

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

№ 12 (636)
Декабрь 2011 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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 29.12.11. Формат 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 10,33+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 900.

ООО «Партнеры Сибири»,
630005, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Сеницкий Ю.Э. К решению динамической задачи для неоднородной конической оболочки с конечной сдвиговой жесткостью 3

Шутов В.А., Полуэктов В.А., Миренков В.Е. Восстановление физических характеристик кусочно-однородных пластин 16

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Бердов Г.И., Никоненко Н.И., Ильина Л.В. Влияние высокодисперсных минеральных добавок на механическую прочность цементного камня 25

Хархардин А.Н. Расчет структурообразующих элементов и состава портландцементного пенобетона. Часть 1 31

Калашников В.И., Гуляева Е.В., Валиев Д.М. Влияние вида супер- и гиперпластификаторов на реотехнологические свойства цементно-минеральных суспензий, порошковых бетонных смесей и прочностные свойства бетонов 40

Перфилов В.А., Зубова М.О., Неизвестный Д.Л. Применение базальтовых волокон и модифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик тяжелых бетонов 46

Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В., Черкасов Д.В.	50
Активная минеральная добавка на основе химически модифицированного диатомита	
Себелев И.М., Машкин Н.А., Шаравин Ю.А. Обеспечение долговечности декоративных порошковых полимерных покрытий по фасадной керамике	56
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Дедов А.С., Мельникова А.С., Попов Н.А., Ткаченко О.В., Абраменков Д.Э. Технология бестраншейной замены трубопроводов водоотведения	62
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Береговой А.М., Береговой В.А., Мальцев А.В., Петрянина М.А. Тепловая эффективность наружных ограждений зданий при фазовых превращениях влаги	73
Самарин О.Д., Федорченко Ю.Д. Построение идентификационной модели процессов управления микроклиматом помещения	80
Шацкий В.П., Гулевский В.А. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников	84
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Бадын Г.М., Мосаков Б.С. Принципы формирования энергосберегающих технологических систем в строительстве	90
Федоров Д.А., Мокляк К.Г. Численное исследование задачи совместного расчета конструкций с основаниями по реализациям в вычислительных комплексах SCAD и «Лира»	97
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Герасимов С.И., Жилкин В.А. Исследование деформирования деревянного нагельного соединения элемента моста методом контактной голографической интерферометрии	105
УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в 2011 г. (с № 1 по № 12)	110

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Обращаем Ваше внимание на дополнения в п. 3 Правил подготовки рукописи. В авторской справке следует указать фамилии, имена, отчества полностью всех авторов на русском и английском языках.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3:624.04

Ю.Э. СЕНИЦКИЙ

К РЕШЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С КОНЕЧНОЙ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

На основе уточненной теории обобщенным методом конечных интегральных преобразований построено новое аналитическое решение осесимметричной динамической задачи для неоднородных по толщине круговых конических оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. Рассматривается произвольное динамическое загружение для оболочки, упруго защемленной по торцам. В расчетной схеме учитываются диссипативные силы вязкого сопротивления. Анализируются напряженное состояние и динамические характеристики оболочек в зависимости от степени неоднородности деградируемых конструкций.

Ключевые слова: коническая оболочка, уточненная теория, конечные интегральные преобразования, аналитическое решение, частоты колебаний, осциллограммы перемещений.

При взаимодействии одной из поверхностей оболочки с физическими или химическими полями, т.е. когда они подвержены интенсивному температурному воздействию, радиационному облучению, действию химически активных сред (факторов наведенной неоднородности), механические характеристики материала становятся переменными по толщине конструкции [1]. В связи с этим возникает необходимость в определении динамических характеристик и оценке напряженно-деформированного состояния подобных конструкций. Таким образом, разработка эффективных методов расчета неоднородных оболочек на нестационарные воздействия представляет актуальную проблему современной строительной механики.

В настоящее время известны аналитические решения соответствующих задач динамики для неоднородных цилиндрических, пологих и непологих сферических оболочек [2–4]. Однако автору не известны аналогичные результаты для конических оболочек даже в случае, когда материал конструкции однородный. В предлагаемой работе на основе уточненной технической теории оболочек, дополненной учетом деформаций поперечного сдвига, инерцией поворота сечений^{1–3}, а также диссипативными силами вязкоупругого сопротивления⁴ при некоторых допущениях (осреднениях), построено аналитическое решение в специальных функциях

¹ Григолюк Э.И., Селезнев И.Т. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. М.: ВИНТИ, 1973. Т. 5. 272 с.

² Сеницкий Ю.Э. Уравнения движения неоднородных оболочек с конечной сдвиговой жесткостью // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 10. С. 19–27.

³ Сеницкий Ю.Э., Еленицкий Э.Я. О физически непротиворечивой модели уточненной теории пластин и оболочек // Докл. РАН. 1993. Т. 331, № 5. С. 580–582.

⁴ Цейтлин А.И., Кусаинов А.А. Методы учета внутреннего трения в динамических расчетах конструкций. Алма-Ата: Наука, 1987. 283 с.

осесимметричной динамической задачи для неоднородной по толщине круговой конической оболочки. Рассматривается общий случай загружения оболочки произвольной осесимметричной динамической нагрузкой, торцы которой упруго защемлены. Модуль упругости $E(z)$ и плотность $\rho(z)$ материала при этом являются произвольными функциями толщинной координаты z ($-h_1 \leq z \leq h_2$), где h_1, h_2 — расстояния от нейтральной до лицевых поверхностей оболочки.

Постановка задачи. Рассмотрим круговую оболочку в виде усеченного конуса высотой H и толщиной $h = h_1 + h_2$ (рис. 1). Воспользуемся системой координат (x^*, φ) . Главными кривизнами поверхности при этом являются круговые параллели $x = \text{const}$ и прямолинейные меридианы $\varphi = \text{const}$. Для неоднородного материала справедливо представление

$$E(z) = E_0 f_1(z), \quad \rho(z) = \rho_0 f_2(z), \quad v = \text{const}. \quad (1)$$

Здесь E_0, ρ_0, v — модуль упругости, плотность материала и коэффициент Пуассона соответствующей однородной конической оболочки; $f_1(z), f_2(z)$ — произвольные безразмерные функции неоднородности.

