сутки из 24, очевидно, что сравнивать  $A_{Q_{\text{возм}}}$  нужно с величиной  $Q_{\max}/2$ . Тогда в первом случае  $Q_{\max}/2 = 1875$  Вт, и его расхождение с оценкой по формуле (3) составляет  $-16\%$ , а во втором  $Q_{\max}/2 = 3125$  Вт с расхождением  $+14\%$ , что с учетом точности исходных данных, численных расчетов и аналитических зависимостей можно признать вполне удовлетворительным.

Для сравнения на рис. 1, в показано сопоставление с натурными замерами для 27 октября 2012 г., когда осуществлялось активное регулирование системы воздушного отопления при  $K_{\text{пер}} = 250$  Вт/К. Величина  $Q_{\max}$  при этом считалась равной 3750 Вт, как и 18 октября. В данном случае по графику отклонение  $A_{t_B} = 4$  °C, а  $0,9(K_{\text{пер}} + P_{\text{ном}}) = 556$  Вт/К. Отсюда по выражению (3) теоретическое значение  $A_{Q_{\text{возм}}}$  получается на уровне  $4 \cdot 556 = 2225$  Вт, и  $Q_{\max}/2 = 1875$  Вт отличается от него на те же  $-16\%$ , что и для 18 октября.

На рис. 2, а представлено сравнение тех же самых натурных замеров с аналитической моделью (1)–(2). Значения параметров помещения были в данном случае приняты на уровне  $T_{\text{ном}} = 600$  с,  $K_{\text{ном}} = 0,005$  К. Несложно заметить, что  $T_{\text{ном}}$  оказывается величиной того же порядка, что и  $1/P_{\text{ном}} = 1/368 = 0,0027$  К/Вт. Для наилучшего совпадения результатов при расчете  $Q_{\text{возм}}$  по формуле (2) вместо  $\tau$  следует использовать  $\tau + \Delta\tau$ , где  $\Delta\tau$  — запаздывание изменения  $t_B$  относительно  $Q_{\text{возм}}$  вследствие теплоинерционности помещения. Величина  $\Delta\tau$  в рассматриваемом примере оказывается равной 90 мин, т.е. 5400 с. Аналогичный результат для 25 октября изображен на рис. 2, б.

Значения  $T_{\text{ном}}$ ,  $K_{\text{ном}}$  и  $\Delta\tau$  в данном случае те же самые, поскольку это постоянные характеристики помещения. Однако максимальное соответствие расчета и эксперимента при этом будет соблюдаться при несколько иной форме возмущающего теплового воздействия — с более резким его изменением. Для этого в выражении (2) интервал времени, в течение которого возрастает и убывает  $Q_{\text{возм}}$ , вместо 12 нужно считать равным 7,5 ч.

Таким образом, результаты сопоставления замеров как с теоретическим, так и с численным решением свидетельствуют о достоверности всех трех подходов к решению задачи о нестационарном тепловом режиме помещения, обслуживаемого автоматизированными климатическими системами, и о возможности использования разработанных аналитических и численных моделей при создании адаптивных САР для систем обеспечения микроклимата зданий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин, О.Д. О построении идентификационной модели процессов управления микроклиматом помещения [Текст] / О.Д. Самарин, Ю.Д. Федорченко // Энергосбережение и водоподготовка. — 2012. — № 3. — С. 64–66.
2. Кувшинов, Ю.Я. Основы обеспечения микроклимата зданий [Текст] / Ю.Я. Кувшинов, О.Д. Самарин. — М. : Изд-во АСВ, 2012. — 200 с.
3. Самарин, О.Д. О численном расчете коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений при автоматизации систем обеспечения микроклимата [Текст] / О.Д. Самарин, С.С. Азивская // Инж.-строит. журн. — 2011. — № 5. — С. 31–33.
4. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. — М. : Выш. шк., 1982. — 415 с.

*САМАРИН Олег Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.  
Московский государственный строительный университет  
ФЕДОРЧЕНКО Юрий Дмитриевич, асп.  
Московский государственный строительный университет  
АЗИВСКАЯ Светлана Сергеевна, асп.  
Московский государственный строительный университет*

Получено после доработки 28.01.13

**Samarin Oleg Dmitrievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia  
**Fedorchenko Yuryi Dmitrievich**, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia  
**Azivskaya Svetlana Sergeevna**, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

### THE EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL REGIME OF A ROOM UNDER AUTOMATION OF CLIMATIC SYSTEMS

In the paper the outcomes of experimental researches of air temperature in the room of a residential building equipped by the automated air heating system are reviewed. The analysis of the obtained data which has permitted to confirm idealized relations for temperature changing under variable thermal exposures under automation of climatic systems is conducted.

**Key words:** heat ingress, climatic systems, automatic control, transmission factor, full-scale measurements.

### REFERENCES

1. Samarin, O.D. On design of identification model of control processes of room microclimate [Text] / O.D. Samarin, Yu.D. Fedorchenko // Energy saving and water treatment. — 2012. — N 3. — P. 64–66.
2. Kuvshinov, Yu.Ya. The foundations of building microclimate provision [Text] / Yu.Ya. Kuvshinov, O.D. Samarin. — M. : ASV Publ., 2012. — 200 p.
3. Samarin, O.D. On numerical calculation of an assimilation factor of variable heat ingress at automation of microclimate systems [Text] / O.D. Samarin, S.S. Azivskaya // Magazine of civil engineering. — 2011. — N 5. — P. 31–33.
4. Bogoslovsky, V.N. Building thermal physics [Text] / V.N. Bogoslovsky. — M. : Higher school Publ., 1982. — 415 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

**УДК 621.542.001.4**

**Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.В. ГРУЗИН, А.С. ДЕДОВ,  
А.В. КУЛИКОВ, Р.В. ЧИЧКАНОВ**

## ПНЕВМОУДАРНЫЕ ДРОССЕЛЬНЫЕ И ДРОССЕЛЬНО-БЕЗЗОЛОТНИКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ РАСХОДОМ ВОЗДУХА КАМЕРЫ ХОЛОСТОГО ХОДА

Рассматривается пневмоударный дроссельно-бесклапанный механизм с управляемым расходом воздуха камеры холостого хода, для которого воздухораспределение осуществляется посредством золотника, совмещенного с ударником ступенчатого типа с центральным каналом.

**Ключевые слова:** пневматический механизм, ударник, давление воздуха, распределительный стержень, корпус, выпуск, выпуск, инструмент, камера рабочего хода, камера холостого хода.

**Введение.** Известные дроссельные пневмоударные механизмы [1] обладают повышенным непроизводительным расходом воздуха, который за время сообщения камер рабочего и холостого ходов с атмосферой может достичь 50 % от суммарного расхода. При этом доли непроизводительных расходов воздуха для каждой из камер практически одинаковы и составляют в пересчете, например, на удельный расход воздуха по  $0,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$  от общего значения  $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$ .

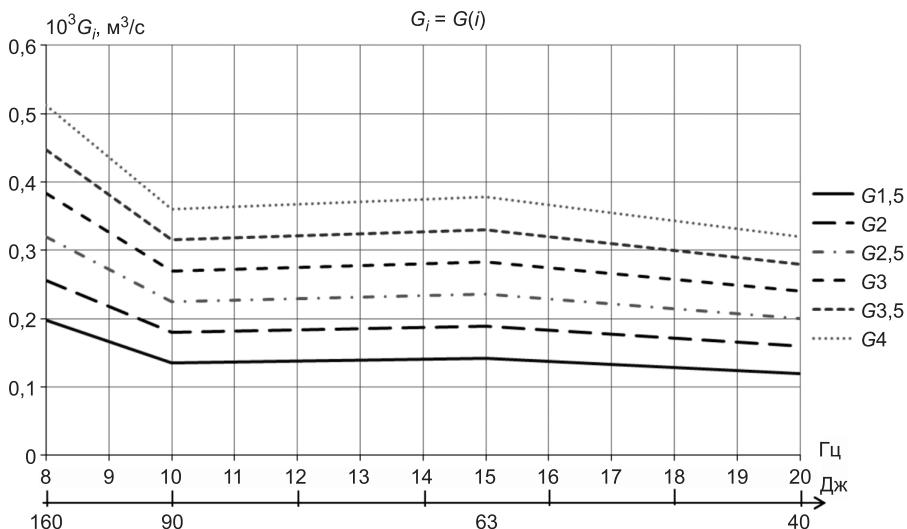
**Постановка вопроса для дроссельного пневмоударного механизма.** Для дроссельного пневмоударного механизма общий секундный расход воздуха  $G_\Sigma, \text{ м}^3/\text{с}$ :

$$G_\Sigma = q_v i A = q_v N, \quad (1)$$

где  $q_v$ ,  $i$ ,  $A$ ,  $N$  — соответственно удельный расход воздуха, частота и энергия единичного удара, ударная мощность.

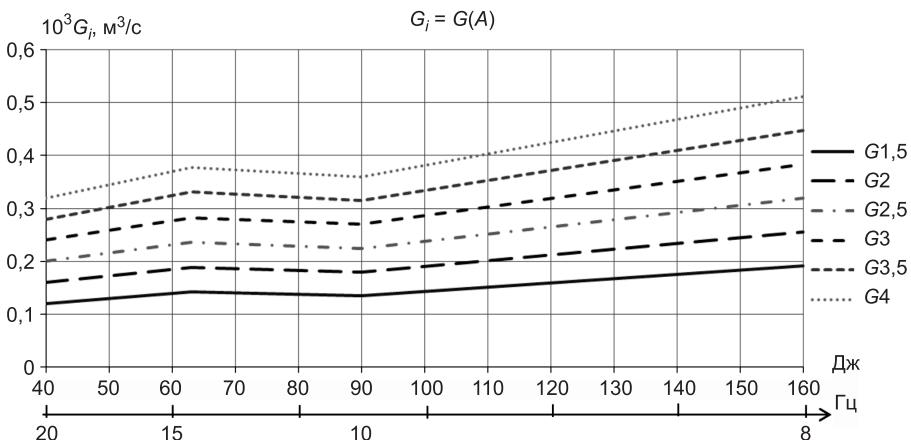
Таким образом, подсчитанный суммарный расход воздуха для пневматических ломов с дроссельным воздухораспределением с парными параметрами ( $iA$ )  $\equiv (\text{Гц} \cdot \text{Дж}) \equiv (15 \cdot 63)$ ,  $(10 \cdot 90)$  и  $(8 \cdot 160)$  [2] при  $q_v = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$  составляет соответственно 0,0331; 0,0315 и  $0,0448 \text{ м}^3/\text{с}$ . Изменения  $G_i$  ( $G_i = G(A)$ ,  $G_i = G(i)$ ) характеризуются сложной зависимостью, например, в виде, представленном графиками на рис. 1, 2, где индекс при  $G$  указывает на удельный расход воздуха: (1,5; 2; 2,5; 3, 3,5; 4)  $\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт})$ .

Суммарный расход воздуха, приходящийся на один цикл ( $q_i = q(N)$ ), также имеет сложный закон изменения и составляет для пар  $(15 \cdot 63)$ ,



$i, \text{Гц}$	8	10	15	20
$10^3 G, \text{м}^3/\text{с}$				
$G_{1,5}$	0,198	0,135	0,142	0,12
$G_2$	0,256	0,180	0,189	0,16
$G_{2,5}$	0,320	0,225	0,236	0,20
$G_3$	0,384	0,270	0,283	0,24
$G_{3,5}$	0,448	0,315	0,330	0,28
$G_4$	0,512	0,360	0,378	0,32

Puc. 1



$A, \text{Дж}$	40	63	90	160
$10^3 G, \text{м}^3/\text{с}$				
$G_{1,5}$	0,12	0,142	0,135	0,192
$G_2$	0,16	0,189	0,180	0,256
$G_{2,5}$	0,20	0,236	0,225	0,320
$G_3$	0,24	0,283	0,270	0,384
$G_{3,5}$	0,28	0,331	0,315	0,448
$G_4$	0,32	0,378	0,360	0,512

Puc. 2

(10 · 90) и (8 · 160) соответственно 0,00221; 0,00315 и 0,00560 м<sup>3</sup>/ц или в литрах 0,221; 0,315 и 0,560 л/ц. Графические зависимости представлены на рис. 3, где индекс при  $q$  указывает на удельные расходы воздуха: (1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4) · 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>/(с · Вт).

Обычно наиболее протяженные воздухоподводящие каналы выполняются для камер холостого хода, что предопределяет значительные местные сопротивления, более низкие коэффициенты расходов в сравнении с воздухоподводящими каналами камеры рабочего хода. Учитывая, что камера холостого хода при постоянном дроссельном впуске находится существенно большее время цикла сообщенной с атмосферой через выпускные каналы, целесообразно исключить непроизводительный расход воздуха со стороны этой камеры.

**Предложения по совершенствованию.** Выполнение дросселя впуска необходимо заменить на клапанное или золотниковое воздухораспределение. Поскольку подвижные воздухораспределители в виде отдельных деталей: клапана или золотника [3], при отрицательных температурах окружающего воздуха (в зимний период) работают нестабильно из-за примерзания клапана или золотника к посадочным седлам распределительных коробок, предпочтительно их функциями наделять ударник, обеспечивая тем самым только одну подвижную деталь в системе воздухораспределения пневмоударного механизма.

Таким образом, воздухораспределительные функции постоянно открытого дросселя впуска воздуха в камеру рабочего хода, обеспечивают гарантированный запуск пневмоударного механизма. Воздухораспределение для камеры холостого хода можно осуществить посредством подвижного клапана и ударника ступенчатого типа с центральным каналом, взаимодействующим с поршневой частью неподвижного стержня, закреп-

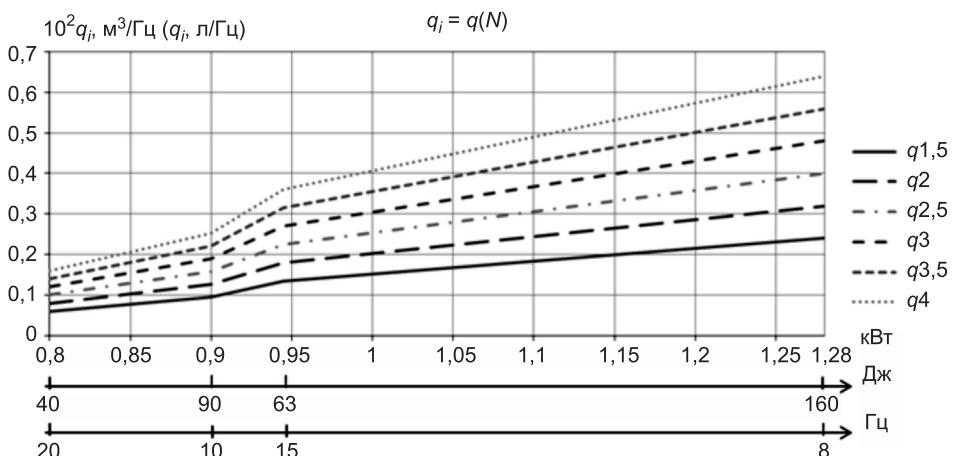


Рис. 3

ленного относительно корпуса пневмоударного механизма, который следует обозначать как дроссельно-беззолотниковый. Управление впуском воздуха в камеру рабочего хода осуществляется постоянно открытым дросселием, а в камеру холостого хода — неподвижным клапаном, периодически перекрываемом ударником.

При таком техническом решении представляется возможным сократить удельный расход воздуха для пневматических ломов [2] до  $2,65 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$ . В перспективе, оставляя геометрические размеры воздухоподводящих каналов достаточными для осуществления заданных параметров по частоте и энергии единичного удара, возможно удельный расход воздуха довести до  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$ , что будет соответствовать нормам лучших образцов пневмоударных машин отечественного и зарубежного производства.

При оценке экономичности пневматических машин ударного действия по расходу воздуха машины, имеющие более высокие частоты ударов при одинаковых величинах энергий единичного удара, уступают машинам с меньшей частотой при низком расходе воздуха. Предварительные оценки расхода воздуха в зависимости от частоты ударов, выполненные для указанных пар параметров ломов пневматических [2], показывают при одинаковых удельных расходах  $q_{\text{ц}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$  следующие значения расходов воздуха, что представляется корректной оценкой экономичности. Так, для частоты ударов 8 Гц у ломов 63, 90 и 160 Дж расходы воздуха составляют  $1,76 \cdot 10^{-3}$ ;  $2,52 \cdot 10^{-3}$  и  $4,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; для частоты ударов 10 Гц —  $2,20 \cdot 10^{-3}$ ;  $3,15 \cdot 10^{-3}$  и  $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; для частоты ударов 15 Гц —  $3,31 \cdot 10^{-3}$ ;  $4,72 \cdot 10^{-3}$  и  $8,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; для частоты ударов 20 Гц —  $4,41 \cdot 10^{-3}$ ;  $6,3 \cdot 10^{-3}$  и  $11,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом, для лома с энергией удара 90 Дж расход воздуха за цикл для частот 8, 10, 15 и 20 Гц составит  $0,315 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{цикл}$ .

**Выводы.** 1. Оценка экономичности по расходу воздуха за цикл более предпочтительна, нежели за секунду, поскольку энергия удара также определяется за цикл.

2. При необходимой и достаточной величине энергии удара увеличение производительности можно достичь за счет повышения частоты ударов и расхода воздуха, при экономичности по расходу воздуха за цикл при  $q_{\text{ц}} = \text{const}$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
2. ТУ 22-1.020.49-87. Молотки и ломы ручные пневматические строительные [Текст]. — М. : Изд-во стандартов, 1987.
3. А б р а м е н к о в, Э.А. Результаты экспериментального исследования надежности запуска пневмоударных механизмов в условиях отрицательных температур [Текст] / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов, Г.Ф. Тимофеев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1987. — № 9. — С. 107–110.

*АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ГРУЗИН Алексей Владимирович, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, ст. препод.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*КУЛИКОВ Андрей Викторович, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ЧИЧКАНОВ Роман Владимирович, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 11.01.13

**Abramenkov Dmitry Eduardovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Abramenkov Eduard Alexandrovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gruzin Alexey Vladimirovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Dedov Alexey Sergeevich**, candidate of technical sciences, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kulikov Andrey Viktorovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Chichkanov Roman Vladimirovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **PNEUMATIC HAMMER THE THROTTLE AND THROTTLE-NO SLIDE MECHANISM WITH CONTROLLED AIR FLOW CHAMBER IDLE**

Considered air percussion avalvular throttling mechanism with controlled air flow chamber idle for which air distribution is carried out through the valve, combined with drummer step type with a central channel.

**Key words:** pneumatic mechanism, drummer, air pressure, distributing rod housing, intake, exhaust, tool, camera power stroke, the camera idle.

### REFERENCES

1. Abramenkov, E.A. Pneumatic machinery machines Impact: butterfly, inkjet, no slide, valveless [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : Publ. House of the NSU, 1993. — 430 p.
2. TU 22-1.020.49-87. Crowbars and hammers hand, pneumatic construction [Text]. — M. : Standards Publ. House, 1987.
3. Abramenkov, E.A. Experimental results reliability launch air percussion mechanism in freezing temperatures [Text] / E.A. Abramenkov, A.G. Bogachenkov, V.P. Bryzgalov, G.F. Timofeev // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1987. — N 9. — P. 107-110.

## **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ**

**УДК 504.054:556**

**А.Н. МАХИНОВ, М.Н. ШЕВЦОВ, С.В. МУЗЫКО, А.А. ЗБАРАЦКИЙ,  
Н.Ю. АКИМЕНКО, Г.Г. ВИДИЩЕВА**

### **ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

Освещены проблемы водных ресурсов горнодобывающих районов Дальнего Востока России и Восточного Казахстана. Представлены результаты анализа материалов многолетних наблюдений состояния водных ресурсов, выполненных с участием авторов. Данна оценка влияния хвостохранилищ на состояние природных экосистем. Приведена разработанная модель процессов переноса загрязняющих веществ в хвостохранилищах в результате фильтрации. С использованием данной модели оценена миграция меди на конкретном примере Солнечного ГОКа в Хабаровском крае.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, горнодобывающие предприятия, хвостохранилища, химическое загрязнение, пульпа, осадок, мониторинг, математическая модель, экосистема.

Многие предприятия горнодобывающей промышленности являются источниками значительного загрязнения поверхностных и подземных вод [1]. Загрязнение водных объектов приводит к снижению их биосферных функций и экологического значения в результате поступления вредных веществ и ухудшения качества воды. Самоочищающая способность горных рек не высока, что обуславливает необходимость уделять большое внимание оценке динамики качества поверхностных вод в районах добычи и переработки полезных ископаемых и разработке мер по восстановлению естественного режима водных объектов.