Воспользуемся сформулированными автором в криволинейных координатах дифференциальными уравнениями движения для неоднородных оболочек произвольной геометрии и конечной сдвиговой жесткости.

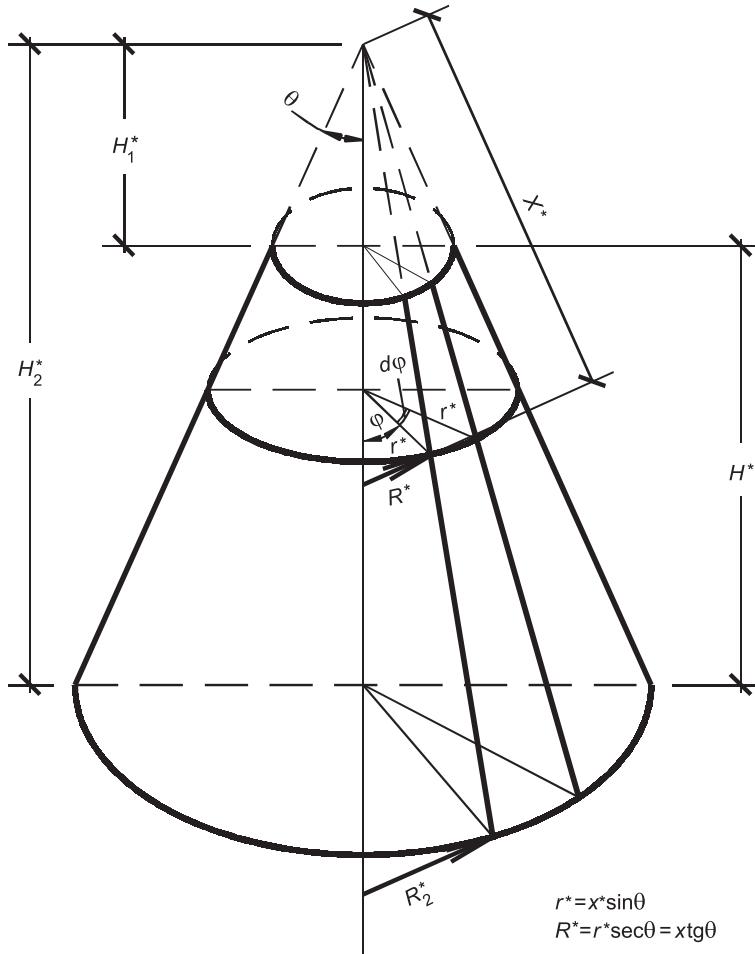


Рис. 1. Геометрическая схема конической оболочки

Если определить положение нейтральной поверхности из условия

$$\int_{-h_1}^{h-h_1} f_l(z) z dz = 0, \quad (2)$$

то формулы для внутренних усилий $N_x^*, N_\varphi^*, M_x^*, M_\varphi^*, Q_x^*$ записываются так же, как для однородной оболочки, причем в случае осевой симметрии они принимают вид

$$\begin{aligned} N_x &= N_x^* C^{-1} = \frac{\partial U}{\partial x} + v x^{-1} \left(U + \frac{1}{\operatorname{tg}\theta} W \right), \\ N_\varphi &= N_\varphi^* C^{-1} = v \frac{\partial U}{\partial x} + x^{-1} \left(U + \frac{1}{\operatorname{tg}\theta} W \right), \\ M_x &= M_x^* R_2 D^{-1} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v x^{-1} \Psi, \\ M_\varphi &= M_\varphi^* R_2 D^{-1} = v \frac{\partial \Psi}{\partial x} + x^{-1} \Psi, \\ Q_x &= Q_x^* C^{-1} = k^2 \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \Psi - x^{-1} \frac{1}{\operatorname{tg}\theta} U \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $U = U^* R_2^{-1}$, $V = 0$, $W = W^* R_2^{-1}$ — тангенциальные и нормальная безразмерные компоненты вектора перемещений;

Ψ — углы поворота сечений в меридиональной плоскости;

$x = x^* R_2^{-1}$ — безразмерная координата;

C и D — соответствующие жесткости неоднородной оболочки

$$\begin{aligned} C &= C_0 n_1 = E_0 h (1 - v^2)^{-1} n_1, \\ D &= D_0 n_2 = E_0 h^3 [12(1 - v^2)]^{-1} n_2, \end{aligned}$$

n_1, n_2 — безразмерные коэффициенты неоднородности упругих характеристик

$$n_1 = h^{-1} \int_{-h_1}^{h-h_1} f_l(z) dz, \quad n_2 = 12 h^{-3} \int_{-h_1}^{h-h_1} f_l(z) z^2 dz, \quad k^2 = k_1 (1 - v) / 2, \quad (4)$$

k_1 — коэффициент поперечного сдвига. Звездочкой обозначены соответствующие размерные величины.

Имея в виду осесимметричный характер деформирования (независимость всех функций от переменной φ), коэффициенты первой квадратичной формы конической поверхности $A = 1$, $B = x \sin \theta$, а также соотношения (3), из общих дифференциальных уравнений получаем разрешающую систему для рассматриваемой оболочки:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{U}{x^2} + \frac{1+v+k^2}{x \operatorname{tg}\theta} \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{1+v}{x^2 \operatorname{tg}\theta} U + \frac{k^2}{x \operatorname{tg}\theta} \Psi - m^2 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -q_x,$$

$$k^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{x^2} \right) - \frac{1+v+k^2}{x \operatorname{tg}\theta} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2(1+v)-k^2 \operatorname{tg}^2 \theta}{x^2 \operatorname{tg}^2 \theta} W -$$

$$-\frac{1+v}{x^2 \operatorname{tg} \theta} U + k^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\Psi}{x} \right) - m^2 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = -q_z, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{\Psi}{x^2} - \frac{k^2 C}{D} R_2^2 \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{k^2 C}{D x \operatorname{tg} \theta} R_2^2 U - \frac{k^2 C}{D} R_2^2 \Psi - s^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\mu_x.$$

В общем случае могут быть заданы такие начальные условия. При $t = 0$

$$U(x, 0) = U_0(x), \quad W(x, 0) = W_0(x), \quad \psi(x, 0) = \psi_0(x), \\ \frac{\partial}{\partial t} U \Big|_{t=0} = \dot{U}_0(x), \quad \frac{\partial}{\partial t} W \Big|_{t=0} = \dot{W}_0(x), \quad \frac{\partial}{\partial t} \psi \Big|_{t=0} = \dot{\psi}_0(x). \quad (6)$$

Для упруго защемленной по торцам конической оболочки граничные условия формулируются следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } x = H_1 \sec \theta = l_1, \quad U = 0, \quad W = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\Psi}{x} = -r_{11} \Psi, \\ \text{при } x = H_2 \sec \theta = l_2, \quad U = 0, \quad W = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\Psi}{x} = r_{11} \Psi \end{array} \right\} \quad (7)$$

Здесь q_x, q_z, μ_x — безразмерные компоненты распределенной по поверхности оболочки осесимметричной линейной и моментной нагрузки:

$$q_x = q_x^* R_2 C^{-1}, \quad q_z = q_z^* R_2 C^{-1}, \quad \mu_x = \mu_x^* R_2^2 D^{-1},$$

t, r_{11} — безразмерное время и коэффициент жесткости упругого защемления торцов оболочки

$$t = t^* R_2^{-1} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0 (1-v^2)}}, \\ r_{11} = r_{11}^* R_2 D, \quad m^2 = \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{h}{R_2} \right)^2 \right] \frac{m_1}{n_1}, \quad s^2 = \left[1 + \frac{3}{20} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right] \frac{m_2}{n_2}. \quad (8)$$

Безразмерные осредненные в интервале (l_1, l_2) коэффициенты неоднородности инерционных характеристик конической оболочки выражаются через функцию $f_2(z)$ по таким зависимостям

$$m_1 = \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{h}{R_2} \right)^2 \right]^{-1} [h(l_2 - l_1)]^{-1} \int_{-h_1}^{h-h_1} \int_{l_1}^{l_2} f_2(z) \left[1 + \frac{z}{R(x)} \right]^2 dx dz, \\ m_2 = \left[1 + \frac{3}{20} \left(\frac{h}{R_2} \right)^2 \right]^{-1} [h^3(l_2 - l_1)]^{-1} \int_{-h_1}^{h-h_1} \int_{l_1}^{l_2} f_2(z) \left[1 + \frac{z}{R(x)} \right]^2 z^2 dx dz, \quad (9)$$

$$U_0(x), \quad W_0(x), \quad \psi_0(x), \quad \dot{U}_0(x), \quad \dot{W}_0(x), \quad \dot{\psi}_0(x)$$

— известные функции, определяющие положение оболочки в начальный момент времени $t = 0$.

Если принять $f_1(z) = f_2(z) = 1$, то из (2) следует $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$, а из (4)

$n_1 = n_2 = 1$ и соответственно упрощаются выражения m_1, m_2 по формулам (9). В этом случае соотношения (5) становятся дифференциальными уравнениями движения для однородной конической оболочки. Равенства

(5)–(7) представляют собой математическую формулировку рассматриваемой начально-краевой задачи.

Метод решения. Вводим на отрезке $x \in [l_1, l_2]$ конечное интегральное преобразование (КИП) с неизвестными компонентами G_1, G_2, G_3 ядра преобразования \bar{G} :

$$\begin{aligned}\varphi(\lambda_i, x) = & \int_{l_1}^{l_2} x [b_1 U(x, t) G_1(\lambda_i x) + b_2 W(x, t) G_2(\lambda_i x) + \\ & + b_3 \psi(x, t) G_3(\lambda_i x)] dx\end{aligned}\quad (10)$$

и соответствующими формулами обращения⁵

$$U(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi G_i \|G_i\|^{-2}, \quad W(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi G_i \|G_i\|^{-2}, \quad \psi(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi G_i \|G_i\|^{-2}. \quad (11)$$

Здесь $\varphi(\lambda_i, x)$ — трансформанта, а $\|G_i\|^2$ — квадрат нормы вектор-функции ядра, т.е.

$$\|G_i\|^2 = \int_{l_1}^{l_2} x [b_1 G_1^2(\lambda_i x) + b_2 G_2^2(\lambda_i x) + b_3 G_3^2(\lambda_i x)] dx, \quad (12)$$

λ_i — вещественные параметры, образующие счетное множество $i = \overline{1, \infty}$;
 b_1, b_2, b_3 — постоянные весовые коэффициенты.

Применяя к уравнениям (5) и начальным условиям (6) разработанный автором структурный алгоритм метода КИП, получаем

$$\frac{d^2 \varphi(\lambda_i, t)}{dt^2} + \gamma_i \lambda_i \frac{d\varphi(\lambda_i, t)}{dt} + \lambda_i^2 \varphi(\lambda_i, t) = P(\lambda_i, t), \quad i = \overline{1, \infty}. \quad (13)$$

При $t = 0$

$$\varphi(\lambda_i, 0) = \varphi_0(\lambda_i), \quad \left. \frac{d}{dt} \varphi(\lambda_i, t) \right|_{t=0} = \dot{\varphi}_0(\lambda_i), \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} G_1'' + x^{-1} G_1' - x^{-2} G_1 - k^2 (\operatorname{tg} \theta x)^{-1} G_2' + k^2 (\operatorname{tg} \theta x)^{-1} G_3 + \lambda_i^2 m^2 G_1 &= 0, \\ k^2 (G_2'' + x^{-1} G_2') - (1 + v) (\operatorname{tg} \theta x)^{-1} (G_1' + x^{-1} G_1) + \\ + k^2 (G_3' + x^{-1} G_3) + \lambda_i^2 m^2 G_2 &= 0, \\ G_3'' + x^{-1} G_3' - x^{-2} G_3 - \frac{k^2 C R_2^2}{D} G_2' - \frac{k^2 C R_2^2}{D} G_3 + \lambda_i^2 s^2 G_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$\varphi_0(\lambda_i), \dot{\varphi}_0(\lambda_i), P(\lambda_i, t)$ — аналогичные (10) трансформанты начальных условий (6) и нагрузки q_x, q_z, μ_x .