Проблема, связанная с комплексной оценкой состояния водных ресурсов территории при узконаправленной хозяйственной деятельности, к которой относится разработка месторождений полезных ископаемых, еще далека от своего решения. Водные ресурсы горнодобывающих районов обычно формируются за счет транзитного стока из вышерасположенных частей речных бассейнов. При этом гидрологические посты на водотоках и регулярные наблюдения за качеством воды в достаточном объеме отсутствуют. Разработка месторождений открытым способом приводит к поступлению повышенной концентрации, по сравнению с природным фоном, взвешенных веществ и растворенного материала в виде различных соединений серы, фосфора и азота и др. Сброс технических вод в реки с высоким содержанием взвешенных частиц способствует накоплению тонких фракций в русле, изменению pH и других показателей качества воды.

---

**© Махинов А.Н., Шевцов М.Н., Музыко С.В., Збарацкий А.А., Акименко Н.Ю.,  
Видищева Г.Г., 2013**

Многолетние наблюдения за динамикой качества поверхностных вод в районах горнодобывающей деятельности Дальнего Востока России выявляют тенденцию к росту их загрязненности. Увеличивается количество случаев высокого уровня загрязнения воды, отмечаются экстремально высокие загрязнения водных объектов по отдельным показателям качества воды. Наиболее распространенными загрязняющими веществами в поверхностных водах являются фенолы, легко окисляемые органические вещества, соединения меди, цинка, оксиды железа, аммонийный и нитратный азот и др.

Анализ материалов показывает, что загрязнение поверхностных вод происходит в основном за счет механического и химического поступлений веществ. В незначительной степени имеет место и тепловое загрязнение.

**Механическое загрязнение.** Происходит при повышении содержания механических примесей в воде и свойственно в основном поверхностным видам загрязнений. Оно обусловлено поступлением в поверхностные водотоки песчано-глинистых частиц, нерастворимых коллоидных тонкодисперсных фракций.

Содержание взвешенного вещества в реках зависит от мутности сточных вод, связанной с сезонными факторами и режимом стока самих рек, а также с интенсивностью таяния снега, составом аллювиальных отложений, слагающих русло. Взвешенные частицы влияют на прозрачность воды и на проникновение в нее света, на температуру и концентрацию растворенных компонентов поверхностных вод.

**Химическое загрязнение.** При сбросе сточных вод в поверхностные водотоки происходит их смешение и дальнейший перенос по течению реки, качество воды в которой определяется размером и гидрологическим режимом водотока, разнообразием и концентрацией веществ, содержащихся в сточных водах.

В реках после смешения их со сточными водами качество воды обычно ниже, чем в естественных условиях, однако для экологического состояния водотоков оно не должно выходить за пределы по водородному показателю — 6,5–8,5, общей минерализации — 1000 мг/л, растворенному кислороду — менее 4 мг/л и т.д. Существуют ограничения по многим другим показателям. В частности, в воде не должно быть возбудителей заболеваний и ядовитых примесей, опасных для здоровья людей.

Зона полного смешения и гидрохимической трансформации поступающих веществ определяет качество воды на нижележащем участке водотока. Здесь концентрация сточных вод становится практически постоянной для переноса в речном потоке. Изучение процессов, определяющих характер распространения загрязнения сточными водами в реках, представляет интерес для оценок условий загрязнения поверхностных вод, а также для обоснования правильного подхода к проведению наблюдений за качеством воды в водотоках. При этом следует рассматривать условия и процессы смешивания и разбавления концентраций сточных и речных вод, трансформацию и перенос в них загрязнителей.

Для определения величин предельно допустимого содержания различных веществ в речном бассейне необходимо знать ряд параметров, среди которых большое значение имеют:

- гидографические и морфометрические характеристики рек;
- особенности процессов естественного самоочищения рек бассейна;
- расчетные гидрологические, гидравлические и гидрохимические характеристики речного стока в контрольных и расчетных створах;

- расчетные значения расходов и состава сбрасываемых сточных вод;
- характеристики пространственного размещения объектов водопользования, требования водопользователей к качеству воды.

Районы месторождений располагаются обычно в пределах территорий, обладающих специфическими природными условиями. Они характеризуются расчлененным рельефом и слабой устойчивостью природных ландшафтов к антропогенному воздействию. Намечающееся увеличение количества разрабатываемых коренных месторождений обусловливает необходимость эффективного контроля за локальными изменениями водных ресурсов путем организации более действенного мониторинга [2]. Поэтому эффективная система мониторинга водных ресурсов с учетом комплексных наблюдений за факторами формирования качества воды может быть создана лишь при участии предприятий, осуществляющих добчу и переработку полезных ископаемых.

Особое значение в формировании загрязнений водных ресурсов в районах горнодобывающей деятельности принадлежит хвостохранилищам. Они являются объектом повышенной опасности для окружающей среды и способны привести к существенному загрязнению тяжелыми металлами и различными соединениями антропогенного происхождения природных поверхностных и подземных вод. Многочисленные исследования [3–4 и др.] свидетельствуют о том, что жидккая пульпа, поступающая в хвостохранилище, содержит большое количество веществ, негативно воздействующих на экологическое состояние природных экосистем. Хвостохранилища достигают значительных размеров, занимая десятки и даже сотни гектаров. Они представляют собой искусственные пруды, образованные ограждением участка земной поверхности дамбами обвалования или перегораживанием земляной плотиной небольших долин малых или временных водотоков.

В горных условиях при сооружении хвостохранилищ выбираются обычно участки в прибрежных частях днищ речных долин или верхние участки долин малых водостоков. Ложе хвостохранилищ подстилается рыхлыми галечно-валунными отложениями, характеризующимися высокими фильтрационными свойствами. Как правило, из аналогичного материала (иногда более глинистого) отсыпаются дамбы по периферии хвостохранилищ. Поэтому хвостохранилища, построенные в долинах рек, являются недостаточно эффективными сооружениями с точки зрения минимизации воздействия на окружающую среду. Загрязненные воды хвостохранилищ, дренируемые через борта и ложе, поступают в поверхностные и подземные водотоки, существенно увеличивая мутность и изменяя химический состав вод<sup>1</sup>.

В руслах рек, в которые поступает сток дренажных вод из хвостохранилищ, устойчивое влияние промышленных стоков на состояние водных ресурсов отмечается на второй год деятельности предприятия (рис. 1). Показателем изменения качества воды служит также активное обрастание водорослями донных отложений в русле реки ниже участка поступления загрязненных вод в водотоки.

Осветленные воды по водовыпуску поступают в реки, где частично разбавляются. Несмотря на то что разбавляющая способность их высока, большое содержание взвешенных веществ не позволяет в достаточной степени разбавиться сточным водам. Поэтому на расстоянии 500 м от хвосто-

<sup>1</sup> Махинов А.Н., Карсаков Л.П. Геоэкологические проблемы при освоении месторождений золота на Дальнем Востоке и некоторые пути их решения // Вестн. Приам. региона. отд. РАЕН. №1. С. 99–104.

хранилищ мутность воды в реках обычно превышает естественные фоновые показатели в десятки раз. Аналогичные данные получены для содержаний в воде тяжелых металлов — меди, никеля, свинца, кадмия, цинка.

Химические элементы и соединения, содержащиеся в хвостохранилищах, с течением времени накапливаются в окружающей среде и при достижении определенных концентраций начинают негативно влиять на водные экосистемы. В первую очередь загрязнению подвергаются грунтовые воды, которые могут быть в свою очередь загрязнителями поверхностных водотоков.

Нами разработана модель процессов переноса загрязняющих веществ в хвостохранилищах в результате фильтрации. В концептуальной, а следовательно, и в математической модели должно быть учтено, что длительный намыв пульпы приводит к накоплению в бассейнах и хранилищах мощной толщи осадков. На некоторых хвостохранилищах обогатительных фабрик толщина осадков достигает десятков метров, а глубина слоя осветленной воды составляет 0,5–1,5 м.

Таким образом, расчетная модель включает схему хвостохранилища (рис. 2), где учтены все основные параметры, которые должны использоваться при решении задач моделирования.

Условные обозначения к рис. 2 и расчетам:

$m_{n0}$  — мощность (высота) осветленной пульпы, м,  $m_{n0} = f(Q_n)$ ;  
 $m_{n1}$  — мощность (высота) осадка, м,  $m_{n1} = f(t)$ ,  $m_{n1} = l_1 - l_0$ ;

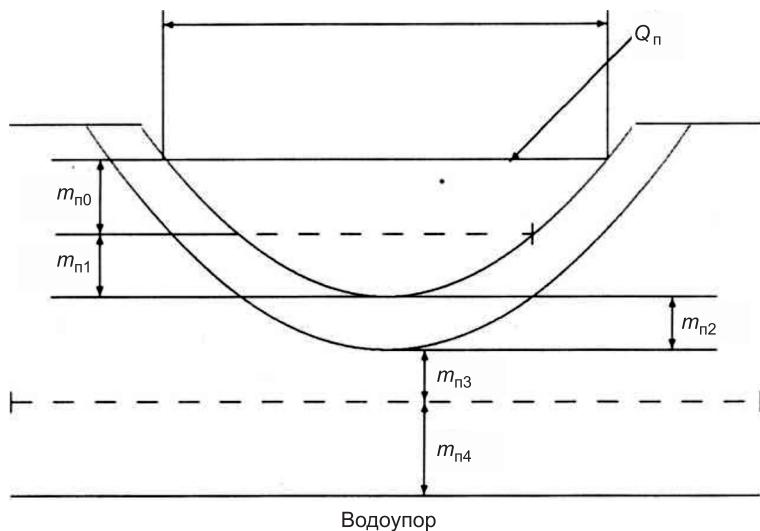


Рис. 2. Схема хвостохранилища

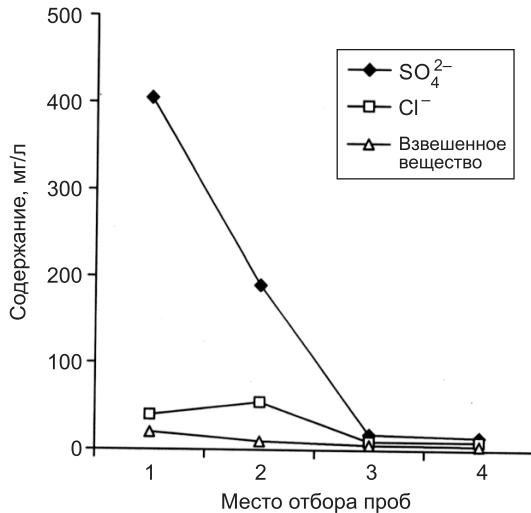


Рис. 1. Содержание некоторых загрязняющих веществ в системе «хвостохранилище (1) — отстойник ниже хвостохранилища (2) — ручей (3) — река (4)» одного из горнодобывающих предприятий в Хабаровском крае

$m_{n2}$  — мощность (высота) экрана, м,  $m_{n1} = l_2 - l_1$ ;  
 $m_{n3}$  — зона неполного насыщения, м, от  $\mathbf{n}$  до  $\mathbf{0}$ ,  $m_{n3} = l_3 - l_2$ ;  
 $m_{n4}$  — мощность (высота) водоносного слоя, м,  $m_{n4} = l_4 - l_3$ ;  
 $Q_n = f(t)$  — расход поступающей пульпы,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  
 $K_{\phi.o}$  — коэффициент фильтрации осадка,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $K_{\phi.e}$  — коэффициент фильтрации экрана,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $K_{\phi.v.p}$  — коэффициент фильтрации водоносного пласта,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $C_{n1}$  — концентрация загрязнений в осадке  $i$ -элемента,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  
 $C_{n2}$  — концентрация загрязнений в экране  $i$ -элемента,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  
 $C_{n3}$  — концентрация загрязнений в зоне неполного насыщения  $i$ -элемента,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  
 $C_{n4}$  — концентрация загрязнений в водоносном слое  $i$ -элемента,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  
 $V_{n1}$  — скорость фильтрации в осадке,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $V_{n2}$  — скорость фильтрации в экране,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $V_{n3}$  — скорость фильтрации в зоне неполного насыщения,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $V_{n4}$  — скорость фильтрации в водоносном слое,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  
 $D$  — коэффициент молекулярной диффузии ( $\text{м}^2/\text{сут}$ ) для каждого слоя области:  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ ;  
 $B$  — ширина рассматриваемого сечения хвостохранилища.

Для постановки краевой задачи, описывающей миграцию вещества от пульпы в грунт, обозначим через  $\Omega_\kappa$  ( $\kappa = 1, 2, 3, 4$ ) область, ограниченную прямыми

$$x = l_{\kappa-l}, \quad x = l_\kappa, \quad t = 0, \quad t = T, \quad \text{где } 0 < T < \infty,$$

$0 = l_0 \leq l_1 \leq l_2 \leq l_3 \leq l_4 = L < \infty$ . Область  $\{0 < x < L, 0 < t < T\}$  обозначим через  $\Omega$  (рис. 3).

Пусть  $V_\kappa, D_\kappa$  ( $\kappa = 1, 2, 3, 4$ ) — заданные постоянные величины. Необходимо найти функцию  $C(x, t)$ , непрерывную в замкнутой области  $\Omega = U_{\kappa=1}^4 \Omega_\kappa = \{0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T\}$ , имеющую непрерывные вторые производные по  $x$  и непрерывные первые производные по  $t$  в каждой области  $\Omega_\kappa$  ( $\kappa = 1, 2, 3, 4$ ) и непрерывную производную первого порядка по  $x$  во всей области  $\Omega$  и удовлетворяющую в каждой области  $\Omega_\kappa$  уравнению одномерного переноса вещества в однородной среде с постоянной скоростью фильтрации:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} - D_\kappa \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + v_\kappa \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (x, t) \in \Omega_\kappa, \quad \kappa = 1, 2, 3, 4; \quad (1)$$

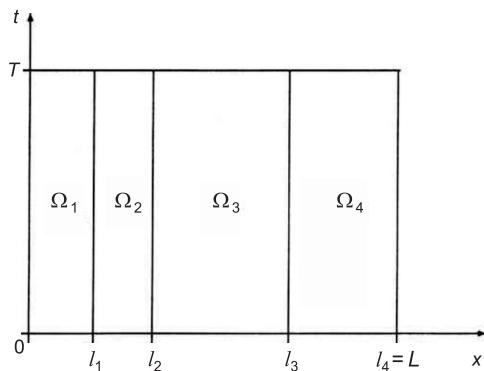


Рис. 3. Расчетная схема

начальному условию

$$C(x, 0) = C^0(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

и краевым условиям

$$\begin{aligned} C(0, t) &= C_0(t), \\ C(L, t) &= C_L(t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq T.$$

Здесь  $C^0(x)$ ,  $C_0(t)$  и  $C_L(t)$  — заданные непрерывные функции, причем  $C^0(0) = C_0(0)$ ,  $C_L(0) = C^0(l)$ .

Приближенные решения краевой задачи найдены по методу конечных разностей.

Выражение (1) во внутренних узлах аппроксимируется разностным уравнением

$$C_i^{j+1} = \left(1 - \frac{2D_\kappa \tau}{\lambda_\kappa^2}\right) C_i^j + \frac{\tau}{\lambda_\kappa} \left(\frac{D_\kappa}{\lambda_\kappa} + \frac{v_\kappa}{2}\right) C_{i-1}^j + \frac{\tau}{\lambda_\kappa} \left(\frac{D_\kappa}{\lambda_\kappa} + \frac{v_\kappa}{2}\right) C_{i+1}^j. \quad (4)$$

Начальному условию (2) соответствуют

$$C_0^j = C^0(x_i), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, N, \quad (5)$$

а краевым условиям (3) —

$$C_0^j = C^0(t_j), \quad C_N^j = C_L(t_j), \quad j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, M. \quad (6)$$

Из последнего соотношения значения  $C_i^j$  на границах между областями  $\Omega_\kappa$  получаем по формулам

$$C_{n_\kappa}^j = \frac{\lambda_\kappa C_{n_{\kappa-1}}^j + \lambda_{\kappa+1} C_{n_{\kappa-1}}^j}{\lambda_\kappa + \lambda_{\kappa+1}}, \quad \kappa = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

Таким образом, по итерационным формулам (4)–(7) находятся приближенные значения функции  $C(x, t)$  во всех узлах сети.

Задавая различные значения для параметров среды  $V_\kappa$ ,  $D_\kappa$  и устанавливая вид функций  $C^0(x)$ ,  $C_0(t)$  и  $C_L(t)$ , можно проследить характер процессов, происходящих в хвостохранилищах при миграции вещества от пульпы до грунта.

В результате расчетов получено, что величина погрешности нахождения приближенного решения при вычислениях не превышает 10 %. Из уравнения (1) начальные и граничные условия приняты следующие:

$$C_0 = \begin{cases} 50(0,5 - x)^2, & x \leq 0,5; \\ 0,0, & x > 0,5 \end{cases} \quad (8)$$

$$C_0(t) = 12,5e^{-t}; \quad (9)$$

$$C_L(t) = 0. \quad (10)$$

Начальное условие вида (8) описывает случай резкого увеличения концентрации вещества на поверхности хвостохранилища. С течением времени концентрация на поверхности постепенно уменьшается (условие (9)). Такая ситуация может возникнуть в случае единичного сброса вещества в хвостохранилище. На дне концентрация вещества остается равной нулю (условие (10)).

Расчеты показывают, что с течением времени происходит перенос вещества на глубину. Так как среда однородная, то скорость переноса вещества остается постоянной по всему исследуемому объему (рис. 4).

Рассмотрены тестовые примеры, на которых проверена правильность составленной программы и промоделированы процессы распространения вещества. С использованием данной модели оценена миграция меди в хвостохранилище Солнечного ГОКа в Хабаровском крае<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Хе Кан Чер, Шевцов М.Н., Караванов К.П., Вихтенко Э.М. Математическое моделирование влияния горнодобывающего комплекса на водные ресурсы (на примере хвостохранилищ). Хабаровск, 1998. 28 с.

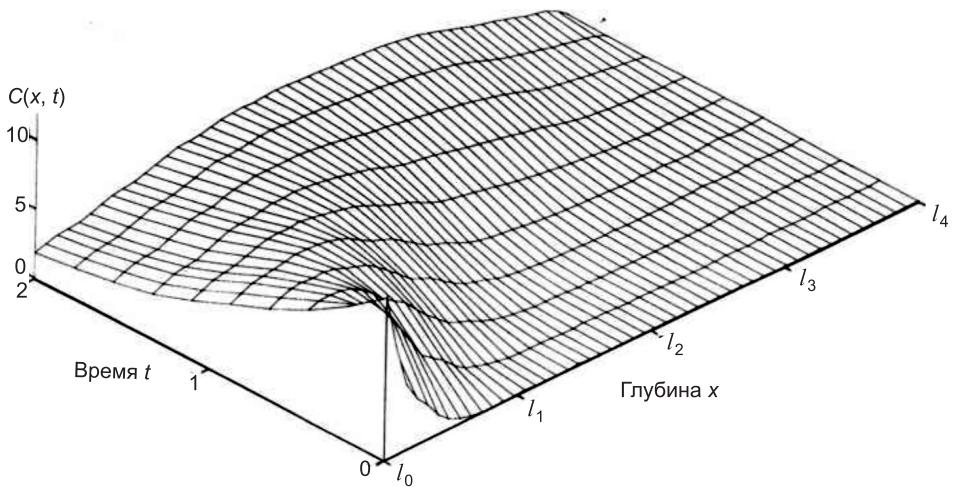


Рис. 4. Тестовый расчет концентрации  $C(x, t)$

Мощность осадка  $m_1 = 6$  м, высота экрана  $m_2 = 0,5$  м, ширина зоны аэрации  $m_3 = 5$  м, высота водоносного слоя  $m_4 = 10$  м. Скорость фильтрации в слоях равна  $V_1 = 2$  м/сут,  $V_2 = 0,01$  м/сут,  $V_3 = 10$  м/сут,  $V_4 = 10$  м/сут. Для коэффициентов диффузии приняты следующие данные:  $D_1 = 5 \cdot 10^{-5}$  см $^2$ /с,  $D_2 = 1 \cdot 10^{-5}$  см $^2$ /с,  $D_3 = 5 \cdot 10^{-2}$  см $^2$ /с,  $D_4 = 5 \cdot 10^{-2}$  см $^2$ /с.