При $x = l_1, l_2$

$$G_1 = 0, \quad G_2 = 0, \quad G_3' + v x^{-1} G_3 = \mp r_{11} G_3. \quad (16)$$

Здесь γ_i — коэффициент потерь для каждой моды колебаний i . Штрих означает дифференцирование по переменной x .

⁵ Сеницкий Ю.Э. Исследование упругого деформирования элементов конструкций при динамических воздействиях методом конечных интегральных преобразований. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. 176 с.

Таким образом исходная начально-краевая задача (5)–(7) распалась на задачу Коши (13), (14) для трансформанты $\phi(\lambda_i, t)$ и краевую задачу на собственные значения (15), (16) для компонентов G_1, G_2, G_3 ядра КИП.

З а м е ч а н и е 1. В процессе преобразований в соответствии с методом квазинормальных координат введены по гипотезе Фойхта в уравнение (13) (второй член) силы упруговязкого сопротивления. Такой прием основан на экспериментально подтвержденном факте о том, что силы вязкого сопротивления практически не оказывают влияния на формы колебаний конструкции и их следует вводить в математическую модель после отделения пространственной переменной.

З а м е ч а н и е 2. Использовались также условия инвариантности относительно КИП (10), т.е. самосопряженности начально-краевой задачи (5)–(7) при соответствиях

$$U \sim G_1, \quad W \sim G_2, \quad \psi \sim G_3, \quad \frac{d^2}{dt^2} \sim -\lambda_i^2,$$

а именно

$$b_1 m^{-2} = b_2 m^{-2} = b_3 s^{-2} C R_2^2 D^{-1} = 1. \quad (17)$$

З а м е ч а н и е 3. Система уравнений (15) представлена для случая, когда нормальные силы N_x, N_y не зависят от W , а поперечная сила — от U . Ее интегрирование в дальнейшем выполняется для этого случая.

Решение уравнения (13) для произвольной правой части $P(\lambda_i, t)$ записывается в виде

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_i, t) = & e^{-\beta_i t} \left[\phi_0(\lambda_i) (\cos \alpha_i t + \beta_i \alpha_i^{-1} \sin \alpha_i t) + \phi_0(\lambda_i) \lambda_i^{-1} \sin \alpha_i t + \right. \\ & \left. + \alpha_i^{-1} \int_0^t P(\lambda_i, \tau) \cdot e^{\beta_i \tau} \sin \alpha_i(t-\tau) d\tau \right], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{где } \alpha_i = \left| [\lambda_i^2 (1 - 0,25 \gamma_i^2)]^{1/2} \right|, \quad \beta_i = 0,5 \gamma_i \lambda_i. \quad (19)$$

Вводим потенциалы U и V по формулам

$$G_1 = U', \quad G'_2 + G_3 = k^2 V. \quad (20)$$

В результате подстановки (20) в (15) и интегрирования первого и третьего уравнений с точностью до несущественных постоянных получаем

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 U + a_1 V + a_{2i} U &= 0, \\ \nabla^2 V - a_3 \nabla^2 U + a_{2i} G_2 &= 0, \\ \nabla^2 V - a_4 \nabla^2 G_2 - a_5 V + a_{6i} V - a_{7i} G_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\text{Здесь } \nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + x^{-1} \frac{d}{dx},$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (x \operatorname{tg} \theta) \sim R_0^{-1} = [0,5(H_1 + H_2) \sec \theta \operatorname{tg} \theta]^{-1}, \quad a_{2i} = \lambda_i^2 m^2, \\ a_3 &= a_1(1 + v), \quad a_4 = k^2, \quad a_5 = a_4 C R_2^2 D^{-1}, \quad a_{6i} = \lambda_i^2 s^2, \quad a_{7i} = a_4 a_{6i}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Выражая из второго равенства (21) G_2 и подставляя его в третье уравнение, имеем

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 U + a_1 V + a_{2i} U &= 0, \\ a_{8i} \nabla^2 \nabla^2 V - a_{9i} \nabla^2 \nabla^2 U + a_{10i} \nabla^2 V - a_{11i} \nabla^2 U + a_{12i} V &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} a_{8i} &= a_4 a_{2i}^{-1}, \quad a_{9i} = a_3 a_4 a_{2i}^{-1}, \quad a_{10i} = (a_{7i} + a_{2i}) a_{2i}^{-1}, \\ a_{11i} &= a_3 a_{7i} a_{2i}^{-1}, \quad a_{12i} = a_{6i} - a_5. \end{aligned} \quad (24)$$

Исключаем теперь из системы (23) потенциал V . В результате приходим к уравнению

$$\begin{aligned} a_{13i} \nabla^2 \nabla^2 U(\lambda_i, x) + a_{14i} \nabla^2 \nabla^2 U(\lambda_i, x) + \\ + a_{15i} \nabla^2 U(\lambda_i, x) + a_{16i} U(\lambda_i, x) = 0, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} a_{13i} &= a_{8i} a_1^{-1}, \quad a_{14i} = (a_{2i} a_{8i} + a_1 a_{9i} + a_{10i}) a_1^{-1}, \\ a_{15i} &= (a_{2i} a_{10i} + a_1 a_{11i} + a_{12i}) a_1^{-1}, \quad a_{16i} = a_{2i} a_{12i} a_1^{-1}. \end{aligned} \quad (26)$$

Вводим порождающее дифференциальное уравнение второго порядка

$$\nabla^2 U(\lambda_i, x) = -\xi_i^2 U(\lambda_i, x). \quad (27)$$

После подстановки (27) в (25) приходим к такому кубическому уравнению относительно $\eta_i = \xi_i^2$:

$$a_{13i} \eta_i^3 - a_{14i} \eta_i^2 + a_{15i} \eta_i - a_{16i} = 0, \quad (28)$$

корни которого $\eta_{ik} (\xi_{ik})$, $k = 1, 2, 3$, определяются по формулам Кардана.

Принимая во внимание дифференциальный оператор (22), замечаем, что соотношение (27) представляет уравнение Бесселя и его решение для каждого ξ_{ik} ($k = 1, 2, 3$) записывается в виде

$$U(\lambda_i, x) = C_{1k}^i J_0(\xi_{ik} x) + C_{2k}^i Y_0(\xi_{ik} x). \quad (29)$$

Из первого равенства (23) с учетом (27) определяется второй потенциал $V(\lambda_i, x)$.