Были приняты начальные значения концентрации меди на поверхности осадка (точка  $l_0$ ), поверхности экрана (точка  $l_1$ ), на границе нижней точки экрана и верхнего уровня зоны неполной аэрации (точка  $l_2$ ), в начальной  $l_3$  и конечной  $l_4$  точках водоносного слоя, равные соответственно 2, 0,5; 0,1; 0,05 и 0,055 мг/дм $^3$ . По истечении нескольких часов с момента поступления меди с пульпой наблюдается ее проникновение согласно расчетам в толщу осадка и незначительное — в зону неполного насыщения и водоносного слоя. Это происходит за счет диффузии загрязняющего вещества вследствие массопереноса и сорбции вещества породой. При этом на миграцию вещества в подстилающие слои хвостохранилища будут влиять их состояние, фильтрационные свойства, температура и гравитационные эффекты.

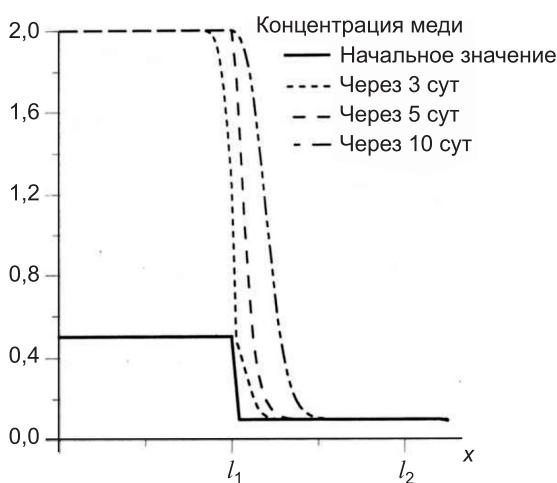


Рис. 5. Динамика переноса меди в хвостохранилище Солнечного ГОКа

Через 3 сут вещество с начальной концентрацией 2 мг/дм $^3$  проникает до экрана и, скопившись перед ним, проходит через него (рис. 5), что подтверждается и при эксплуатации хвостохранилищ на реальных объектах. Затем увеличение концентрации будет происходить в зоне неполного насыщения и в водоносном слое.

Полученные результаты задач хорошо согласуются между собой и подтвержда-

ются другими исследованиями. Например, В.М. Гольдберг<sup>3</sup> отмечает, что зона неполного насыщения играет двойную роль в процессах загрязнения подземных вод. С одной стороны, она выполняет защитную функцию по отношению к горизонту грунтовых вод, с другой — будучи загрязненной, в течение длительного времени может служить источником загрязнения подземных вод. Одним из эффективных способов резкого сокращения дренажа из хвостохранилищ служит использование новых прогрессивных технологий, в частности полусухого складирования хвостов. При этом необходимо учитывать природные особенности территорий — их положение в рельефе, наличие на данных участках опасных геологических и гидрологических процессов.

Важным фактором, влияющим на преобразование качества воды в поверхностных водотоках, являются отвалы вскрышных пород. В условиях повышенной сульфидной минерализации большинства руд и благоприятных возможностей их быстрого окисления происходит вынос поверхностными и подземными водами в водотоки большого количества различных металлов (медь, цинк, кадмий, мышьяк, ртуть, селен и др.). Рыхлое сложение измельченных вскрышных пород обеспечивает хорошую водопроницаемость и аэрацию, что способствует интенсивному окислению минералов и образованию кислых растворов. В подобных условиях возрастают геохимическая подвижность элементов, которые, фильтруясь через толщу отвалов и почвы, поступают в речную сеть. Отвалы опасны в течение нескольких десятков и сотен лет, пока на них не сформируются типичные для региона почвы, регулирующие водный режим территории, близкий к естественному.

На горнодобывающих предприятиях Восточно-Казахстанской области накоплено около 1,4 млрд т отвалов пустых пород. Значительная часть их складирована на полигонах, не отвечающих санитарно-экологическим требованиям. Особую опасность представляют площадки с хорошо фильтрующими рыхлыми отложениями речных долин. Дренажные воды таких отвалов поставляют в поверхностные водотоки значительное количество меди, свинца, цинка, кадмия, марганца и других металлов.

Большую проблему, острота которой становится все более существенной, представляют брошенные или законсервированные предприятия горнодобывающей промышленности. Бесхозные шахты, карьеры, отвалы, хвостохранилища, накопители и др. продолжают оказывать негативное воздействие на поверхностные и подземные воды. Например, на Березовском руднике после прекращения горных работ в 1991 г. и его консервации в 1997 г. начался самопроизвольный излив шахтных вод, поступавших в р. Красноярка и далее в Иртыш. В водах Красноярки были существенно превышены предельно допустимые концентрации по цинку, меди и кадмию.

Негативные последствия хозяйственной деятельности в зоне влияния горнодобывающих предприятий особенно усиливаются вследствие различных нарушений технологического регламента, слабого контроля за состоянием природной среды и отдельных ее компонентов. Поэтому создание эффективной системы мониторинга приобретает одно из важных направлений деятельности предприятий в области охраны водных ресурсов в районах интенсивной горнодобывающей деятельности.

<sup>3</sup> Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 246 с.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевцов, М.Н. Водные ресурсы горнорудных районов и их преобразование (юг Дальнего Востока) [Текст] / М.Н. Шевцов, К.П. Караванов, А.Н. Махинов и др. — Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. — 159 с.
2. Шевцов, М.Н. Мониторинг состояния водных ресурсов при строительстве горнодобывающих предприятий в Северном Прихотье [Текст] / М.Н. Шевцов, А.Н. Махинов, И.Г. Мещенин // Изв. вузов. Строительство. — 1999. — № 6. — С. 73–81.
3. Неудачин, А.П. Миграция тяжелых металлов в районах золотоизвлекающих комплексов Хабаровского края [Текст] / А.П. Неудачин, С.М. Кремлев, С.И. Левшина // Биогеохимические и гидроэкологические оценки наземных и пресноводных экосистем. — Владивосток : Дальнаука, 2003. — С. 73–81.
4. Махинов, А.Н. Влияние горнодобывающих предприятий на преобразование ландшафтов хребта Кет-Кап [Текст] / А.Н. Махинов, А.Ф. Махинова, В.М. Сапаев, М.Н. Шевцов // Вопросы географии Дальнего Востока. Вып. 20. — Хабаровск, 1997. — С. 8–13.

**МАХИНОВ Алексей Николаевич**, д-р геогр. наук, проф.; E-mail: iverp@iverp.as.khb.ru  
Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,  
г. Хабаровск

**ШЕВЦОВ Михаил Николаевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: shevtsov@mail.khstu.ru

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

**МУЗЫКО Сергей Викторович**, зам. министра ЖКХ Хабаровского края

**ЗБАРАЦКИЙ Арсений Александрович**, препод.; E-mail: arsenikum88@mail.ru

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

**АКИМЕНКО Наталья Юрьевна**, канд. техн. наук, доц.

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан

**ВИДИЩЕВА Галина Геннадьевна**, канд. техн. наук, доц.

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан

Получено 18.01.13

**Mahinov Alexey Nikolaevich**, doctor of geographical sciences, professor; E-mail: iverp@iverp.as.khb.ru, Institute of Water and Ecological Problems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Shevtsov Mikhail Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: shevtsov@mail.khstu.ru, Pacific State University, Khabarovsk, Russia

**Muziko Sergey Viktorovich**, deputy minister HCS of Khabarovsk Krai, Russia

**Zbaratsky Arseny Alexandrovich**, lecturer; E-mail: arsenikum88@mail.ru, Pacific State University, Khabarovsk, Russia

**Akimenko Natalia Yurievna**, candidate of technical sciences, assistant professor, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Kazakhstan

**Vidischeva Galina Gennadievna**, candidate of technical sciences, assistant professor, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Kazakhstan

## POLLUTION OF WATER RESOURCES MINING AREAS AND SOLUTIONS

The problems of water of mining regions of the Russian Far East and Eastern Kazakhstan. The results of the analysis of materials of long-term observations of water resources, which were been carried out with the participation of the authors. The influence of tailing dumps on natural ecosystems. Presented mathematical model of transport pollution

from tailing dumps due filtration results. Using this model, appreciated movement of copper on the specific example of Solnechnogo MEP in the Khabarovsky Krai.

**Key words:** water resources, mining companies, tailing, chemical pollution, sludge, sediment, monitoring, mathematical model, the ecosystem.

#### REFERENCES

1. Shevtsov, M.N. Water mining areas and their conversion (south of the Far East) [Text] / M.N. Shevtsov, K.P. Caravanov, A.N. Makhinov et al. — Khabarovsk : KHSTU Press, 1998. — 159 p.
  2. Shevtsov, M.N. Monitoring of water resources in the construction of mining enterprises in the North Okhotsk Sea [Text] / M.N. Shevtsov, A.N. Makhinov, I.G. Meschenin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1999. — N 6. — P. 73–81.
  3. Neudachin, A.P. The migration of heavy metals in the areas of gold extracting complexes Khabarovsk Territory [Text] / A.P. Neudachin, S.M. Kremlev, S.I. Levshina // Biogeochemical and hydro assessment of terrestrial and freshwater ecosystems. — Vladivostok : Dal'nauka, 2003. — P. 73–81.
  4. Makhinov, A.N. Influence of mining enterprises to transform the landscape of the ridge Keth-Kap [Text] / A.N. Makhinov, A.F. Makhinova, V.M. Sapaev, M.N. Shevtsov // Questions of Geography of the Far East. Iss. 20. — Khabarovsk, 1997. — P. 8–13.
-

**УДК 711.4-112(571.1/.5)**

**М.В. БЕЖАНОВА, Л.Н. ВОЛЬСКАЯ**

## **О СЛОЖЕНИИ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЦЕНТРОВ КРУПНЫХ ГОРОДОВ СИБИРИ — ЯДЕР АГЛОМЕРАЦИЙ XXI в.**

Рассматриваются композиционные особенности сложения архитектурно-пространственной и планировочной структуры центров крупных сибирских городов, сосредоточивающих основные городские функции, под действием различных градоформирующих факторов, превалирующих в исторические периоды.

**Ключевые слова:** архитектурно-пространственная и планировочная структура центров, городские функции, исторический центр, транспорт, вертикальные доминанты, ансамбль центра.

В начале XXI в. население Сибири сосредоточивается в крупных городах-центрах агломераций, концентрирующих важнейшие объекты промышленности, науки, образования, культуры, рекреации. В каждом из них, прошедшем свою эволюцию, особо выделяется центральная часть. Формируясь на протяжении всей городской истории, она является узловым элементом в сложившемся планировочном каркасе, представляет собой наслойение застройки разных временных этапов и архитектурных стилей, отличающихся в рассматриваемых городах и определяющих их неповторимость и своеобразие, будучи средоточием в ядре города уникальных функций, значимых для всей агломерации.

На создание центров сибирских городов на протяжении всех исторических периодов большое влияние оказали: суровость климата, наличие разветвленных речных систем как транспортной инфраструктуры. На ранней стадии формирования городов в XVI–XVII вв. реки являлись главными коммуникационными артериями, с ними было связано большинство важнейших торгово-деловых и общественных функций. Преобладающей функцией была фортификационная, в дальнейшем появились торговая, промышленная и пр.

Планировочная структура на начальном этапе развития центров исторических городов: Омска, Томска, Тюмени, имеет аналогичную модель: центр — крепость, чаще расположенная на возвышенности, ниже — посады, слободы, монастыри. В архитектурно-пространственной структуре доминировали вертикали церквей, играя главную роль в композиции отдельных площадей и создавая композиции улиц. Компактность монументальных строений (башни, церкви, в Тюмени — это Спасская церковь, в Томске — церковь во имя Богоявления Господня) и крепостные ограды подчеркивали центральное ядро. В облике Томска XVII в. важное значение имел Гостиный двор, давший начало главной площади — Базарной. Хотя город продолжал развиваться как военное укрепление, в нем возросла роль торговли, что сразу отразилось в застройке.

В начале XVIII в. Московско-Сибирский тракт, прошедший через Тюмень, Омск, Томск, способствовал развитию этих городов, их планировочного каркаса с площадями, созданными ансамблями застройки. Так,

в Тюмени сочетание регулярности со стихийностью определило не только характер сетки улиц, но и очертания городских площадей. Независимо от габаритов каждая площадь в соответствии с принципами русского зодчества являла собой пространство с церковью посередине. Центричность и свобода русских площадей — качество, «побеждающее» средневековую тесноту застройки. Пространства улиц Тюмени гармонично перетекали в пространства площадей, которые имели различное функциональное значение, размеры, конфигурацию, пропорции [1]. Это придавало определенность и законченность всему внутреннему городскому пространству, и без того прочно связанному продольной планировочной осью — Сибирским трактом, который наряду с параллельной сложившейся осью в дальнейшем определил линейное развитие застройки. В Томске веерообразная структура В.И. Гесте 1830 г. фокусировала территориальное положение центров, трактуя р. Ушайку как ландшафтную планировочную ось в композиции городской структуры. В отличие от более старых Тюмени и Томска, в конце XVIII в. в Омске был создан проект крепости на правом берегу Оми, территория ее была распланирована на прямоугольные кварталы с сеткой улиц в меридиональном и широтном направлениях, в центре с плацем [2].

В рассматриваемых городах торговые площади, являющиеся своеобразными центрами притяжения населения, пространственно развиты, выполняют общегородские функции: административную, торговую, военную, производственную и др. Композиционным ядром городских центров в XVIII в. Тюмени, Томска становятся торговые гостионодворские площади, представляющие собой гармоничную среду с разностилевой застройкой. К ним вели основные дороги и тракты, связывавшие центры с пригородами и другими городами. К первой четверти XIX в. в Омске, Томске, Тюмени складываются целостные ансамбли центров. В Томске Базарная площадь приобретает наряду с торговой и административной функцию. Вторая главная площадь — Новособорная — представляла собой ансамбль, состоящий из зданий Богоявленского собора, Магистрата в стиле классицизма, квартала с Второвским пассажем в стиле модерн и комплекса набережной в стиле позднего классицизма. Дальнейший вид площади формировался с возведением здания Присутственных мест в 1842 г. в стиле классицизма, появлением Троицкого собора (архитектор К. Тон) в русско-византийском стиле и др. Несмотря на то что здания были построены в разных архитектурных стилях, их система застройки, гармоничность придавали особый масштаб и монументальность, выделяя ядро города. Так ядро центра Томска сложилось из двух площадей, соединенных Почтамтской улицей.

Развитие планировочного каркаса в Омске в начале XIX в. связано с перемещением центра от района крепости в глубь левого берега Оми. Здесь был создан центральный ансамбль из комплекса административных, общественных, гарнизонных и воинских зданий с доминирующим Никольским казачьим собором (архитектор В.П. Стасов) в стиле классицизма. В 1870-е годы общегородской центр Омска основывается в глубине правого берега Оми [3]. В начале XX в. завершается формирование облика торгового центра Омска вдоль Чернявинского (Любинского) проспекта. В новых зданиях городского центра Омска применялись различные архитектурные стили. В торговых и коммерческих зданиях преобладала эклектика (торговый дом Ганьшина (1905–1906), «модерн» (торговый дом «Эльвортி» (1913), доходные дома Печокас, Михайлова (1915–1916)). На рубеже веков сложился пространственно-развитый культурный и общественный центр Омска, включающий как отдельные

доминирующие объемы, так и ансамбли единообразной застройки. Были созданы визуальные связи панорамы центра и главной улицы со стороны реки.

В отличие от Томска и Омска, в Тюмени, обладающей регулярной системой линейной планировки, в XX в. произошло перетекание центра от места бывшей крепости, исторического центра, расположенного на стрелке высокого мыса между Тюменкой и Турой, к бывшей Ярмарочной площади. На современном этапе эта площадь является городским центром. Она была застроена в послевоенное время преимущественно perímetralно такими несущими главные административные и общественные функции зданиями, как Администрация Тюменской области, Тюменская областная дума, Машиностроительный техникум и др.

Огромную роль в формировании системы расселения, развитии городов, их центров в конце XIX в. сыграло строительство в 90-х годах Великой Сибирской железнодорожной магистрали, способствующей росту и процветанию края, развитию существующих городов, образованию новых, в частности, Новониколаевска (1893). Однако в тех городах, где магистрали не было, произошел экономический спад (Томск). Этот период характерен развитием промышленности и торговли, ростом населения. Развивалась и архитектурно-пространственная структура городов. Строились новые здания, среди которых все больше было каменных, продолжалось церковное строительство, так появились новые кафедральные соборы в Омске, Томске. Города благоустраивались, улучшалась их инженерная инфраструктура.

В конце XIX — начале XX в. в связи со строительством железной дороги основывается, а позже бурно растет крупнейший город Сибири — Новосибирск, ставший в дальнейшем центром агломерации. Не имеющий такой богатой истории, как вышерассмотренные города, он развивался по-иному. До 1917 г. городской планировочный каркас был тесно связан с особенностями элементов местного ландшафта: малыми речками Ельцовкой, Каменкой; зелеными массивами, Обью и линией Транссибирской магистрали, что сразу и продиктовало направление главных городских улиц. В этот период определяются положение и масштаб центра города. Выделился его основной проспект с двумя торговыми площадями: Ярмарочной и Базарной, которые являлись местом притяжения населения и средоточием общественной жизни. Среди однообразной квартальной застройки в то время выделялись вертикали церквей, давших визуальные вертикальные акценты, формируя уникальный городской силуэт. В отличие от Томска и Тюмени в Новосибирске пересечение железной дороги и р. Обь изначально задали определенную четкую планировочную структуру города.

Следует отметить, что все уникальные городские функции были присущи городам-центрам и до XX в., но играли локальную роль, а затем, благодаря особым сложившимся политическим, социоэкономическим условиям, планировочно-пространственная структура городов получила мощный импульс для развития.

Центр Новосибирска, в отличие от более «старших» Томска, Омска, сформированных застройкой предыдущих столетий и архитектурных стилей классицизма, эклектики, модерна, застраивается в середине XX в. крупными общественными зданиями с уникальными функциями, формирующими городской силуэт в отличие от предыдущих временных периодов с преобладанием культовых построек, уничтоженных в советский период. Идея устройства главной площади, принадлежащая И.И. Загривко, в дальнейшем реализовывалась в создании ее ансамбля из зданий Доход-

нного дома, Торгового корпуса, Оперного театра и др. [4]. Помимо сосредоточения культурной городской функции, на площади сразу стали преобладать деловая, административная, общественная и др.

Рассматриваемые города в течение XX в., расширяясь территориально, становятся центрами развивающихся агломераций. Происходит рост производительных сил, широкое хозяйственное освоение края, с активизацией освоения месторождений полезных ископаемых. На территории Западной Сибири появляются новые города, складываются основные формы расселения, растут города-центры: Омск, Новосибирск. Во второй половине XX в. система расселения в рассматриваемых городах носит моноцентрический характер, в отличие от линейно полицентрического варианта, характерного для Кузбасса. Так, к 1980-м годам в Новосибирске сложилась концентрическая территориально-планировочная структура с развитием в радиально-концентрическую. Появились предпосылки развития планировочной структуры из замкнутой в открытую с включением в нее городов-спутников: Бердска, Искитима, Оби, Краснообска и др. Исторический центр в городах также стал развиваться в полицентрическую систему с уникальными функциями (культурно-зрелищной, административной, общественной, развлекательной и др.), важными для всей агломерации.

На современном этапе, в начале XXI в., развитие центров в городах Западной Сибири продолжается. Главными проблемами, аналогичными для всех, являются: реконструкция центров с уплотнением застройки, сохранением ценных зданий, памятников архитектуры, транспортная проблема и сохранение системы озеленения. Центры, будучи узловым элементом в каркасе города, вынуждены ежедневно принимать огромное количество людей и транспорта различных видов, а центральные площади и довольно узкие улицы центров планировочно не готовы к этому. Являясь средоточием городских функций, центральное ядро уплотняется новыми зданиями, несущими деловые, административные функции, нередко диссонирующими с исторической застройкой.

В историческом центре Томска новые здания кардинально изменили сложившуюся ранее городскую среду. В конце 1960-х годов было снесено здание Гостиного двора и появились здания Драматического театра и областной администрации. Крупномасштабные новые здания из стекла и бетона в значительной степени изменили облик центральной площади. С одной стороны, восстанавливались утраченные доминанты: Богоявленский храм на площади Ленина, храм Александра Невского и др., а с другой — возводились новые, перекрывающие визуальные связи между воссозданными и сохранившимися доминантами.