Наконец, располагая U , V и соотношением (29), из равенства (20) и второго уравнения (21) получим компоненты вектор-функции ядра КИП G_1 , G_2 , G_3 . Окончательно для всех $\xi_{ik} (\lambda_{ik})$, $k = 1, 2, 3$ имеем

$$\begin{aligned} G_1(\lambda_i, x) &= - \sum_{k=1}^3 \xi_{ik} [C_{1k}^i J_1(\xi_{ik} x) + C_{2k}^i Y_1(\xi_{ik} x)], \\ G_2(\lambda_i, x) &= \sum_{k=1}^3 \xi_{ik}^2 a_{2i}^{-1} [(\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} - a_3] [C_{1k}^i J_0(\xi_{ik} x) + C_{2k}^i Y_0(\xi_{ik} x)], \\ G_3(\lambda_i, x) &= \sum_{k=1}^3 \xi_{ik}^2 a_{2i}^{-1} [(\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} - a_3] - k^2 (\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} \} \times \\ &\quad \times \xi_{ik} [C_{1k}^i J_1(\xi_{ik} x) + C_{2k}^i Y_1(\xi_{ik} x)]. \end{aligned} \quad (30)$$

В формулах (29), (30) $J_0(\dots)$, $J_1(\dots)$, $Y_0(\dots)$, $Y_1(\dots)$ — функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно первого и второго рода; C_{1k}^i , C_{2k}^i ($k = 1, 2, 3$) — произвольные постоянные интегрирования.

Дальнейшее решение связано с определением собственных значений λ_i и собственных функций, т.е. постоянных C_{1k}^i, C_{2k}^i в (30). В результате подстановки равенств (30) в граничные условия (16) формируется такая однородная система алгебраических уравнений относительно C_{1k}^i, C_{2k}^i ($k = 1, 2, 3$):

$$\left. \begin{array}{l} \delta_{11}^{(i)} C_{11}^i + \delta_{12}^{(i)} C_{12}^i + \dots + \delta_{16}^{(i)} C_{23}^i = 0, \\ \dots \\ \delta_{61}^{(i)} C_{11}^i + \delta_{62}^{(i)} C_{12}^i + \dots + \delta_{66}^{(i)} C_{23}^i = 0. \end{array} \right\} \quad (31)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \delta_{1j}^{(i)} &= \xi_{ik} J_1(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{2j}^{(i)} = b_{ik} J_0(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{3j}^{(i)} = \xi_{ik} d_{ik} \xi_{ik} J_0(\xi_{ik} l_1) - \\ &- [(1-v)l_1^{-1} - r_{11}] J_1(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{4j}^{(i)} = \xi_{ik} J_1(\xi_{ik} l_2), \quad \delta_{5j}^{(i)} = b_{ik} J_0(\xi_{ik} l_2), \\ \delta_{6j}^{(i)} &= \xi_{ik} d_{ik} \xi_{ik} J_0(\xi_{ik} l_2) - [(1-v)l_2^{-1} + r_{11}] J_1(\xi_{ik} l_2) \quad \text{при } j = 1, 2, 3, \\ \delta_{1j}^{(i)} &= \xi_{ik} Y_1(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{2j}^{(i)} = b_{ik} Y_0(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{3j}^{(i)} = \xi_{ik} d_{ik} \xi_{ik} Y_0(\xi_{ik} l_1) - \\ &- [(1-v)l_1^{-1} - r_{11}] Y_1(\xi_{ik} l_1), \quad \delta_{4j}^{(i)} = \xi_{ik} Y_1(\xi_{ik} l_2), \quad \delta_{5j}^{(i)} = b_{ik} Y_0(\xi_{ik} l_2), \\ \delta_{6j}^{(i)} &= \xi_{ik} d_{ik} \xi_{ik} Y_0(\xi_{ik} l_2) - [(1-v)l_2^{-1} + r_{11}] Y_1(\xi_{ik} l_2) \quad \text{при } j = 4, 5, 6, \\ b_{ik} &= \xi_{ik}^2 a_{2i}^{-1} [(\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} - a_3], \quad d_{ik} = b_{ik} - k^{-2} (\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1}. \end{aligned} \quad (32)$$

Из условия нетривиальности решения системы (31) приравниваем ее главный детерминант нулю. В результате получаем трансцендентное уравнение для определения параметров λ_i ($i = 1, \infty$):

$$D(\lambda_i) = \begin{vmatrix} \delta_{11}^{(i)} & \delta_{12}^{(i)} & \dots & \delta_{16}^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{61}^{(i)} & \delta_{62}^{(i)} & \dots & \delta_{66}^{(i)} \end{vmatrix} = 0. \quad (33)$$

З а м е ч а н и е 4. Фактически (33) является частотным уравнением. Действительно, имея в виду равенство (8), круговые частоты колебаний неоднородной оболочки ω_i связаны с λ_i по формуле

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{R_2} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0 (1-v^2)}}, \quad i = 1, \infty. \quad (34)$$

При определении λ_i и ω_i организуется итерационный процесс решения трансцендентного уравнения (33) совместно с (28). На каждой итерации i , задаваясь λ_i по формулам (22), (24), (26), вычисляются коэффициенты $a_{13i}, a_{14i}, a_{15i}, a_{16i}$ и корни $\eta_{ik}(\xi_{ik})$ уравнения (28). По выражениям (32) находятся $\delta_{1j}, \delta_{2j}, \dots, \delta_{6j}$ ($j = 1, 6$) и проверяется удовлетворение уравнения (33). Затем этот цикл повторяется.