Изменилась и застройка центральной площади Новосибирска. С пробивкой диагональных направлений (улиц Вокзальной магистрали и Кирова) она сохранила симметрию и ее застройку. Образовались новые визуальные связи центрального ядра, например, с площадью Гарина-Михайловского и зданием железнодорожного вокзала — вторым узлом в этой части города.

На современном этапе, между городом в системе расселения и его историческим центром наблюдается такая аналогия: как город служит планировочным ядром для агломерации, сосредоточивая ее уникальные основные функции на относительно небольшой территории, так и центральная часть, являясь ядром в структуре города, обеспечивает его функционирование на относительно малой территории. Следует отметить, что важным аспектом в планировочной структуре центральной части города служит взаимосвязь ее со всей планировочной структурой города, ее главных черт

и особенностей. Планировочные направления периферийных частей города находят свое продолжение в центральной как в преобладающих связях, так и в направлениях главных магистралей.

В заключение следует отметить, что основными градоформирующими факторами в развитии планировочно-пространственной структуры центров крупных городов Сибири, ставших ядрами агломераций, явились:

- особенности климата и природный ландшафт, своеобразный в каждом из рассматриваемых выше городов;
- речные системы — первые коммуникационные артерии для всего расселения в Сибири, возникновения городов;
- строительство Сибирского тракта, вызвавшего развитие торговли, промыслов и пр.;
- создание Транссибирской железнодорожной магистрали в конце XIX в., способствующей возникновению новых городов (Новосибирск), укреплению и росту старых (Тюмень, Омск);
- социоэкономические факторы, характерные для каждого исторического периода.

Планировочная структура города всегда находилась под влиянием, с одной стороны, закономерностей, общих для всей эпохи, а с другой — локальных индивидуальных для каждого города природных особенностей, причем архитектурно-пространственный облик центров рассматриваемых городов формировался в течение длительного исторического периода и зафиксировал в планировке, застройке и городском ландшафте основные этапы развития города от оборонительных крепостей XVII–XVIII вв. до крупнейших городов-ядер агломераций, научно-производственных, образовательных, культурных, промышленных центров Западной Сибири, в которых здания, образующие исторические центры, построенные в разное время в разных архитектурных стилях, представляют собой памятники архитектуры, подлежащие охране. Территории центров городов, как показывает история, подвержены уплотнению застройки и реставрации отдельных зданий и сооружений, продолжающихся и поныне. Наличие зданий-памятников историко-архитектурного наследия является важным фактором, определяющим центр крупного города и диктующим дальнейшую реконструкцию и ценность городской среды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арапова, О.М. Архитектурно-художественный облик Тюмени конца XVII в. [Текст] / О.М. Арапова // Труды НГАСУ. — 2003. — Т. 6, № 4. — С. 118–123.
2. Оглы, Б.И. Строительство городов Сибири [Текст] / Б.И. Оглы. — Л. : Стройиздат, 1980. — 272 с.
3. Туманик, А.Г. Предпосылки возведения крупномасштабных храмовых зданий в центрах исторических городов Сибири (Омска, Томска, Красноярска, Иркутска) во второй половине XIX века [Текст] / А.Г. Туманик // Изв. вузов. Строительство. — 1997. — № 11. — С. 135–137.
4. Баландин, С.Н. Новосибирск. История градостроительства 1893–1945 гг. [Текст] / С.Н. Баландин. — Новосибирск, 1978. — С. 81.

БЕЖАНОВА Марина Викторовна, асп.

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

ВОЛЬСКАЯ Лариса Николаевна, д-р архитектуры, проф.

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

**Bezhanova Marina Viktorovna**, post-graduate student, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

**Volskaya Larisa Nikolaevna**, doctor of architecture, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

## **ABOUT ADDITION AND COMPOSITE FEATURES OF THE CENTERS OF THE LARGE CITIES OF SIBERIA — KERNELS OF AGGLOMERATIONS OF THE XXI CENTURY**

In article composite features of addition of architectural and spatial and planirovochny structure of the centers of the large Siberian cities focusing the main city functions, under the influence of the various city-forming factors prevailing during the historical periods are considered.

**Key words:** architectural and spatial and planirovochny structure of the centers, city functions, historical center, transport, vertical dominants, center ensemble.

### REFERENCES

1. Arapova, O.M. Architectural and art shape of Tyumen of the end of the XVII Century [Text] / O.M. Arapova // Works NGASU. — 2003. — Vol. 6, N 4. — P. 118–123.
  2. Ogly, B.I. City building in Siberia [Text] / B.I. Ogly. — L. : Stroyizdat, 1980. — 272 p.
  3. Tumanik, A.G. Preconditions of construction of large-scale temple buildings in the centers of the historical cities of Siberia (Omsk, Tomsk, Krasnoyarsk, Irkutsk) in the second half of the XIX eyelid [Text] / A.G. Tumanik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1997. — N 11. — P. 135–137.
  4. Balandin, S.N. Novosibirsk. Town planning history (1893–1945) [Text] / S.N. Balandin. — Novosibirsk, 1978. — P. 81.
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 693.22:539.3

В.В. АДИЩЕВ, И.В. КУЧЕРЕНКО, М.С. ГРАЧЕВА

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КИРПИЧНЫХ КЛАДОК\*

Кирпичная кладка представлена в виде квазиоднородного анизотропного тела. Ранее предложенная модель многофазной среды позволяет определить жесткостные характеристики кладки. Найдены матрицы жесткости каменных кладок как структурно-неоднородного материала. Проведен анализ влияния дефектов, возникающих в кладке при возведении, на ее деформативные свойства, учтена совместная работа кирпича и раствора.

**Ключевые слова:** каменная кладка, структурно-неоднородный материал, матрица жесткости, физические характеристики материала.

Под каменной кладкой обычно понимают сложное тело, состоящее из камня (кирпича) и раствора. Совместная работа отдельных элементов кладки обеспечивается определенной системой перевязки отдельных камней и сцеплением раствора с камнем в швах кладки после отвердевания.

В соответствии с существующими нормами проектирования каменная кладка строительных конструкций рассчитывается как однородное изотропное тело на одноосное сжатие [1]. Однако известно, что каменная кладка находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, которое формируется вследствие ее неоднородности [2]. Даже при равномерном распределении нагрузки по всему сечению сжатого элемента камень и раствор в кладке одновременно подвержены внецентренному сжатию, изгибу и растяжению, срезу и смятию.

Для расчета кирпичной кладки в условиях сложного напряженно-деформированного состояния необходимо определить ее физические характеристики (модули упругости и сдвига по различным направлениям), что позволит рассматривать кладку как квазиоднородный анизотропный материал.

Для определения физических характеристик кладки как структурно-неоднородного материала используется модель многофазной среды, предложенная в [3], в которой по известным определяющим соотношениям элементов композиции, их расположению и объемной концентрации определяются физические соотношения композитного материала при упругом деформировании. Закон Гука для кладки, как квазиоднородного материала, можно записать в виде  $\sigma = B\varepsilon$ , или  $\varepsilon = B^{-1}\sigma$ , где  $\varepsilon$  — матрица

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00633).

компонентов деформаций,  $\sigma$  — матрица компонентов напряжений, матрица  $B$  имеет следующую структуру:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66} \end{pmatrix}.$$

По аналогии с изотропным материалом можно считать, что на главной диагонали матрицы податливости  $B^{-1}$  стоят величины, обратно пропорциональные модулям упругости, которые в дальнейшем будем называть псевдомодулями упругости кладки.

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & b_{12}^{-1} & b_{13}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21}^{-1} & 1/E_2 & b_{23}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31}^{-1} & b_{32}^{-1} & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix},$$

где  $E_1, E_2, E_3$  — псевдомодули упругости;  $G_{23}, G_{13}, G_{12}$  — псевдомодули сдвига (рис. 1).

По вышеупомянутой методике определены жесткостные характеристики кладки, выполненной из кирпича пластического прессования марки М75 и раствора марки М25. Размеры кирпича  $250 \times 120 \times 65$  мм, толщина всех швов 10 мм. Для каменной кладки считается представительным объем длиной в пять кирпичей, так как влияние высоты фрагмента, начиная с трех рядов кладки, утрачивается [4]. В данной работе рассматривается объем  $10 \times 10$  кирпичей, так как с использованием модели из работы [3] при рассмотрении меньшего объема результаты немного искажаются. Рассмотрены варианты кладки толщиной в полкирпича, в кирпич и в два кирпича, для которых получены жесткостные характеристики (табл. 1).

В соответствии с нормативными документами [1] кирпичная кладка считается изотропным упругим материалом. Для кладки из кирпича марки М75 и раствора марки М25 модуль упругости  $E_0 = 1,100$  ГПа, а модуль сдвига  $G = 0,4$ ,  $E_0 = 0,44$  ГПа. Так как в реальных конструкциях каменные кладки работают преимущественно на сжатие, то логично сопоставлять псевдомодуль упругости, полученный в направлении 2, с тем, что заложен в СНиП. При срав-

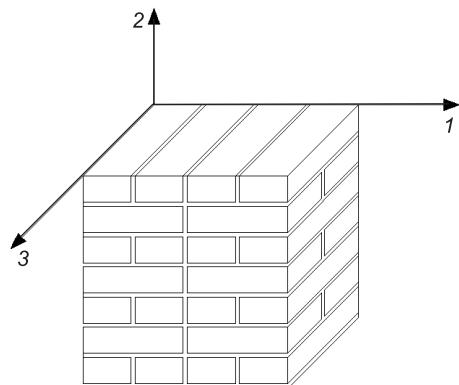


Рис. 1. Ориентация осей во фрагменте кирпичной кладки

Таблица 1

**Значения псевдомодулей упругости  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и псевдомодулей сдвига  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$ , полученные по вышеизложенной методике, ГПа**

Вид кладки	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{23}$	$G_{13}$	$G_{12}$
Толщиной в полкирпича	6,925	6,368	6,689	2,780	2,980	2,811
Толщиной в один кирпич	6,433	6,365	6,701	2,720	2,817	2,606
Толщиной в два кирпича	Двухрядная система перевязки	6,450	6,276	5,405	2,726	2,823
	Четырехрядная система перевязки	5,006	4,622	5,265	1,896	2,180
						1,869

нении этих величин была получена достаточно большая разница, что объясняется идеализацией модели.

Для приближения идеальной модели к реальной кладке необходимо оценить совместную работу кирпича и раствора.

Известно, что деформации кирпича в кладке на 70–80 % больше, чем при испытании отдельно [2]. Это объясняется тем, что при испытании кирпича на прессе силы трения препятствуют расширению камня, вследствие чего уменьшаются продольные деформации. В кладке же таких сдерживающих факторов нет.

Деформативные свойства раствора в кладке тоже значительно отличаются от свойств этого же раствора, испытанного в нормальных образцах. Объясняется это условиями твердения раствора. Степень уплотнения шва в процессе возведения кладки, влажностный режим твердения, отсасывания влаги и т.п. — все это приводит к тому, что деформативные свойства раствора в швах кладки отличаются от свойств раствора нормальных образцов [2]. Неравномерное отсасывание влаги из растворных швов приводит к образованию воздушных зазоров между ними, размеры которых доходят до 2 мм.

Учитываются перечисленные особенности следующим образом:

- изменение влажностного режима учитывается введением коэффициента  $k$ , на который умножается модуль упругости раствора. По рекомендациям ГОСТ 5802–86  $k = 0,56$ , а по рекомендациям В.В. Пангаева  $k = 0,8$  [4] (проводя исследования, он пришел к выводу, что в ГОСТ этот коэффициент несколько завышен);

- степень уплотнения раствора вертикальных швов значительно меньше степени уплотнения горизонтальных швов. Для учета этого в модели будем отличать деформативные свойства вертикальных и горизонтальных швов. В вертикальные швы добавляются поры. Для учета зазоров, которые образуются из-за неравномерности отсасывания влаги с поверхности раствора, в горизонтальных швах выделим горизонтальные слои, прилегающие к кирпичу — контактные зоны (высотой 2 мм), и введем пустоты в эти слои;

- изменение работы кирпича в кладке по сравнению с работой кирпича отдельно учитывается введением коэффициента  $k_{y.p.kir} = 1,75$ , на который нужно разделить модуль упругости кирпича.

Оценим влияние каждого фактора в отдельности на характеристики кладки.

1. Учет изменения влажностного режима твердения раствора (табл. 2).

Коэффициент, введенный для учета изменения влажностного режима твердения раствора  $k = 0,8$  и  $k = 0,56$ , уменьшает псевдомодули упругости ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) и сдвиговые псевдомодули упругости ( $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$ ). Мак-

Таблица 2

Значения псевдомодулей упругости  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и псевдомодулей сдвига  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$  при учете изменения влажностного режима твердения раствора, ГПа

Вид кладки	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{23}$	$G_{13}$	$G_{12}$
$k = 0,8$						
Толщиной в полкирпича	6,736	6,042	6,566	2,294	2,887	2,622
Толщиной в один кирпич	6,149	6,010	6,544	2,533	2,670	2,377
Толщиной в два кирпича	Двухрядная система перевязки	6,150	5,925	4,984	2,539	2,678
	Четырехрядная система перевязки	4,532	3,976	4,904	1,609	1,976
$k = 0,56$						
Толщиной в полкирпича	6,409	5,478	6,419	2,273	2,728	2,292
Толщиной в один кирпич	5,686	5,388	6,309	2,213	2,419	2,000
Толщиной в два кирпича	Двухрядная система перевязки	5,646	5,323	4,404	2,222	2,430
	Четырехрядная система перевязки	3,869	3,069	4,436	1,216	1,682
1,183						

симальное влияние коэффициент  $k$  оказывает на наиболее массивную кладку толщиной в два кирпича.

2. Оценка степени уплотнения раствора в вертикальных швах кладки. Наличие пор в материале шва учитывается с помощью уменьшения жесткости материала. Поры моделируются материалом, жесткостные

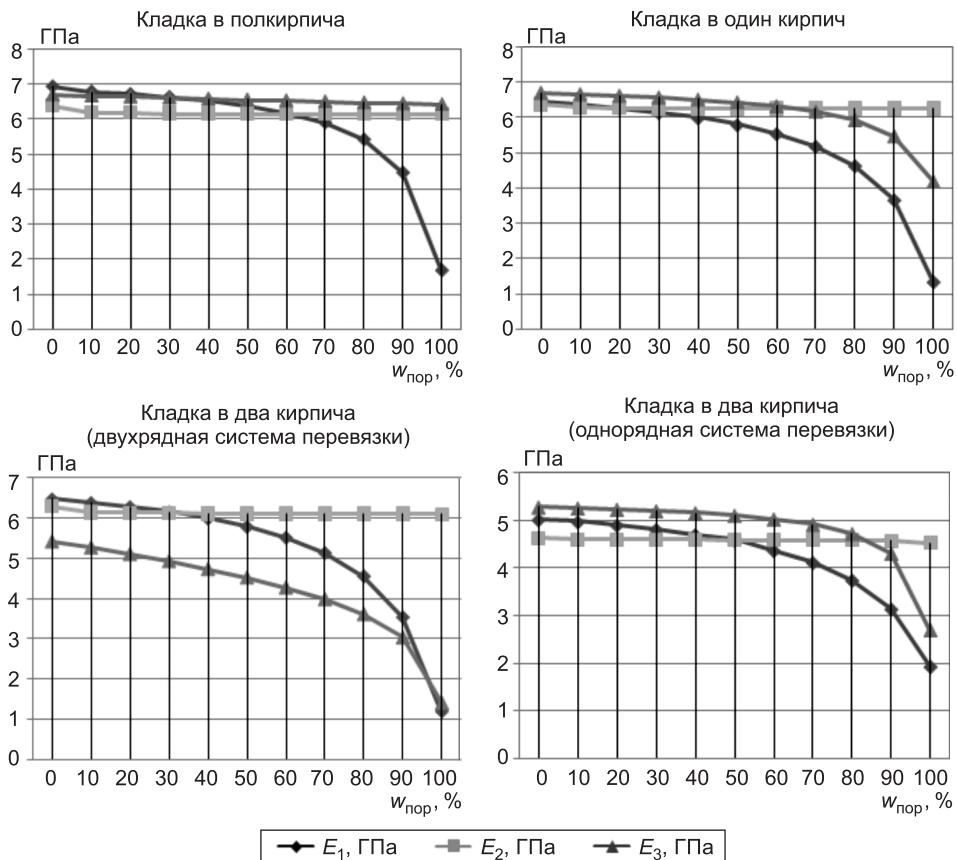


Рис. 2. Диаграммы изменения псевдомодулей упругости  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  в зависимости от процента пористости вертикальных швов кладки

характеристики которого в 50 раз меньше характеристик раствора. Влияние степени уплотнения вертикальных швов в кладке на жесткостные характеристики оценивалось с помощью процента содержания пор в вертикальных швах ( $w_{\text{пор}}$ ). Полученные диаграммы представлены на рис. 2.

Для всех рассмотренных вариантов кладки изменение псевдомодуля упругости  $E_2$  в вертикальном направлении можно считать незначительным. Для  $E_1$  и  $E_3$  можно определить предельное значение процента пор  $w_{\text{пор}}$  (50–70 % в зависимости от вида кладки), до которого изменение псевдомодулей упругости по всем направлениям незначительно, а затем происходит их существенное уменьшение. Для кладок толщиной в кирпич и в два кирпича с двухрядной системой перевязки при  $w_{\text{пор}} = 100 \%$  (что соответствует отсутствию сцепления кирпича и раствора в вертикальном шве) получены значения псевдомодулей  $E_1$ , соответствующие значениям СНиП [1].

Характер изменения сдвиговых псевдомодулей ( $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$ ) существенно зависит как от толщины кладки, так и от способа перевязки (рис. 3). Для всех приведенных видов кладок значения псевдомодулей сдвига уменьшаются с ростом процента пор. Наименьшее влияние наличия пор испытывает псевдомодуль сдвига  $G_{23}$  (в плоскости, перпендикулярной оси 1). Значения сдвиговых модулей  $G_{13}$  и  $G_{12}$  при высоком проценте пор ( $w_{\text{пор}} > 80 \%$ ) близки к значению, приведенному в СНиП [1].

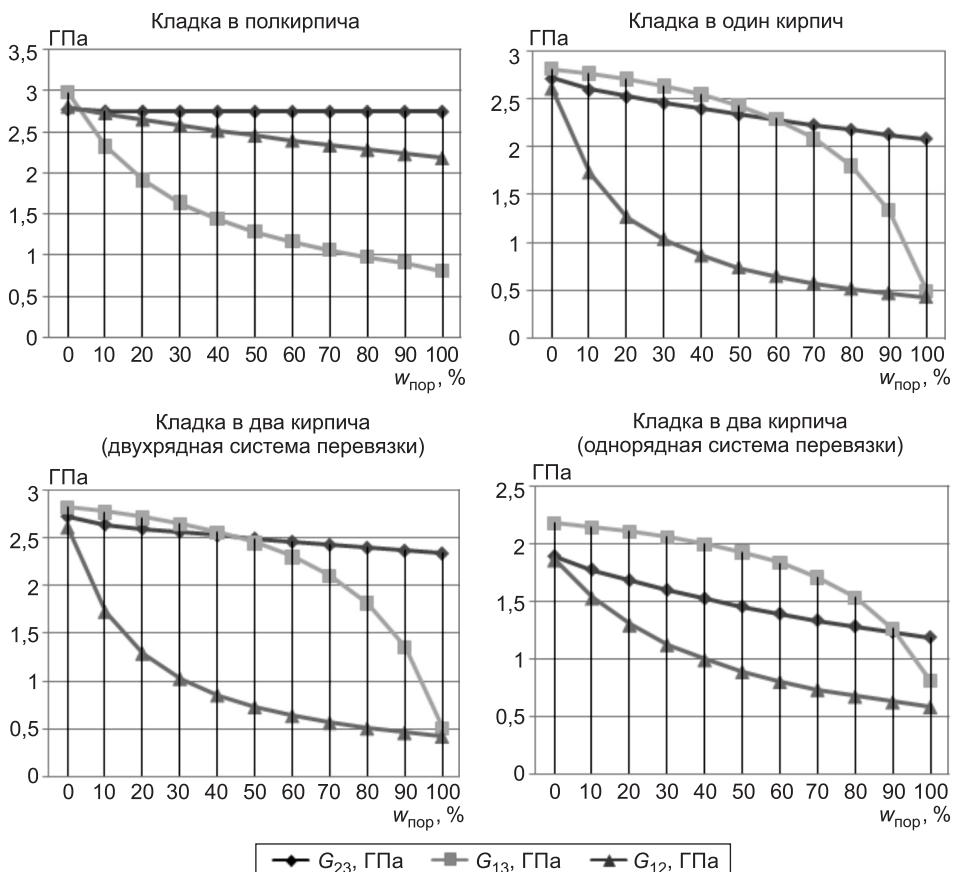


Рис. 3. Диаграмма изменения псевдомодулей сдвига  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$  в зависимости от процента пористости вертикальных швов кладки

3. Оценка влияния пустот в контактной зоне горизонтальных швов, которые образуются из-за неравномерности отсасывания влаги с поверхности раствора. Поры моделируются материалом, жесткостные характеристики которого в 50 раз меньше характеристик раствора.

Влияние зазоров, образующихся из-за неравномерности отсасывания влаги из раствора во время его твердения, на жесткостные характеристики кладки оцениваются относительно процента пор в контактной зоне  $w_{\text{пор}}^{\text{K.3}}$  (слой раствора, граничащий с кирпичом толщиной 2 мм). Результаты расчетов представлены на рис. 4, по диаграммам которого можно сделать вывод, что характер изменения псевдомодулей упругости ( $E_1, E_2, E_3$ ) в зависимости от процента пор в контактной зоне практически не зависит от вида кладки. В направлениях 1 и 3 псевдомодули упругости  $E_1$  и  $E_3$  остаются практически постоянными, а модуль  $E_2$  существенно уменьшается с ростом процента пор  $w_{\text{пор}}^{\text{K.3}}$ . Причем для кладки толщиной в два кирпича и четырехрядной системе перевязки при  $w_{\text{пор}}^{\text{K.3}} = 100\%$   $E_2 = 0,486 \text{ ГПа}$ , что существенно меньше значения модуля упругости, приведенного в СНиП [1].

Зависимости псевдомодулей сдвига от процента пор в горизонтальных швах в контактной зоне представлены на рис. 5. Характер изменения псевдомодулей сдвига также не зависит от толщины кладки и от способа

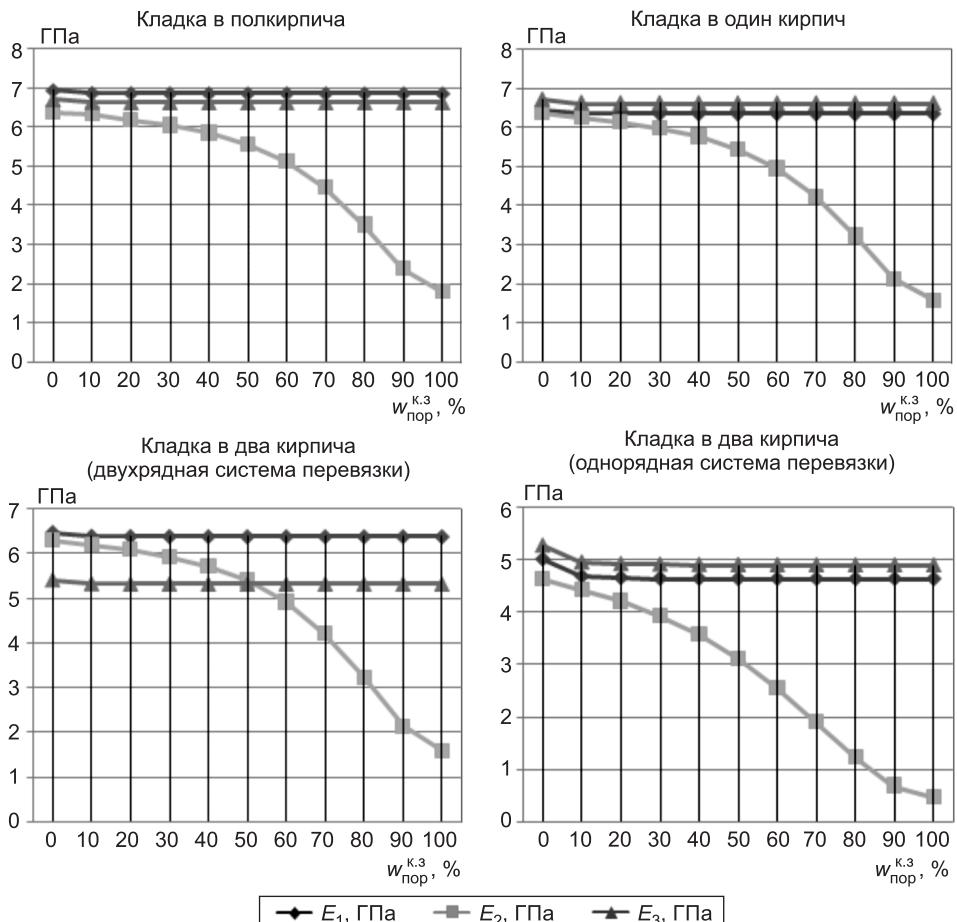


Рис. 4. Диаграммы изменения псевдомодулей упругости  $E_1, E_2, E_3$  в зависимости от процента пористости в контактной зоне

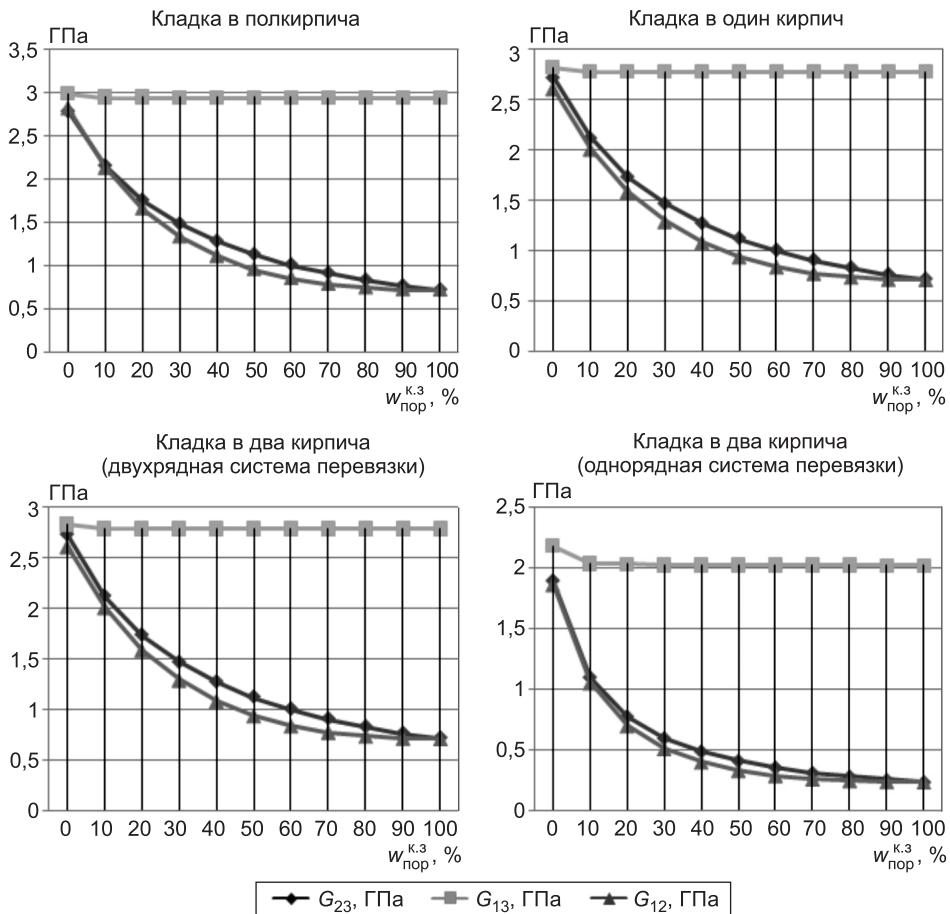


Рис. 5. Диаграммы изменения псевдомодулей сдвига  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$  в зависимости от процента пористости в контактной зоне

перевязки. Псевдомодуль сдвига  $G_{13}$  (в направлении, перпендикулярном оси 2) практически не изменяется для всех рассмотренных видов кладок. Псевдомодули сдвига  $G_{23}$  и  $G_{12}$  нелинейно уменьшаются с ростом процента пор, причем для кладки в два кирпича с однорядной системой перевязки опять получено значение, меньшее значения СНиП [1].

4. Учет изменений работы кирпича в кладке, коэффициент  $k_{y.p.kir}$  = 1,75.

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Уменьшение модуля упругости только кирпича с коэффициентом  $k_{y.p.kir}$  = 1,75 уменьшает характеристики кладки в целом в 1,3–1,7 раза.

Таблица 3  
Учет изменения работы кирпича в кладке, коэффициент  $k_{y.p.kir}$  = 1,75, ГПа

Вид кладки		$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{23}$	$G_{13}$	$G_{12}$
Толщиной в полкирпича		4,217	4,072	4,085	1,879	1,839	1,832
Толщиной в один кирпич		4,088	4,086	4,104	1,798	1,808	1,784
Толщиной в два кирпича	Двухрядная система перевязки	4,122	4,055	3,824	1,799	1,809	1,795
	Четырехрядная система перевязки	3,716	3,697	3,740	1,569	1,608	1,565

Таблица 4

**Значения псевдомодулей упругости  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и псевдомодулей сдвига  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{12}$  при учете совместной работы кирпича и раствора и дефектов, возникающих при возведении кладки, ГПа**

Вид кладки		$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{23}$	$G_{13}$	$G_{12}$
Толщиной в полкирпича		3,58	2,65	3,74	0,65	0,73	0,54
Толщиной в один кирпич		3,20	2,46	3,64	0,37	1,33	0,16
Толщиной в два кирпича	Двухрядная система перевязки	3,19	2,42	2,48	0,38	1,34	0,16
	Четырехрядная система перевязки	2,56	1,14	2,92	0,12	1,08	0,08

Учитывая совместное влияние вышеперечисленных факторов и результаты проведенных расчетов, можно получить жесткостные характеристики кладки, соответствующие значениям СНиП [1]. Результаты, представленные в табл. 4, получены при следующих предположениях:

— изменение работы кирпича в кладке учитывается введением коэффициента  $k_{y.p.kir} = 1,75$ , на который делится модуль упругости кирпича;

— для учета изменения влажностного режима твердения раствора введен коэффициент  $k = 0,8$ ;

— степень уплотнения раствора в вертикальных швах кладки учтена введением пор в вертикальные швы кладки —  $w_{\text{пор}} = 0,69$ ;

— влияние зазоров, которые образуются из-за неравномерности отсыпания влаги из раствора во время его твердения, на жесткостные характеристики кладки учтено введением пор в контактную зону  $w_{\text{пор}}^{k.z} = 0,74$ .

Для уточнения указанных коэффициентов и параметров необходимы дополнительные эксперименты.

**Выводы.** 1. Кирпичную кладку можно моделировать как квазиоднородное анизотропное тело, определяя ее реальные физические характеристики в различных направлениях.

2. Деформационные характеристики кладки зависят от нескольких факторов: толщины кладки, системы ее перевязки, совместной работы кирпича и раствора, наличия дефектов в вертикальных и горизонтальных швах кладки.

3. Предложенная методика моделирования кирпичной кладки может быть использована для получения критерия ее разрушения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции [Текст]. — М., 2003.
2. Онищик, Л.И. Каменные конструкции [Текст] / Л.И. Онищик. — М. : Стройиздат, 1939.
3. Резников, Б.С. Прогнозирование макроскопических свойств структурно-неоднородных сред. Сообщение 1 [Текст] / Б.С. Резников, А.Ф. Никитенко, И.В. Кучеренко // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 2. — С. 10–17.
4. Пангаев, В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций : дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / В.В. Пангаев. — Новосибирск, 2009.

АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КУЧЕРЕНКО Ирина Валерьевна, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*ГРАЧЕВА Мария Сергеевна, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 21.01.13

**Adishchev Vladimir Vasilievich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kucherenko Irina Valerievna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gracheva Mariya Sergeevna**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **MODELING OF THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF BRICK MASONRY**

Masonry represented as a quasihomogeneous isotropic body. Applied model multiphase medium, proposed for finding stiffness properties of masonry. Found stiffness matrix masonry, as structurally inhomogeneous material. The analysis of the influence of defects which arising to making of masonry on the deformation properties of masonry, and is considered the joint work of brick and mortar.

**Key words:** masonry, structurally heterogeneous material, stiffness matrix, the physical characteristics of the material.

### **REFERENCES**

1. CN&P II-22-81. Masonry and reinforced structures [Text]. — M., 2003.
  2. Onishchik, L.I. Stone structures [Text] / L.I. Onishchik. — M. : Stroyizdat, 1939.
  3. Reznikov, B.S. Prediction of the macroscopic properties of heterogeneous media. Message [Text] / B.S. Reznikov, A.F. Nikitenko, I.V. Kucherenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 2. — P. 10–17.
  4. Pangaev, V.V. The development of methods to assess the strength of the study of stone masonry structures : dis. ... doctor of technical sciences [Text] / V.V. Pangaev. — Novosibirsk, 2009.
-

УДК 624.042.5:536.4

Л.В. КУЗНЕЦОВА

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассматривается температурный режим двухслойного ограждения при экстремальном высокотемпературном нагреве. Предложено решение уравнения нестационарной теплопроводности для строительных конструкций, состоящих из материалов с разными теплотехническими свойствами. Результаты расчетов показали, что низкая теплопроводность огнезащитных материалов позволяет погасить температурное возмущение и стать основным сдерживающим фактором при чрезвычайных обстоятельствах.

**Ключевые слова:** двухслойное ограждение, огневое воздействие, температурный режим.

Строительство уникальных зданий и объектов массового пребывания людей, как правило, сопряжено со строгим соблюдением требований пожарной безопасности. Это выражается в активном применении средств своевременного оповещения и пожаротушения, обустройстве противодымной вентиляции и повышении огнестойкости конструкций. Наблюдаемый в последнее время рост негативного влияния человеческого фактора в провоцировании экстремальных ситуаций наряду с перечисленными мероприятиями вызывает необходимость повышения требований ко всем инженерным системам зданий и особенно к строительным конструкциям, выражающихся в увеличении предела огнестойкости, в том числе и для наружных ограждений, учитывая высокую плотность застройки.

Последнее условие может быть обеспечено за счет использования тепловой энергосберегающей изоляции, отвечающей в том числе и противопожарным требованиям. К таким материалам в полной мере относятся плиты на основе базальтового волокна, штапельного стекловолокна, штукатурные составы с наполнителем из минеральных волокон, перлита и вермикулита и т.п. [1].

Для оценки сдерживающего эффекта, вызванного применением тепловой изоляции, рассмотрим достигаемое снижение температурного режима несущего слоя строительной конструкции в случае длительного огневого воздействия. Определить падение температуры при использовании материалов высокого качества можно посредством решения уравнения нестационарной теплопроводности. Так как в последнее время монтируемые строительные конструкции, как правило, состоят из двух основных слоев — несущего и изоляционного, то поместим начало координат оси  $x$  между указанными материалами в соответствии со схемой рис. 1. Часто применяемые полимерная отделка или вентилируемые фасады позволяют рассматривать ограждения как двухслойные, так как возгорание стремительно распространяется по поверхности первых или по защитным от атмосферных осадков пленкам вторых конструкций.

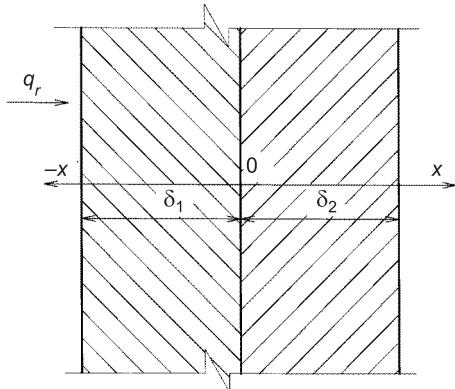


Рис. 1. Схема двухслойного ограждения, подвергаемого огневому воздействию  
x — координата, м;  $\delta_1, \delta_2$  — толщина тепловой изоляции и несущего слоя, м

температурном его нагреве,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  — время, с;  $x$  — координата, м.

Для проведения дальнейших расчетов уравнения теплопроводности (1), (2) перепишем с учетом разницы температур  $\theta_i = T_i - T_{\text{n}}$  в конструкции ограждения  $T_{i=1,2}$  и ее средней величины на поверхности  $T_{\text{n}}$ , не подвергаемой огневому воздействию,

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = a_{\text{пп1}} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = a_{\text{пп2}} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Решение уравнений (3), (4) можно представить в следующем виде:

$$\theta_1 = b_1 x + b_2 (x^2 + 2a_{\text{пп1}} \tau), \quad (5)$$

$$\theta_2 = c_1 x + c_2 (x^2 + 2a_{\text{пп2}} \tau). \quad (6)$$

Дифференцирование (5), (6) в соответствии с выражениями (3), (4) подтверждает, что зависимости (5), (6) являются искомыми решениями.

Для нахождения неизвестных постоянных выражений (5), (6) воспользуемся следующими граничными условиями, учитывающими определяющее влияние огневого воздействия на температурный режим конструкции в целом:

$$\text{при } x = -\delta_1, \quad \theta_1 = \theta_{x=-\delta_1}; \quad (7)$$

$$\text{при } x = 0, \quad \theta_1 = \theta_2; \quad (8)$$

$$\text{при } x = 0, \quad -\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x}; \quad (9)$$

$$\text{при } \tau = 0, \quad \theta_{x=-\delta_1} = \theta_0, \quad (10)$$

где  $\delta_1$  — толщина теплоизоляционного слоя, м;  $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности строительных материалов первого и второго слоев,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

Тогда уравнения, которым подчиняется распределение температуры в рассматриваемом ограждении, имеют вид [2, 3]

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_{\text{пп1}} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_{\text{пп2}} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $T_1, T_2$  — температура соответственно в первом и во втором слоях ограждения,  $\text{°C}$ ;  $a_{\text{пп}i}$  — приведенный коэффициент температуропроводности рассматриваемого слоя [3], определенный для средних параметров материала конструкции при высокотемпературном его нагреве,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  — время, с;  $x$  — координата, м.

Изменение температуры по времени на внешней поверхности ограждения  $\theta_{x = -\delta_1}$ , подвергаемой огневому воздействию, принято в качестве граничного условия, в связи с тем, что данные параметры для существующей классификации пожаров наиболее изучены, и результаты температурных режимов огневого воздействия представлены в нормативной литературе [3, 4].

С учетом имеющихся сведений развития стандартного пожара [3, 4] аппроксимируем изменение температуры на внешней поверхности ограждения линейной зависимостью по времени, которая с достаточной точностью соответствует тепловому режиму стабильной фазы пожара, наступающей после первых 10 мин при возгорании. В результате получаем следующую зависимость:

$$\theta_{x = -\delta_1} = k + m\tau, \quad (11)$$

где  $k$ ,  $m$  — коэффициент и темп режима нагревания, значения которых получаются посредством статистической обработки данных.

Представленное приближение (11) возможно по двум обоснованиям: линейная зависимость часто используется для описания физических процессов, и она также рекомендуется для решения некоторых задач теплопроводности и теплообмена, в том числе и для строительных конструкций [2]. Условия протекания стандартного пожара позволяют получить аппроксимацию вида

$$\theta_{x = -\delta_1} = 742,18 + 0,0279\tau. \quad (12)$$

Выражение (12) соответствует стадии стабильного горения и более адекватно описывает характер изменений после прохождения начальной фазы ( $\tau \geq 10$  мин).

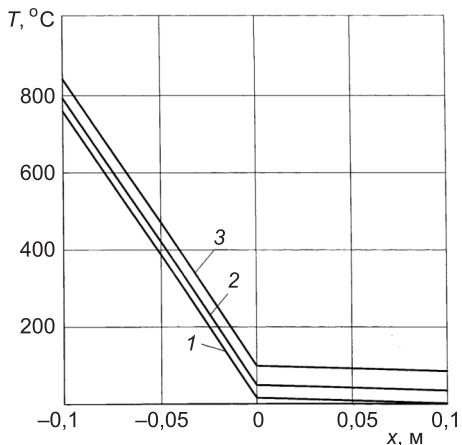
Используя граничное условие (7), находим  $b_1 = \frac{m\delta_1}{2a_{\text{пп1}}} - \frac{k}{\delta_1}$ ,  $b_2 = \frac{m}{2a_{\text{пп1}}}$  и при граничных условиях (8) и (9) получаем  $c_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left( \frac{m\delta_1}{2a_{\text{пп1}}} - \frac{k}{\delta_1} \right)$ ,  $c_2 = \frac{m}{2a_{\text{пп2}}}$ .