Отбрасывая последнее уравнение (31), из оставшейся системы выражаем постоянные $C_{11}^i, C_{12}^i, C_{13}^i, C_{21}^i, C_{22}^i$ через C_{23}^i , т.е.

$$\begin{aligned} C_{11}^i &= A_1^i A_6^{-1} C_{23}^i, \quad C_{12}^i = A_2^i A_6^{-1} C_{23}^i, \quad C_{13}^i = A_3^i A_6^{-1} C_{23}^i, \\ C_{21}^i &= A_4^i A_6^{-1} C_{23}^i, \quad C_{22}^i = A_5^i A_6^{-1} C_{23}^i, \end{aligned}$$

где

$$A_6^i = \begin{vmatrix} \delta_{11}^{(i)} & \delta_{12}^{(i)} & \dots & \delta_{15}^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{51}^{(i)} & \delta_{52}^{(i)} & \dots & \delta_{55}^{(i)} \end{vmatrix}. \quad (35)$$

Определители $A_1^i, A_2^i, A_3^i, A_4^i, A_5^i$ следуют из A_6^i путем замены в нем каждый раз соответственно первого, второго, третьего, четвертого и пятого столбцов на столбец

$$\left\| -\delta_{16}^{(i)} - \delta_{26}^{(i)} - \delta_{36}^{(i)} - \delta_{46}^{(i)} - \delta_{56}^{(i)} \right\|^T.$$

Не ограничивая общности рассуждений, принимаем $C_{23}^i = A_6^i$, откуда следует

$$C_{11}^i = A_1^i, \quad C_{12}^i = A_2^i, \quad C_{13}^i = A_3^i, \quad C_{21}^i = A_4^i, \quad C_{22}^i = A_5^i. \quad (36)$$

Формулы обращения (11) совместно с выражениями (18), (19) и (30), (36), а также трансцендентным уравнением (33) представляют решение рассматриваемой осесимметричной динамической задачи для неоднородной конической оболочки.

Частные случаи. Результаты расчета. Рассмотрим некоторые частные случаи загружения и закрепления торцов оболочки.

1. Пусть на коническую оболочку, находящуюся в положении равновесия

$$U_0(x) = W_0(x) = \psi_0(x) = \dot{U}_0(x) = \dot{W}_0(x) = \dot{\psi}_0(x) = 0, \quad (37)$$

$$\varphi_0(\lambda_i) = \dot{\varphi}_0(\lambda_i) = 0,$$

действует внезапно приложенная равномерно распределенная по боковой поверхности нагрузка интенсивностью $q^* = \text{const}$, т.е.

$$q_z = qH(t), \quad q_x = \mu_x = 0. \quad (38)$$

Здесь $H(t)$ — единичная функция О. Хэвисайда.

$$q = q^* R_2 C^{-1}.$$

Имея в виду равенство (10), а также выражения (17), (37), (38), трансформанта КИП (18) принимает вид

$$\varphi(\lambda_i, t) = q\alpha_i^{-1} e^{-\beta_i t} \left[\int_{l_1}^{l_2} x G_2(\lambda_i, x) dx \right] \int_0^t e^{\beta_i \tau} \sin \alpha_i (t - \tau) d\tau. \quad (39)$$

Вычисляя последовательно с учетом (30) квадратуры, содержащиеся в (39), получаем

$$\varphi(\lambda_i, x) = q \sum_{k=1}^3 \xi_{ik}^2 a_{2i}^{-1} [(\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} - a_3] \times$$

$$\times \{C_{1k}^i \xi_{ik}^{-1} [l_2 J_1(\xi_{ik} l_2) - l_1 J_1(\xi_{ik} l_1)] + C_{2k}^i \xi_{ik}^{-1} [l_2 Y_1(\xi_{ik} l_2) - l_1 Y_1(\xi_{ik} l_1)]\} \times \quad (40)$$

$$\times (\alpha_i^2 + \beta_i^2)^{-1} [1 - e^{-\beta_i t} (\beta_i \alpha_i^{-1} \sin \alpha_i t + \cos \alpha_i t)].$$

2. Действие на оболочку равномерно распределенной по поверхности вибрационной нагрузки. Имеем

$$q_z(x_i, t) = p \sin \Omega t, \quad (41)$$

где p — безразмерная амплитуда вибрационной нагрузки;

Ω — частота изменения полных циклов такого воздействия.

Принимая во внимание равенство (41) и повторяя приведенные выше преобразования, окончательно имеем

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda_i, t) = & \frac{p}{2} (\alpha_i \beta_i)^{-1} e^{-\beta_i t} \sum_{k=1}^3 \xi_{ik}^2 a_{2i}^{-1} [(\xi_{ik}^2 - a_{2i}) a_1^{-1} - a_3] \{ C_{lk}^i \xi_{ik}^{-1} [l_2 J_1(\xi_{ik} l_2) - \\ & - l_1 J_1(\xi_{ik} l_1)] + C_{2k}^i \xi_{ik}^{-1} [l_2 Y_1(\xi_{ik} l_2) - l_1 Y_1(\xi_{ik} l_1)] \} \langle e^{\beta_i \tau} [\beta_i^2 + (\Omega + \alpha_i)^2] \times \\ & \times \{ \beta_i \cos[(\Omega + \alpha_i) \tau - \alpha_i t] + (\Omega + \alpha_i) \sin[(\Omega + \alpha_i) \tau - \alpha_i t] \} - \\ & - e^{\beta_i \tau} [\beta_i^2 + (\Omega - \alpha_i)^2] \times \{ \beta_i \cos[(\Omega - \alpha_i) \tau + \alpha_i t] + \\ & + (\Omega - \alpha_i) \sin(\Omega - \alpha_i) \tau + \alpha_i t] \} \rangle \Big|_{\tau=0}^{t=t}. \end{aligned} \quad (42)$$

Аналогичным путем могут быть рассмотрены и другие загружения оболочки.

Если проварировать коэффициент жесткости r_{11} , то можно исследовать различные идеализированные схемы закрепления торцов оболочки.

1) шарнирное закрепление торцов $x = H_1 \sec \theta$, $x = H_2 \sec \theta$ ($x = l_1, l_2$). В этом случае в граничных условиях (16), а также в выражениях (31) $\delta_{1j}^{(i)}$, $\delta_{2j}^{(i)}, \dots, \delta_{6j}^{(i)}$ следует принять коэффициент жесткости $r_{11} = 0$;

2) жесткое защемление по торцам конической оболочки. Для подобных граничных условий необходимо разделить соответствующие уравнения (16) и выражения (32) на r_{11} , а затем осуществить предельные переходы $r_{11} \rightarrow \infty$;

3) если проделать описанную в п. 1) процедуру для первых трех уравнений (16) и соответствующих равенств (32) $\delta_{1j}^{(i)}, \delta_{2j}^{(i)}, \dots, \delta_{6j}^{(i)}$ ($j = 1, 2, 3$), а затем приведенную в п. 2) для оставшихся соотношений (16) и (32), т.е. $\delta_{1j}^{(i)}, \delta_{2j}^{(i)}, \dots, \delta_{6j}^{(i)}$ ($j = 4, 5, 6$), то получим решение для случая шарнирно опертоей оболочки на торце $x = l_1$ и жестко защемленной на краю $x = l_2$.

Наконец, если функции неоднородности $f_1(z) = f_2(z) = 1$, а следовательно, из (4) $n_1 = n_2 = 1$, а по равенствам (9) и формулам (22), (24), (26) упрощаются выражения m_1, m_2, a_{li} , то построенное решение (11), (18), (30) справедливо в этом случае для однородных конических оболочек.

В качестве примера рассматривалась железобетонная защитная оболочка реакторного отделения АЭС в случае малой аварии. Такая штатная ситуация, предусматриваемая при проектировании защитных оболочек, может возникнуть внутри реакторного отделения при разрыве одного из трубопроводов и сопровождаться резким возрастанием температуры и скачкообразным повышением давления. К этому надо добавить также повышенный радиационный фон в результате ионизирующего излучения.

Таким образом, одна из поверхностей конической оболочки оказывается подверженной однородному радиационному и температурному полю (фактором наведенной неоднородности) и равномерно распределенному по поверхности конструкции внезапно приложенному скачку давления. Имея в виду особую ответственность (внеклассовость) сооружения, нежелательными при этом являются развитие пластических деформаций и магистральных трещин, т.е. перфорации конструкции. Приведенные выше соотношения (30), (32)–(34), (36), (38), (40), полученные на осно-

ве линейной теории, позволяют в данном случае дать оценку, как изменяются при этом динамические характеристики (частотный спектр) и податливость конструкции. Расчеты проводились для единичного воздействия $q^* = 1 \text{ кН}/\text{м}^2$ при следующих данных:

$$H^* = 60 \text{ м}, R_2^* = 23,13 \text{ м}, E_0 = 4,1 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$\rho_0 = 2,85 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, \theta = 6^\circ,$$

$$R_1^* = 16,5 \text{ м}, v = 0,16, h = 1,2 \text{ м}, k = 0,86, \gamma_i = 0,01, r_{11} = 0.$$

Приняты линейные законы неоднородности, соответствующие частичной деградации материала оболочки

$$f_1(z^*) = 0,5 \left(1 + \frac{z^* + h_1}{h} \right), \quad f_2(z^*) = 0,75 + 0,25 \frac{z^* + h_1}{h},$$

при которых значения E и ρ на внешней поверхности оболочки $z^* = h_2 = h - h_1$ сохраняются, т.е. $E(h_2) = E_0, \rho(h_2) = \rho_0$.

Частоты колебаний конических оболочек

№ тона колебаний i	Однородная оболочка		Неоднородная оболочка	
	$\lambda_i (i = \overline{1,5})$	$(2\pi)^{-1} \omega_i, \text{ Гц}$	λ_i	$(2\pi)^{-1} \omega_i, \text{ Гц}$
1	0,662	17,52	0,583	15,43
2	0,942	24,46	0,672	17,79
3	0,957	25,33	0,782	20,68
4	1,273	33,68	0,961	25,42
5	1,448	38,71	1,017	26,91

В таблице приведены собственные значения $\lambda_i (i = \overline{1,5})$ и соответствующие им частоты свободных осесимметричных колебаний $\omega_i (2\pi)^{-1}$ конической оболочки без учета и с учетом наведенной неоднородности. Вследствие деградации конструкции при наведенной неоднородности происходит заметное снижение частот колебаний, а сам спектр становится более плотным. Аналогичная картина наблюдается на графиках, приведенных на рис. 2, характеризующих изменения частот первых пяти тонов колебаний

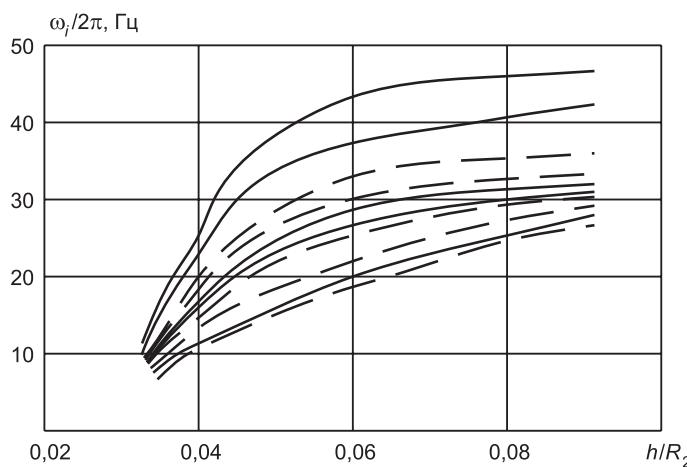


Рис. 2. Зависимость частот $\omega_i / 2\pi (i = 1,5)$ от относительной толщины h/R_2 однородных и неоднородных конических оболочек

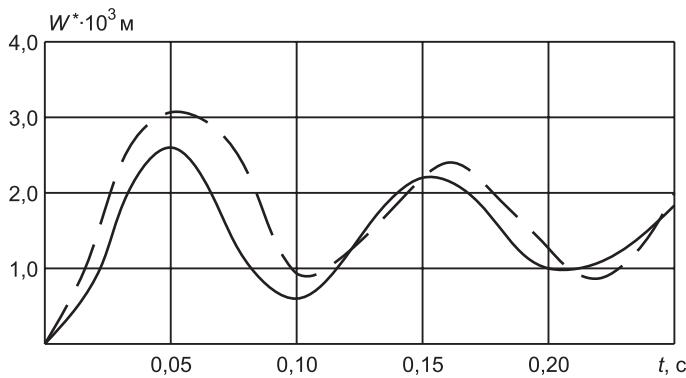


Рис. 3. Осциллограммы нормальных перемещений W^* в сечении посередине однородной и неоднородной оболочек

$\omega_i/2\pi$ в зависимости от относительной толщины h/R_2 однородных и неоднородных оболочек. Сплошные линии соответствуют однородным коническим оболочкам, а пунктирные — неоднородным.