Рассмотрим двухслойную конструкцию, состоящую из базальтового утеплителя и слоя монолитного железобетона, который часто используется в строительстве из-за технологичности возведения зданий и высоких прочностных показателей. При утеплении железобетонного ограждения толщиной 100 мм базальтовой минеральной ватой толщиной 100 мм с коэффициентом теплопроводности 0,036 Вт/(м<sup>2</sup> · °C) и плотностью 100 кг/м<sup>3</sup> зависимости (5), (6) приобретают следующий вид:

$$\theta_1 = -7419,675x + 32,518(x^2 + 2 \cdot 0,000429\tau), \quad (13)$$

$$\theta_2 = -139,119x + 15,258(x^2 + 2 \cdot 0,000914\tau). \quad (14)$$

Приведенные на рис. 2 расчетные в соответствии с (13), (14) данные показывают, что основное затухание высокотемпературного возмущения происходит по толщине утеплителя, что, несомненно, является существенным сдерживающим фактором при развитии экстремальных ситуаций.



*Рис. 2. Изменение температуры  $T$  в ограждающей конструкции при развитии пожара*

1 — при  $\tau = 10$  мин; 2 — при  $\tau = 30$  мин;  
3 — при  $\tau = 60$  мин

венных зданий. Это, несомненно, подтверждает перспективу их применения при строительстве объектов, отвечающих требованиям повышенной пожарной безопасности и соответствия энергосберегающей эксплуатации зданий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова, Л.В. К вопросу о комплексной защите строительных конструкций [Текст] / Л.В. Кузнецова // Вестн. МГСУ. — 2011. — № 7. — С. 181–186.
2. Карслой, Г. Теплопроводность твердых тел [Текст] / Г. Карслой, Д. Егер. — М. : Наука, 1964. — 488 с.
3. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий [Текст] / В.М. Ройтман. — М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. — 382 с.
4. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций [Текст]. — Введ. 2006-20-10. — М. : ФГУП НИЦ «Строительство», 2006. — 78 с.

*КУЗНЕЦОВА Любовь Владимировна, младший инспектор; E-mail: Vittorea@yandex.ru*

*Воронежский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий*

Получено 28.01.13

**Kuznetsova Lubov' Vladimirovna**, the younger inspector; E-mail: Vittorea@yandex.ru, Voronezh institute of the State fire service of the Ministry of the Russian Federation on civil defence affairs to extreme situations and liquidation of consequences of acts of nature

#### **THERMAL MODE OF ISOLATION OF PROTECTIONS UNDER EXTREME CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE INFLUENCE**

The temperature mode of a two-layer protection is considered at extreme high-temperature heating. The decision of the equation of non-stationary heat conductivity for

the building designs consisting of materials with different thermo by properties is offered. Results of calculations have shown, that low heat conductivity of fireproof materials, allows to extinguish temperature indignation and to become the basic deterrent at force majeure.

Key words: a two-layer protection, fire influence, a temperature mode.

#### REFERENCES

1. Kuznetsova, L.V. To a question on complex protection of building designs [Text] / L.V. Kuznetsova // Bull. MGSU. — 2011. — N 7. — P. 181–186.
  2. Carslaw, G. Heat conduction of firm bodies [Text] / G. Carslaw, D. Eger. — M. : Science, 1964. — 488 p.
  3. Roitman, V.M. Engineering the decision according to fire resistance of projected and reconstructed buildings [Text] / V.M. Roitman. — M. : Association «Fire safety and a science», 2001. — 382 p.
  4. HUNDRED 36554501-006-2006. Rules on support of fire resistance and ognesohrannosti ferro-concrete designs [Text]. — M. : FSYP FACE DOWNWARDS «Construct», 2006. — 78 p.
-

**УДК 620.178.311.6**

**В.М. ТИХОМИРОВ**

## **РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В МОНОЛИТНОЙ ПАНЕЛИ С РЕБРАМИ**

Представлен расчетно-экспериментальный анализ кинетики развития усталостной трещины в монолитной панели с ребрами, изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т. Разработана методика определения характеристик трещиностойкости материала по результатам испытаний одного образца. С помощью экспериментальных данных и методов численного моделирования исследованы особенности роста трещины в трехмерной постановке. Даны рекомендации по методике определения коэффициента интенсивности напряжений для трещин с криволинейным фронтом.

**Ключевые слова:** усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, трехмерный элемент конструкции, численное моделирование, кинетическая диаграмма разрушения.

Наличие различного рода дефектов и концентраторов напряжений в элементах конструкций является причиной локализации пластических деформаций, которые в условиях циклического нагружения служат очагами зарождения усталостных трещин. Характер этого процесса определяет долговечность конструкций. Поэтому исследование кинетики усталостной трещины положено в основу методики расчета на усталостную прочность. Для трехмерных элементов конструкций также важен вопрос изучения геометрии фронта трещины и расчета характеристик, обуславливающих скорость роста трещины.

Аналитические исследования кинетики распространения усталостных трещин в связи со сложностью можно провести только для достаточно простых случаев: циклическое растяжение тонкой пластины со сквозной трещиной и тела с плоской трещиной, близкой к круговой<sup>1</sup>. Для анализа развития усталостных трещин в пространственных элементах со сложной геометрией используют численные методы. Например, кинетика трещины смешанного типа при изгибе круглого стержня с галтелью изучалась в работе<sup>2</sup>. Развитие первоначально эллиптической поверхностной трещины, выходящей на поверхность пластины, при изгибе представлено в работе<sup>3</sup>. Также определялась геометрия фронта трещины в круглых стальных стержнях, испытывающих чистый изгиб, и выполнялось сравнение с экспериментальными результатами<sup>4</sup>.

При проведении исследований по данной проблеме предполагается, что скорость роста трещины в каждой точке фронта пропорциональна ам-

<sup>1</sup> Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории упругости трещин. Киев: Наук. думка, 1982. 348 с.

<sup>2</sup> Hojfeldt E., Ostervic C.C. Fatigue crack propagation in shafts with shoulder fillets // Eng. Fract. Mech. 1986. Vol. 25, N 4. P. 421–427.

<sup>3</sup> Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В., Коробцов Ф.С. Кинетика изменения фронта поверхностной трещины при осесимметричном изгибе // Проблемы прочности. 1986. № 7. С. 8–13.

<sup>4</sup> Lorentzen T., Kjaer N.E., Henriksen T.K. The application of fracture mechanics to surface cracks in shafts // Eng. Fract. Mech. 1986. Vol. 23, N 6. P. 1005–1014.

плитуде коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Поэтому для изучения кинетики усталостной трещины, развивающейся в трехмерном теле, необходимо установить зависимость величины КИН от геометрии трещины. Коэффициенты интенсивности напряжений для трехмерных тел определяются аналитическими методами [1] или с помощью численного анализа напряженно-деформированного состояния вблизи фронта трещины [2].

Для материалов с высоким уровнем прочности (сталь, алюминиевые и титановые сплавы) предполагается, что скорость роста трещины не зависит от вида напряженного состояния. Однако даже при однородном растяжении тонких пластин фронт усталостной трещины не прямолинейный в результате различной степени стеснения деформаций по ширине пластины. В таких переходных зонах кинетика усталостных трещин не изучена. Мало исследовано влияние на скорость роста и геометрию трещин подкрепляющих элементов типа ребер, а также поля остаточных напряжений, вызванных технологией изготовления и режимом эксплуатации элементов конструкций. В конструкции летательных аппаратов широко применяются монолитные панели с ребрами. Расчет долговечности таких элементов с учетом развития магистральных усталостных трещин — актуальная и сложная проблема. При ее изучении в основном рассматриваются бесконечные панели с ребрами малой величины, где отсутствует влияние границ.

В настоящей работе проведен экспериментально-расчетный анализ развития усталостной трещины в панели с реальной геометрией. В процессе испытания на циклическое растяжение зафиксирована геометрия фронта растущей трещины. Установлены характерные точки фронта трещины, для которых численный способ определения КИН дает достоверные результаты. Получены зависимости КИН от характерных размеров трещины и построена кинетическая диаграмма разрушения.

**Испытания панели.** Из плиты толщиной 35 мм была изготовлена панель с двумя ребрами (рис. 1). Материал плиты — алюминиевый сплав Д16Т со следующими механическими характеристиками: модуль упругости  $E = 7 \cdot 10^4$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 340$  МПа; предел прочности  $\sigma_b = 480$  МПа.

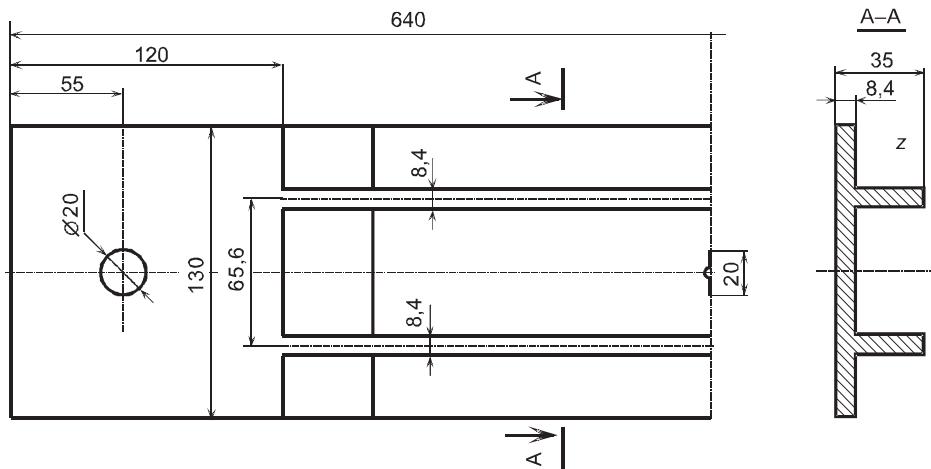


Рис. 1. Геометрия панели

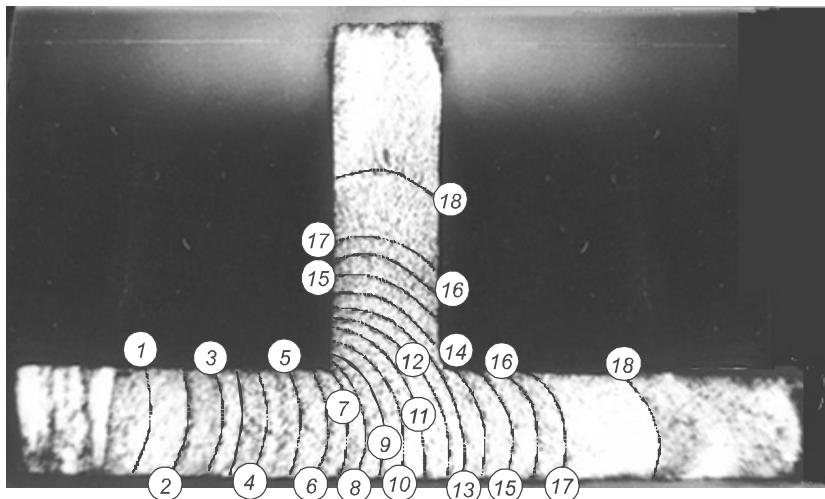


Рис. 2. Вид излома панели

Испытания панели производились на циклическое растяжение со следующими параметрами:  $P_{\max} = 50$  кН ( $\sigma_{\max} = 32,5$  МПа);  $P_{\min} = 10$  кН ( $\sigma_{\min} = 6,5$  МПа); частота нагружений 600 цикл/мин (10 Гц), коэффициент асимметрии цикла  $R = 0,2$ .

В процессе испытаний из острого центрального надреза длиной 20 мм в панели зародилась и развивалась симметрично относительно оси  $y$  усталостная трещина. Для фиксации положения фронта трещины при ее распространении был применен способ перегрузки. Для этого максимальная нагрузка на некотором интервале времени повышалась на 20 % (до  $P_{\max} = 60$  кН). Таким образом, на разных стадиях испытаний было зафиксировано 18 положений фронта усталостной трещины, что можно видеть на фотографии излома панели (рис. 2). Перегрузка на 18-м этапе испытаний вызвала окончательное разрушение панели.

Усилие на образец передавалось через шарнирные захваты. Однако в сечении, где распространялась усталостная трещина, наблюдалось внецентрное растяжение, параметры которого контролировались методами тензометрии.

На каждом этапе испытаний после очередной перегрузки испытательная машина останавливалась, и при статическом нагружении при нагрузке 15 кН методом голограммического муара проводились измерения перемещений берегов усталостной трещины. Для этого на исследуемую поверхность панели наносился металлизированный растр с частотой  $f = 850$  линий/мм. В каллимированном пучке монохроматического света на фотопластинке, прикрепленной на образец, регистрировалась голограмма. На рис. 3 представлено распределение порядков полос интерференции, зафиксированных на 8-м этапе испытаний. Здесь вершина трещины находится в начале координатных осей  $v, r$ . В этой точке начинается полоса интерференции нулевого порядка ( $n_1 = 0$ ).

Величина перемещения  $v$  в направлении, перпендикулярном плоскости трещины, определялась по зависимости<sup>5</sup>

$$v = \frac{1}{2f} (n_1 - n_2), \quad (1)$$

<sup>5</sup> Тырин В.П. Применение метода голограммической интерферометрии для определения коэффициента интенсивности напряжений // ПМТФ. 1990. Т. 30, № 1. С. 155–158.

где  $n_1$  и  $n_2$  — порядки полос, зафиксированные на картине полос интерференции (рис. 3, б) при восстановлении голограммы с двух симметричных направлений  $\pm\alpha$ , которые соответствуют первому дифракционному порядку.

Данные измерений перемещений позволяют проводить контроль граничных условий при численном моделировании задачи.

**Определение КИН по криволинейному фронту трещины.** КИН в точках фронта трещины в трехмерных задачах устанавливается по перемещениям ее берегов. Для этого использовались соотношения, полученные при решении задачи о растяжении пластины с центральной трещиной [3]:

— при плоском напряженном состоянии

$$v(r) = \frac{2K_1}{E\sqrt{\pi c}} \sqrt{2rc - r^2}; \quad (2)$$

— при плоском деформированном состоянии

$$v(r) = \frac{2K_1(1-\nu^2)}{E\sqrt{\pi c}} \sqrt{2rc - r^2}, \quad (3)$$

где  $c$  — полудлина трещины;  $r$  — координата точки, отсчитываемая от вершины трещины.

На изломе панели видно, что фронт изучаемой усталостной трещины не прямолинейный. Для проверки соотношений (2) и (3) методом конечных элементов был проведен расчет напряженно-деформированного состояния пластины без ребер с центральной трещиной ( $c = 15$  мм), фронт которой имел форму дуги окружности радиусом 10 мм. Такая геометрия фронта трещины была зафиксирована на первых четырех этапах испытаний панели. Толщина пластины соответствовала толщине панели 8,4 мм. На рис. 4 приведены результаты расчета перемещений берега трещины в срединной плоскости (черные точки) и на поверхности пластины (светлые точки). Здесь кривая 1 соответствует перемещениям берега трещи-

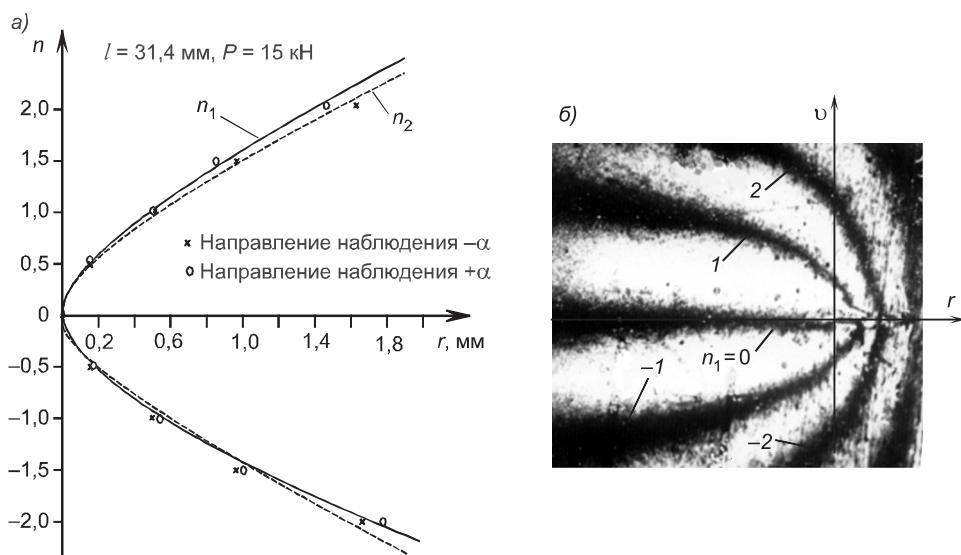


Рис. 3. Распределение порядка муаровых полос у вершины трещины

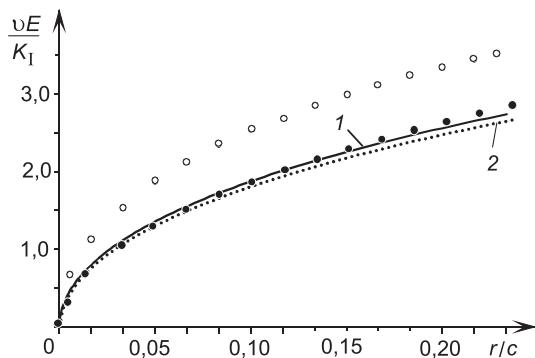


Рис. 4. Перемещение берега трещины

ность расчета для средней точки, где реализуется плоская деформация, составила менее 1 %. При дальнейших исследованиях КИН определялся в точках фронта трещины, лежащих в срединной плоскости панели или ребра, где реализуется плоское деформированное состояние.

Чтобы получить зависимость КИН от характерного размера трещины в исследуемой панели, для 18 вариантов геометрии фронта трещины были построены конечно-элементные модели и проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния. Границные условия на каждом этапе нагружения контролировались путем сравнения перемещений поверхности трещины, полученных экспериментально методом голограммической интерферометрии и по методу конечных элементов. Максимальное расхождение данных по всем этапам испытаний составило не более 12 %.

На рис. 5 представлена зависимость КИН от характерного размера  $l$ , который измерялся от оси симметрии панели до расчетной точки фронта усталостной трещины. Здесь  $k = K_I / \sigma_n$  — приведенное значение КИН,  $\sigma_n = P/A$  — номинальное напряжение;  $A$  — площадь поперечного сечения панели, не ослабленного трещиной. Заштрихованная область на графике соответствует положению ребра жесткости.

**Анализ экспериментальных результатов.** По виду поверхности излома изучена кинетика фронта усталостной трещины. Получено, что на всех стадиях испытаний форма фронта трещины мало отличается от дуги окружности. Только в области угла, при переходе трещины в ребро, кривизна фронта не постоянная. Минимальное значение радиуса 7,25 мм имеет фронт трещины перед разрушением панели, максимальное — 12 мм, в зоне соединения панели с ребром. Радиус кривизны фронта, очевидно, зависит от характера распределения напряженного состояния по фронту трещины.

На каждом этапе испытаний рассчитана скорость роста усталостной трещины (таблица), как отношение прироста размера трещины  $\Delta l$  к числу циклов нагружения  $\Delta N$ .

ны, определенным по формуле (2); кривая 2 — по формуле (3). По перемещениям берега трещины был установлен КИН  $K_I$  в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Значение КИН, рассчитанное в точке фронта, выходящей на свободную поверхность, на 20 % превысило теоретическую величину КИН для бесконечной пластины с центральной трещиной ( $K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$ ). Погреш-

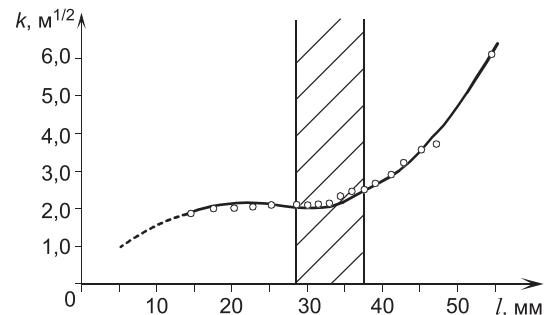


Рис. 5. Зависимость КИН от характерного размера трещины

**Результаты анализа геометрии трещины и расчета КИН**

Этап	Положение точки	Размер трещины $l$ , мм	Радиус кривизны фронта трещины, мм	$\Delta N$ , цикл	$\Delta l / \Delta N$ , мм/цикл	$K_I$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	Приведенный КИН $k$ , м <sup>1/2</sup>
1	Панель	14,2	—	—	—	4,77	1,85
2	»	17,2	10,55	—	—	5,16	2,00
3	»	20,0	10,55	100000	$2,80 \cdot 10^{-5}$	5,15	2,00
4	»	22,6	9,96	85000	$3,06 \cdot 10^{-5}$	5,25	2,04
5	»	24,8	9,68	70000	$3,14 \cdot 10^{-5}$	5,38	2,09
6	»	28,5	8,11	65000	$3,23 \cdot 10^{-5}$	5,50	2,14
7	»	30,0	8,06	39000	$3,84 \cdot 10^{-5}$	5,38	2,09
8	»	31,4	8,06	39000	$3,59 \cdot 10^{-5}$	5,42	2,11
9	»	32,9	8,52	33000	$4,54 \cdot 10^{-5}$	5,60	2,18
10	»	34,4	9,27	24000	$6,25 \cdot 10^{-5}$	5,92	2,30
11	»	35,7	10,23	22000	$6,52 \cdot 10^{-5}$	6,46	2,51
	Ребро		10,23	22000	$5,91 \cdot 10^{-5}$	5,92	2,30
12	Панель	37,7	10,77	18000	$1,00 \cdot 10^{-4}$	6,38	2,48
	Ребро		10,85	18000	$7,22 \cdot 10^{-4}$	6,22	2,42
13	Панель	39,0	12,00	12000	$1,08 \cdot 10^{-4}$	6,74	2,62
	Ребро		11,95	12000	$1,02 \cdot 10^{-4}$	6,31	2,45
14	Панель	40,9	10,87	11000	$1,55 \cdot 10^{-4}$	7,46	2,90
	Ребро		9,70	11000	$1,27 \cdot 10^{-4}$	7,74	3,01
15	Панель	43,0	8,48	9000	$2,33 \cdot 10^{-4}$	8,29	3,22
	Ребро		8,60	9000	$1,67 \cdot 10^{-4}$	8,29	3,22
16	Панель	45,2	7,50	8000	$2,50 \cdot 10^{-4}$	9,20	3,57
	Ребро		7,55	8000	$2,25 \cdot 10^{-4}$	9,06	3,52
17	Панель	47,4	7,35	5000	$4,40 \cdot 10^{-4}$	9,54	3,71
	Ребро		7,25	5000	$3,20 \cdot 10^{-4}$	9,62	3,74
18	Панель	54,7	7,25	3500	$20,86 \cdot 10^{-4}$	15,66	6,09
	Ребро		7,25	3500	$15,14 \cdot 10^{-4}$	13,95	5,42

Зависимость скорости роста трещины от величины КИН аппроксимируется различными соотношениями. Для сравнения с известными экспериментальными результатами использована формула Пэриса [1]

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = C(\Delta K)^m, \quad (4)$$

здесь  $\Delta K$  — амплитуда (размах) КИН;  $C$  и  $m$  — постоянные коэффициенты.

Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов позволила вычислить постоянные  $C$  и  $m$ :  $C = 4,78 \cdot 10^{-8}$ ,  $m = 3,97$ , что хорошо согласуется с данными для алюминиевых сплавов.

В [4] предложено полные кинетические диаграммы усталостного разрушения алюминиевых сплавов от порогового  $K_{th}$  до критического КИН  $K_{fc}$  описывать зависимостью:

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = A \left( \frac{K_{max} - K_{th}}{K_{fc} - K_{max}} \right)^n. \quad (5)$$

Показано, что показатель степени  $n$  для разных сплавов изменяется незначительно и имеет среднее значение  $1,65 (\pm 5\%)$ . Также введен параметр  $a$ , который для различных металлов остается практически постоянным  $a \approx 1,61$ .

$$a = n \frac{p+1}{p-1} \lg p \quad p = \sqrt{\frac{K_{fc}}{K_{th}}} \quad (6)$$

Обработка данных эксперимента (см. таблицу) показала, что при  $\Delta K_{th} = 2,77 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ,  $\Delta K_{fc} = 16,00 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  имеем  $A = 4,56 \cdot 10^{-4}$ ;  $n = 1,71$ ;  $a = 1,58$ . Это согласуется с параметрами, приведенными в работе [4] для алюминиевых сплавов.

На рис. 6 представлена кинетическая диаграмма усталостного разрушения, построенная по результатам эксперимента. Прямая 1 соответствует обработке экспериментальных данных по формуле (4), кривая 2 — аппроксимация с помощью зависимости (5). Черными точками отмечены данные, соответствующие распространению усталостной трещины через ребро, светлыми — по телу панели.

Расчетно-экспериментальный анализ развития усталостной трещины в трехмерном элементе конструкции показал:

- размер трещины хорошо может быть спрогнозирован только для внутренних точек трехмерного тела, так как известные способы не дают точного значения КИН в точках фронта трещины, которые близко лежат к поверхности тела;

- усталостная трещина стремится занять такое положение, которое максимально выравнивает поле напряжений по фронту трещины, что согласуется с гипотезой Г.П. Черепанова [1]. Однако не всегда по фронту усталостной трещины реализуются равные условия, так называемый равновесный фронт (во всех точках фронта КИН постоянный). При распространении трещины в монолитной панели (см. рис. 2) видно, что при приближении к ребру скорость роста трещины в каждой точке фронта имеет

разную величину. После распространения трещины через точку сопряжения ребра с плоскостью панели скорости точек фронта выравниваются, и равновесный фронт имеет место вплоть до разрушения панели;

- кинетические диаграммы, построенные по данным испытаний элементов конструкций, хорошо согласуются с результатами известных испытаний стандартных образцов, а также учитывают влияние остаточных напряжений, которые всегда имеются при изготовлении и меняются в процессе эксплуатации конструкции.

Основным достоинством разработанной методики является упрощение процесса

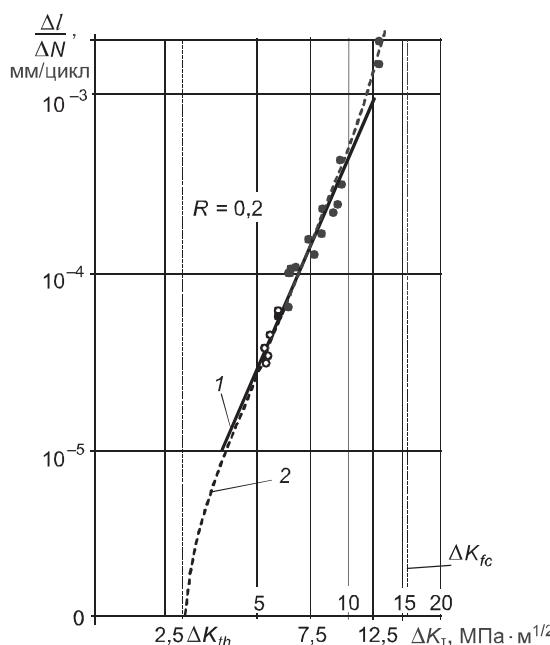


Рис. 6. Кинетическая диаграмма разрушения

дорогостоящих усталостных испытаний. По результатам испытаний только одного образца реальной конструкции получены характеристики трещиностойкости материала, которые могут быть использованы для расчетов на усталостную прочность деталей, имеющих одинаковую технологию изготовления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов. — М. : Наука, 1974. — 640 с.
2. Ахметзянов, М.Х. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещин [Текст] / М.Х. Ахметзянов, В.М. Тихомиров, П.Г. Суровин // Изв. вузов. Строительство. — 2003. — № 1(529). — С. 19–25.
3. Тихомиров, В.М. Аналитические зависимости для определения перемещений поверхности разреза в плоских и трехмерных телах [Текст] / В.М. Тихомиров // Экспериментально-расчетные методы исследования задач прочности : Сб. науч. тр. / СГУПС. — Новосибирск, 2003. — С. 9–33.
4. Ярема, С.М. Исследование роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения [Текст] / С.М. Ярема // ФХММ. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 3–23.

*ТИХОМИРОВ Виктор Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: twm@stu.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено после доработки 09.01.13

**Tikhomirov Viktor Mikhaylovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: twm@stu.ru, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

#### FATIGUE CRACK EXTENSION IN THE MONOLITHIC PANEL WITH RIBBING

The experiment-calculated analysis of fatigue grown in the monolithic panel with ribbing has been considered. The determination technology of fracture toughness parameters by testing data of one example have been design. The bond relations are based on experimental data the crack grown investigation in three-dimensional statement has been considered. The guidelines to the determination technology of stress intensity factors for crack with curvilinear edge are given.

**Key words:** fatigue crack, stress intensity factor, three-dimensional structure component, model of numerical analysis, kinetic failure diagram.

#### REFERENCES

1. Tcherepanov, G.P. Mechanics of brittle failure [Text] / G.P. Tcherepanov. — M. : Science, 1974. — 640 p.
2. Akhmetzyanov, M.Kh. Determining stress intensity factors for mixed types of crack loading [Text] / M.Kh. Akhmetzyanov, V.M. Tikhomirov, P.G. Surovin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2003. — N 1 (529). — P. 19–25.
3. Tikhomirov, V.M. Analytical relations for displacements of a notch surface in two-and three-dimensional solids [Text] / V.M. Tikhomirov // Experimental-computational Methods for Studying Strength Problems : collected scientific papers / Siberian Transport University. — Novosibirsk, 2003. — P. 9–33.
4. Yarema, S.M. Fatigue crack growth investigation and kinetic failure diagrams [Text] / S.M. Yarema // Physico-chemical Mechanics of Materials. — 1977. — Vol. 13, N 4. — P. 3–23.

УДК 539.3

В.А. ШУТОВ, В.Е. МИРЕНКОВ, В.А. ПОЛУЭКТОВ

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА БАЛКИ-СТЕНКИ

Рассмотрена задача теории упругости для балки-стенки. Исследовано четыре варианта граничных условий на опорах и проанализировано их влияние на процесс деформирования. Показано, что все имеющиеся в литературе решения этой задачи недостаточно корректны и могут рассматриваться как первое приближение прямой задачи при последовательном приближении к искомому решению.

**Ключевые слова:** балка-стенка, периметр, интегральные уравнения, решение, обратная задача, напряжения, смещения.

Балка-стенка как элемент конструкций широко используется в строительстве. Балка-стенка опирается на ряд опор, расположенных с постоянным шагом, и нагружена равномерно распределенной нагрузкой  $\sigma_0$ . Предполагается, что средние пролеты находятся в одинаковых условиях, и поэтому для расчета деформирования всей конструкции достаточно решить задачу для пролета балки-стенки.

Достаточно полный обзор и анализ известных решений приведен в [1]. В известных решениях [1] функция Эри для пролета принимается в виде бесконечного ряда, коэффициенты которого выбираются из удовлетворения граничным условиям. Граничные условия на нижней грани  $y = 0$  принимаются в виде трапециевидного графика для нормальных напряжений и условия  $\tau_{xy} = 0$  на опорах. Вне опор

$$\sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_y, \tau_{xy}$  — нормальные и касательные напряжения.

К сожалению, не удалось найти в [1] граничных условий на  $0 \leq y \leq 1, x = 0,1$ . Самое важное в такого рода задачах — это условия на опорах. В [1] не объяснено, почему выбран трапециевидный график нормальных напряжений, зависящий от двух параметров, выбор которых не оговорен при условии идеального проскальзывания на опорах. Понятно, авторы [1] пытались не допустить разрывно-

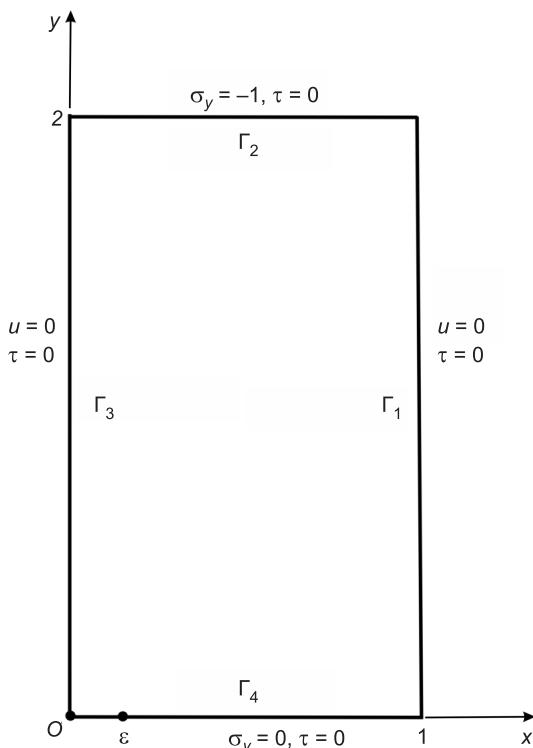


Рис. 1. Расчетная схема для полупролета балки-стенки

сти нормальных напряжений, которая приводит к образованию пластических шарниров в таких точках. Никак не обсуждался в [1] и вопрос о возможности представления  $\sigma_y$  на опорах двумя бесконечными рядами, учитывая единственность решения задачи теории упругости всюду в рассматриваемой области.

В работе расчетная схема представлена половиной пролета, исследуемого в [1], и показана на рис. 1. Такое представление, не увеличивая сложности реализации, позволяет получить дополнительную информацию о деформировании оси симметрии пролета балки-стенки, т.е.  $x = 1$ ,  $0 \leq y \leq 2$ . Все величины, имеющие размерность длины, отнесены к половине длины пролета, а размерность напряжений — к характерной величине напряжений  $\sigma_0$ . Границные условия сформулируем следующим образом:

на  $\Gamma_2$

$$\sigma_y(x) = -1, \tau(x) = 0; y = 2, 0 \leq x \leq 1, \quad (2)$$

на  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_3$

$$u(y) = 0, \tau(y) = 0; x = 0, x = 1; 0 \leq y \leq 2, \quad (3)$$

на  $\Gamma_4$

$$\sigma_y(x) = 0, \tau(x) = 0; y = 0, \varepsilon \leq x \leq 1, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  — половина ширины опоры.

Наиболее неопределенные граничные условия на опоре и в отличие от [1] рассмотрим четыре возможных допускаемых известными связями варианта их формулировок:

$$\sigma_y(x) = -100, \tau(x) = 0; \varepsilon \leq x \leq 1, y = 0, \quad (5)$$

$$\sigma_y(x) = -100, u(x) = 0; \varepsilon \leq x \leq 1, y = 0, \quad (6)$$

$$u(x) = 0, v(x) = 0; \varepsilon \leq x \leq 1, y = 0, \quad (7)$$

$$v(x) = 0, \tau(x) = 0; \varepsilon \leq x \leq 1, y = 0, \quad (8)$$

где  $u, v$  — компоненты смещений в направлении осей  $x$  и  $y$  соответственно. Отметим, что в [1] использовалось условие, близкое к (5), но усложненное условием непрерывности напряжений на опоре.

Граничные значения компонент напряжений и смещений на  $\Gamma$  связаны системой сингулярных интегральных уравнений, которая имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} f(t_0) + 2\mu g(t_0) &= \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\bar{f}(t) + 2\mu \bar{g}(t)}{t - t_0} dt, \\ \kappa \overline{f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} &= \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\kappa \bar{f}(t) + 2\mu \bar{g}(t)}{t - t_0} dt + \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\kappa = 3 - 4\nu$ ,  $\mu = E[2(1+\nu)]^{-1}$  ( $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона);

$$\bar{f}(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds = \bar{f}_1 + i\bar{f}_2, \quad (10)$$

$X_n, Y_n$  — компоненты усилий в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  $g = u + iv$  ( $u, v$  — компоненты смещений в направлении осей  $x$  и  $y$ );

$i$  — мнимая единица; черточка над функцией обозначает комплексно сопряженное значение;

$\Gamma$  — граница рассматриваемой однородной части пластины;

$t_0$  — аффикс точки границы  $\Gamma$ ;

$f_1, f_2$  — соответственно действительная и мнимая части  $f(t)$ .

Система уравнений (9) характеризует одновременно и единообразно все три основные задачи теории упругости, которые могут использоваться в той или иной вариации.

Результаты расчета деформирования контура балки-стенки представлены на рис. 2 для граничных условий (2)–(5). Периметр  $\Gamma$  на рис. 2 развернут в прямую ось  $t$  так, что  $\Gamma_1$  отвечает отрезку  $0 \leq t \leq 1$ ,  $\Gamma_2: 1 \leq t \leq 2$ ,  $\Gamma_3: 2 \leq t \leq 3$ ,  $\Gamma_4: 3 \leq t \leq 4$ . Все остальные случаи (6)–(8) качественно подобны и основное отличие имеет место для  $y = 0$ ,  $0 \leq x \leq \varepsilon$ . Расчеты проводились для  $\varepsilon = 0,01$ ,  $E = 10^4$  МПа,  $v = 0,25$ . Компоненты смещений и для

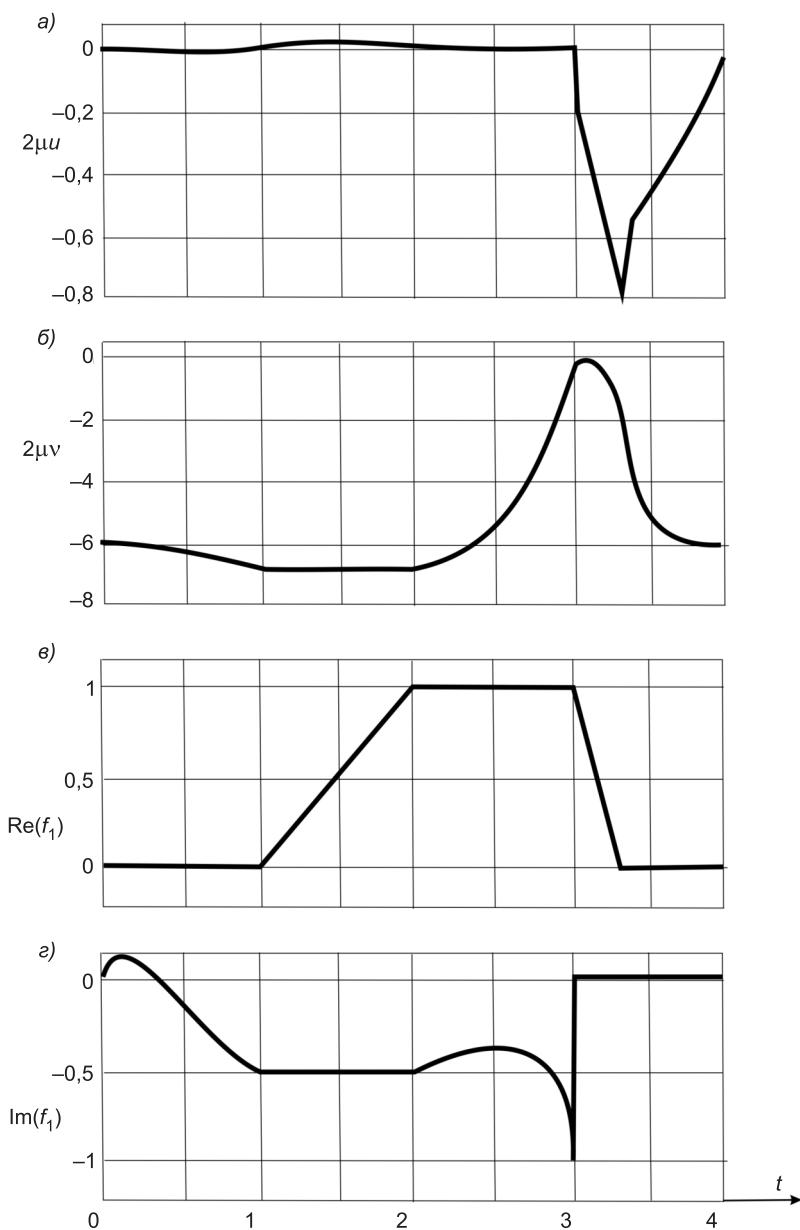


Рис. 2. Деформирование периметра

а, б — компоненты смещений, в, г — функции напряжений (10)

$\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_3$  совпадает для всех вариантов (5)–(8), на  $\Gamma_2$   $u(x) \geq 0$ , а на  $\Gamma_3$   $u(x) \leq 0$  для всех вариантов. Аналогично и для компоненты смещений  $v$ . Относительно компоненты смещений  $v(t)$  отметим только, что во всех случаях смещения точки  $y = 0$ ,  $x = 1$  меньше, чем точки  $y = 2$ ,  $x = 1$ , которые незначительно убывают для  $y = 2$ ,  $x \rightarrow 0$ .

Согласно (10) производная от  $\text{Re}(f_1)$  представляет компоненты напряжений для точек  $\Gamma$  в направлении оси  $y$ , т.е. на  $\Gamma_1$  это  $\tau(y)$ , на  $\Gamma_2$  —  $\sigma_y(x)$ , на  $\Gamma_3$  —  $\tau(y)$ , на  $\Gamma_4$  —  $\sigma_y(x)$ . Производная от  $\text{Im}(f_1)$  представляет компоненты напряжений на  $\Gamma$ , направленные в сторону оси  $x$ . Легко видеть, что нормальные напряжения  $\sigma_x$  на  $\Gamma_1$  имеют перемену знака, аналогично и на  $\Gamma_3$  есть область сжатия, плавно переходящая в растяжения. На  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_4$  производная  $\text{Im}(f_1)$  характеризует касательные напряжения.

В то же время можно утверждать, что ни одно из условий (5)–(8) не удовлетворяет решению задач теории упругости и, действительно, ни идеальное проскальзывание, ни жесткое сцепление в реальности не имеют места. Как показано в [3], формулировка этих граничных условий некорректна и принадлежит к классу обратных задач. Для решения обратной задачи необходима дополнительная информация о смещениях по всему контуру для классических подходов к их реализации и требует регуляризации, представляющей самостоятельную проблему. Полученная точная система уравнений (9) позволяет ограничиться замером смещений только на доступных для наблюдения участках периметра  $\Gamma$  и не требует регуляризации [4].

Первое приближение обратной задачи выбирается из (5)–(8), наиболее близко отвечающее экспериментальным данным по смещениям. Заметим, что в силу точности уравнений (9) и возможности разрешать их как относительно смещений, так и напряжений обеспечивается хорошая сходимость последовательных приближений к точному решению [3].

Контактные задачи сложны и существенно нелинейны вследствие подвижности границ между контактирующими поверхностями. Более тонкие эффекты связаны с тем, что в области контакта могут быть проскальзывания в процессе нагружения, после чего разгрузка конструкции приведет к ситуации, отличной от имевшей место при нагружении.

Итак, рассмотрена задача теории упругости для балки-стенки. Исследовано четыре варианта граничных условий на опорах и проанализировано их влияние на процесс деформирования. Показано, что все имеющиеся в литературе решения этой задачи недостаточно корректны и могут рассматриваться как первое приближение прямой задачи при последовательном приближении к искомому решению.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Адищев, В.В. Уточненное решение классической задачи расчета балки-стенки [Текст] / В.В. Адищев, Н.С. Астапов, В.В. Мальцев // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 97–104.
- Миренков, В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов. — Новосибирск : Наука, 2009. — 176 с.
- Миренков, В.Е. Идентификация свойств, геометрии ослаблений и граничных условий кусочно-однородных пластин [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов, В.А. Полуэктов // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 1. — С. 22–30.
- Миренков, В.Е. О некоторых переопределенных задачах [Текст] / В.Е. Миренков // Тез. докл. междунар. конф. «Обратные и некорректные задачи математической физики». — Новосибирск, 2012. — С. 92.

*ШУТОВ Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

*МИРЕНКОВ Валерий Егорович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

*ПОЛУЭКТОВ Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено 21.01.13

**Shutov Valeriy Alexeevich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Mirenkov Valeriy Egorovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Poluektov Vyacheslav Alexandrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

## ON THE ANALYSIS OF A BEAM-WALL

An elasticity problem for a beam-wall is considered. Four different variants of boundary conditions on the supports are analyzed, and their impact on the deformation process is examined. It is shown that all the solutions to this problem which were reported in the literature are not sufficiently well grounded. They can be considered as a first approximation to the direct problem within a successive approximation of the unknown solution.

**Key words:** beam-wall, perimeter, integral equations, solution, inverse problem, stresses, displacements.

## REFERENCES

1. Adishchev, V.V. Solution refinement classical problem of calculating beam-wall [Text] / V.V. Adishchev, N.S. Astapov, V.V. Maltsev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 6. — P. 97–104.
2. Mirenkov, V.E. Mathematical modeling of mining rock deformation near the weakening [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov. — Novosibirsk : Science, 2009. — 176 p.
3. Mirenkov, V.E. Identification of properties, geometry and boundary conditions for piecewise-homogeneous plates [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov, V.A. Poluektov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 1. — P. 22–30.
4. Mirenkov, V.E. Next following problema [Text] / V.E. Mirenkov // Abstracts / The International Conference. «Inverse and incorrect problems of mathematical Physica». — Novosibirsk, 2012. — P. 92.

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 699.841:666.971.16

В.С. ЛЕСОВИК, Ю.А. БЕЛЕНЦОВ, А.А. КУПРИНА

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ГЕОНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК\*

Предложено для проектирования строительных материалов, работающих в экстремальных условиях, использовать положения геоники. Проанализирована работа композиционных анизотропных материалов при действии динамических и сейсмических нагрузок. Приведены результаты экспериментальных испытаний бетонных образцов с армодемпфером на многоцикловую нагрузку. Установлено, что минимизация внутренней энергии, позволяющая повысить долговечность материалов, достигается за счет рационального взаимодействия структурных элементов и максимального использования потенциала материалов и сырья с учетом их генезиса и морфологии.

**Ключевые слова:** геоника, геонические принципы, экстремальные условия, энергоемкость, анизотропия, армодемпфирующие элементы, нанодисперсные модификаторы.

Особенностью формирования структуры на основе геонических принципов является возможность создавать материалы с широким диапазоном свойств и большим потенциалом долговечности. Принципы геоники подразумевают использование результатов исследования геологических процессов формирования структуры горных пород для проектирования искусственных строительных конгломератов и конструкций на их основе [1]. С помощью нового научного направления — геоники — представляется возможным структурирование материалов с минимальными затратами энергоресурсов за счет применения нанодисперсного сырья с высокой свободной поверхностной энергией [2].

Использование геонических принципов рационально прежде всего для многослойных систем конструкции, работающей в экстремальных условиях, когда требуется перераспределить или поглотить большое количество внешней энергии без нарушения структуры. Известно также, что анизотропные горные породы при тектонических движениях в условиях складчатости менее подвержены разрушениям в сравнении с изотропными.

Технология и условия формирования конгломератной структуры композита в конструкции должны учитывать достоинства и недостатки структурных элементов различных геометрических размеров и уровня значимости. Необходимо рационализировать расчеты технологических и эксплуатационных требований к получаемому материалу, что позволит более эффективно применять сырьевые компоненты и энергоресурсы. Примером может служить кирпичная кладка, в которой используется по-

\* Статья написана в рамках целевой программы «Стратегическое развитие БГТУ им. В.Г. Шухова на 2013–2016 гг.».



Рис. 1. Классификация КАМ по структуре

рядка 10–30 % прочности стенового материала. При увеличении прочности кирпича в 2 раза прочность кладки растет всего на 12 %. Это приводит к тому, что нерациональны кирпич выше М300 и раствор М200, при совместной работе которых прочность кладки составит 3,9 МПа, а при армировании — в 2 раза больше максимальной. Обычно кирпич и раствор имеют прочность до 10 МПа. В твердой фазе, из которой формируется растворный шов или кирпич в кладке, прочность на порядок выше. Например, прочность кристаллической фазы черепка (муллит, кристобалит и др.) составляет порядка 50–100 МПа, цементного камня (этtringит, высоко- и низкоосновные гидросиликаты) — порядка 300–500 МПа.

Разработка композиционных анизотропных материалов (КАМ) — это более эффективное использование свойств сырья. Принципиальными представляются два основных направления получения КАМ: технологический — с помощью анизотропного сырья (композиционное вяжущее, в состав которого входят нанодисперсные модификаторы) или элементов структуры (дисперсное армирование или крупный анизотропный заполнитель); конструктивный — за счет структурных элементов (армирование, демпфирование, армодемпфирование), целенаправленно вводимых в структуру определенным образом для улучшения свойств в заданном направлении (рис. 1).

Минимизация внутренней энергии, позволяющая повысить долговечность материалов, достигается благодаря рациональному взаимодействию структурных элементов и максимальному использованию потенциала материалов и сырья с учетом генезиса и морфологии<sup>1</sup>. Реализация по-

<sup>1</sup> Лесовик В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Изв. вузов. Строительство. 1994. № 7, 8. С. 96–100.

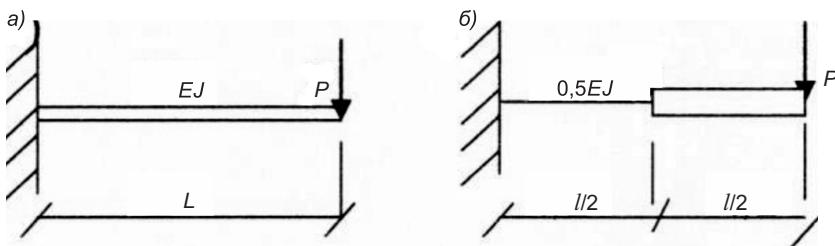


Рис. 2. Расчетная схема консольного изгиба изотропной (а) и анизотропной (б) балки (двуслойной балки)

добного подхода дает возможность формировать структуру наnano-, микро- и макроуровнях, например, армированием каждого уровня.

Использование положений геоники позволяет изменять уровень энергоемкости процесса разрушения. Количество энергии, а значит, и потенциальная возможность восприятия внешней энергии, связаны с понятием энергоемкости материала, т.е. количеством энергии, которое способен воспринять материал. Хрупкие материалы работают эффективно до образования магистральной трещины, с малой протяженностью автомодельной зоны, т.е. объемом материала, вовлеченного в пластические деформации<sup>2</sup>.

Материалы, проявляющие пластические и вязкие деформации, более полно вовлекают в работу объем, в котором развиваются сдвиговые и другие деформации структурных элементов и микротрецчин, изменяющих объем и форму образца [3].

Однако потенциально КАМ за счет высокой энергоемкости при соблюдении оптимального состава и технологии могут применяться в суро-вых условиях. Передача усилий между структурными элементами различной деформативности и размеров приводит к эффективному гашению и перераспределению внешних сейсмических воздействий по сравнению с изотропными материалами. Примером может служить сравнение идеализированных консольных балок при одинаковой нагрузке и сопоставимом модуле деформации (рис. 2).

Идеализированная балка из КАМ состоит из двух участков. Первый, жесткий, с модулем деформации, стремящимся к бесконечности, второй, мягкий, с модулем деформации, равным половине изотропного материала. При одинаковых деформациях на сжатие прогибы консольных балок и угол поворота сечения будут существенно отличаться. При достаточном количестве слоев в анизотропной композиции они приближаются к предложенной выше идеализированной модели. Результаты сравнения показывают, что балки из КАМ имеют большие прогибы без разрушения, а значит, обладают большей энергоемкостью (рис. 3). Коэффициент продольной устойчивости и критическая сила сжатых консольных стержней из идеали-

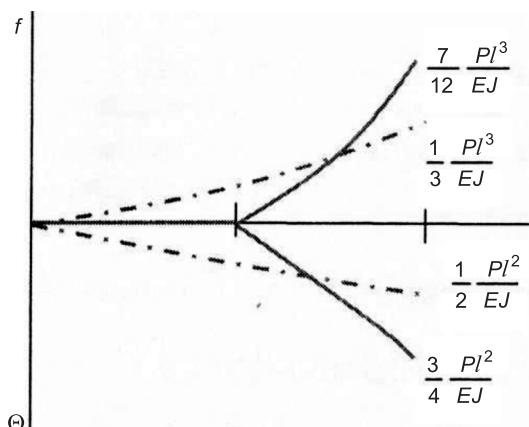


Рис. 3. Прогиб и угол поворота сечения консольных балок из идеализированных изотропных и анизотропных материалов

<sup>2</sup> Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

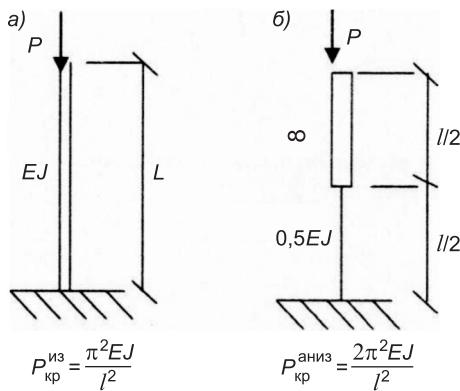


Рис. 4. Расчетная схема сжатого стержня для определения критической силы из идеализированного материала: изотропного (а) и анизотропного (б)

ний в конструкциях, материалы которых должны обладать большой работой деформирования и удельной энергией разрушения [4]. График напряжений — деформации материала должен характеризоваться повышением модуля деформаций при увеличении нагрузки, что присуще эластомерам, но не конструкционным материалам. Использование вязкопластичных материалов сопровождается накоплением пластических деформаций и микротрещин, связанных с нарушением структуры (рис. 5).

Линейная зависимость или снижение модуля деформаций по мере увеличения напряжений свидетельствует либо о хрупком характере разрушения, либо о постепенном накоплении нарушений структуры, что опасно разрушением материала.

Результаты экспериментальных испытаний бетонных образцов с армодемпферами на многоцикловую нагрузку приведены ниже. Для изготовления образцов использовали: соотношение цемент (Ц): песок (П): щебень (Щ) 1 : 1,45 : 2,04 при В/Ц 0,34 с добавкой СП-3 0,8 %. Состав бетонной смеси подвижностью П4 на 1 м<sup>3</sup>, кг: цемент — 500, песок — 725, щебень — 1020, вода — 170, добавка — 9,685. Свойства бетона: плотность 2179 кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W8, средняя прочность серии 46,3 МПа.

Армодемпфирующий элемент выполняли из полимерного раствора песок : полимер 1 : 1; песок стандартного гранулометрического состава;

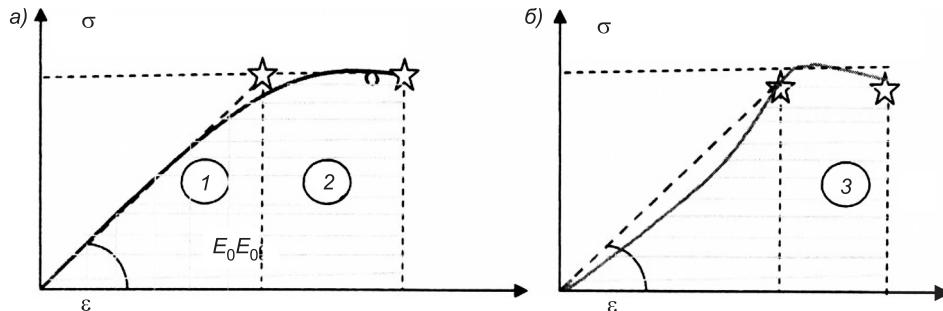


Рис. 5. Удельная работа деформирования на графике  $\sigma$ — $\epsilon$  для хрупкого, вязкопластичного (а) и идеализированного (б) материала

1 — хрупкий; 2 — вязкопластичный материал с сопоставимой прочностью и начальным модулем упругости; 3 — идеализированный материал с повышенной работой деформирования при сохранении структуры в процессе деформирования

зированных изотропных и анизотропных материалов будут отличаться (рис. 4).

Необходимо внедрять материалы и конструкции, способные к большим деформациям при высокой прочности в чрезвычайных условиях, например при землетрясении, но при этом сохраняющие эффективную структуру без разрушения и нарушения деформативности при различных нагрузках. Идеализированный материал должен повышать модуль деформаций по мере увеличения нагрузки, что свидетельствует о сохранении структуры и снижении вероятности резонансных явлений

Таблица 1

**Изменение модуля деформаций образцов**

Вид образцов	Модуль упругости, МПа	Модуль деформаций, МПа	
		перед разрушением	средний
Стандартный (без армодемпфера)			$27,0 \cdot 10^3$
С армодемпфером	$2,94 \cdot 10^3$	$15,8 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$

Таблица 2

**Результаты многоциклового испытания бетонных образцов с армодемпфером при  $P_{асим} = 0,3-0,4$** 

Вид образца	Нагрузка волях от $P_{разр}$		
	0,8	0,7	0,45
Стандартный	$0,6 \cdot 10^3$	$11,8 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^6$
С армодемпфером	$1,2 \cdot 10^3$	$117 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^6$

Причина. При нагрузке 0,45 от разрушающей образцы не разрушились.

армирующая составляющая — сетка с шагом 7 мм, диаметром 1 мм. Армодемпфирующие элементы устанавливали после набора прочности бетона. Толщина армодемпфера, встраиваемого в бетон, 5–7 мм. Совместное действие армирующих и демпфирующих элементов позволяет использовать аддитивный эффект взаимодействия структурных элементов для повышения трещиностойкости, прочности и долговечности цементных композитов.

Изменения модуля деформаций испытанных образцов приведены в табл. 1. В начальный момент времени при загружении и динамическом нагружении выбранная деформация играет положительную роль, позволяя поглощать колебания с обратным знаком без нарушения структуры. Колебания системы не должны превышать максимальную деформацию материала.

Экспериментальная проверка проводилась на аналогичных образцах при загружении 0,8 и 0,7 от разрушающих. При нагрузке 0,45 от разрушающей бетонные образцы выдержали  $2,7 \cdot 10^6$  циклов без разрушения, после испытание прекратилось (табл. 2).

Количество циклов загружения образца с армодемпфером при расчетной нагрузке составило на порядок больше, чем у обычного бетона. Это подтверждает эффективность армодемпфирующих элементов для создания анизотропии свойств композиционных материалов при работе в условиях динамических, многоцикловых и сейсмических нагрузок.

Таким образом, положения геоники позволяют предложить принципы проектирования многослойных конструкций для работы в экстремальных условиях, когда требуется перераспределить или поглотить большое количество внешней энергии без разрушения целостности композита.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи [Текст] / В.С. Лесовик. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 213 с.
- Lesovik, V.S. Senkung der Energieintensitat der Baustoffproduktion durch die Energieanwendung von geologischen- und Technogenprozessen [Text] / V.S. Lesovik // 18. Ibausil. Internationale Konferenz über Baustoffe. — Weimar, 2012.

3. Комохов, П.Г. Реологические модели, используемые для прогнозирования свойств материалов, учитывающие их характер деформирования [Текст] / П.Г. Комохов, Ю.А. Беленцов // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. — 2005. — № 3. — С. 87–89.
4. Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела [Текст] / А.П. Филин. — М. : Наука, 1975. — 828 с.

*ЛЕСОВИК Валерий Станиславович, д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
БЕЛЕНЦОВ Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
КУПРИНА Анна Александровна, асп.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено после доработки 28.01.13

**Lesovik Valery Stanislavovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia  
**Belentsov Yury Alexeevich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia  
**Kuprina Anna Alexandrovna**, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

### **GEONIK PROVISIONS USING FOR STRUCTURAL DESIGN, WORKING UNDER DYNAMIC AND SEISMIC LOADS CONDITIONS**

It is offered to use geonik provision for construction materials design, working in extreme conditions. Work of composite anisotropic materials under action of dynamic and seismic loads was analysed. Results of experimental multicycle load tests of concrete samples with an fiber-dampfer elements are given. It has been established that minimization of the internal energy, allowing to increase durability of materials, is achieved by the rational structural element interaction and the maximum using of materials and raw materials potential with account of their genesis and morphology.

**Key words:** geoniks, geometrical principles, extreme conditions, energy intensity, anisotropy, fiber-dampfer elements, nanodisperse filler.

### **REFERENCES**

1. Lesovik, V.S. Geoniks. Subject and objectives [Text] / V.S. Lesovik // Belgorod : Publ. House of BGTU, 2012. — 213 p.
2. Lesovik, V.S. Senkung der Energieintensität der Baustoffproduktion durch die Energieanwendung von geologischen- und Technogenprozessen [Text] / V.S. Lesovik // 18. Ibausil. Internationale Konferenz über Baustoffe. — Weimar, 2012.
3. Komokhov, P.G. Rheological models used to predict the properties of materials, taking into account their character deformation [Text] / P.G. Komokhov, Yu.A. Belentsov // News of the Petersburg university of means of communication. — 2005. — N 3. — P. 87–89.
4. Philin, A.P. Applied mechanics of deformable solid body [Text] / A.P. Philin. — M. : Science, 1975. — 828 p.

# 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 750 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.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 2–3 (650–651) 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*