На рис. 3 представлена осциллограмма нормальных перемещений W^* в сечении $x^* = \left(H_1^* + \frac{H^*}{2} \right) \sec \theta$ оболочки при указанном выше воздействии. Следует отметить, что оболочка совершает затухающие колебания относительно положения статического равновесия, не совпадающего с ее первоначальным недеформированным состоянием. Как и следовало ожидать, при частичной деградации материала конструкции возрастают более чем на 15 % максимальные перемещения по сравнению с W_{\max}^* в однородных оболочках.

Вместе с тем следует отметить, что такое не столь существенное снижение жесткости конструкции произошло в результате заметного уменьшения на одной из ее поверхностей соответственно на 50 и 25 % модуля деформации и плотности в результате деградации материала оболочки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров, В.В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1987. — 288 с.
2. Сеницкий, Ю.Э. К решению осесимметричной динамической задачи для неоднородной по толщине цилиндрической оболочки с конечной сдвиговой жесткостью [Текст] / Ю.Э. Сеницкий, И.Е. Козьма // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 2. — С. 8–18.
3. Сеницкий, Ю.Э. Об интегрируемости начально-краевой задачи динамики для неоднородной пологой сферической оболочки [Текст] / Ю.Э. Сеницкий // Вест. Самар. гос. ун-та. — 1998. — № 2(8). — С. 106–121.
4. Сеницкий, Ю.Э. Динамика неоднородной непологой сферической оболочки [Текст] / Ю.Э. Сеницкий // Изв. РАН. МТТ. — № 6. — С. 144–157.

СЕНИЦКИЙ Юрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 02.11.11

Senitskiy Yurii Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

NEW APPROACH TO THE SOLUTION OF THE DYNAMIC PROBLEM FOR INHOMOGENEOUS CONICAL SHELL WITH FINITE SHEAR RIGIDITY

New analytical solution of the axisymmetric dynamic problem for circular conical shells with inhomogeneous thickness and finite shear rigidity was developed on the basis of improved theory by generalized method of finite integral transformations.

Arbitrary dynamic load for the shells with rigidly clamped edges is considered. Dissipative forces of viscous resistance are taken into account in the calculation. The stress state as well as dynamic characteristics of the shells depending on the degree of its heterogeneity is analyzed.

Key words: conical shell, improved theory, finite integral transformations, analytical solution, oscillation frequency, oscillogram moves.

REFERENCES

1. Petrov, V.V. Calculation of the structural elements interacting with corrosive medium [Text] / V.V. Petrov, I.G. Ovchinnikov, Yu.M. Shikhov. — Saratov : Saratov Univ. Press, 1987. — 288 p.
2. Senitskiy, Yu.E. New approach to the solution of the dynamic problem for inhomogeneous conical shell with finite shear rigidity [Text] / Yu.E. Senitskiy, I.E. Kozma // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 2. — P. 8-18.
3. Senitskiy, Yu.E. On the integrability of the boundary value dymanic problem for the inhomogeneous shallow spherical shell [Text] / Yu.E. Senitskiy // Vestnik of the Samara State Univ. — 1998. — N 2 (8). — P. 106-121.
4. Senitskiy, Yu.E. The dynamics of an inhomogeneous nonshallow spherical shell [Text] / Yu.E. Senitskiy // RAN. MTT. Press. — N 6. — P. 144-157.

УДК 539.3

В.А. ШУТОВ, В.А. ПОЛУЭКТОВ, В.Е. МИРЕНКОВ

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КУСОЧНО-ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН***

Получена система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения нормальных и касательных напряжений и смещений. Это позволяет при решении обратных задач исключить процесс регуляризации и строить приближенное решение с наперед заданной точностью. Выписаны выражения для определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона составных пластин. Проблема сводится к итерационной процедуре.

Ключевые слова: пластина, обратная задача, интегральные уравнения, регуляризация, граничные условия, решение, сходимость, точность, некорректность.

Кусочно-однородные пластины, работающие в условиях плосконапряженного состояния, находят применение в инженерной практике, так как представляют конструкции с уникальными прочностными и деформационными характеристиками, которые практически невозможно достичь использованием конструкционных материалов. Характерная особенность составных пластин, рассматриваемых как конструкция, заключается в том, что материал и составная пластина создаются одновременно, в рамках единого технологического процесса. Единство процессов создания пластины, материала и технологии диктует новый подход к нахождению механических параметров, определяющих соотношений, основанный непосредственно на результатах комплексного экспериментально-аналитического анализа поведения составляющих элементов пластины. Традиционные экспериментальные методы определения деформационных характеристик, базирующиеся на испытаниях представительных образцов, зачастую оказываются неудовлетворительными в связи с существенным влиянием на результаты измерений условий закрепления, способа нагружения, неоднородности напряженно-деформированного состояния и технологических трудностей изготовления образцов. Поэтому достоверную информацию о свойствах кусочно-однородных пластин можно получить лишь на основе результатов испытаний таких пластин, что приводят к необходимости использования для этих целей методов идентификации.

Численный метод решения задачи идентификации в общем случае состоит из трех самостоятельных проблем: решения прямой задачи деформирования пластины, анализа чувствительности целевой функции по исключенным параметрам (проектным переменным) и поиска глобального минимума целевой функции, т.е. необходима регуляризация.

Составные пластины могут иметь различную сложную структуру, заданную конструктором (природой), например, в них могут быть распределенные отверстия, поры. Сложная структура может возникнуть и в процессе изготовления и эксплуатации пластин. Как одно из актуальных направлений развития можно отметить получение и исследование пластин, имеющих в своем составеnanoструктуры (например, один из слоев пластины имеет на порядок меньшую высоту по сравнению с окружающими

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00133).

в кусочно-однородной пластине). Такие кусочно-однородные пластины могут обладать уникальными характеристиками.

Можно выделить два подхода оценки прочности составных пластин сложной структуры: моделирование поведения пластины с учетом индивидуальных характеристик каждого слоя; определение интегральных (приведенных) механических характеристик пластин. Наиболее эффективным для определения механических характеристик составных пластин является второй подход, в котором используются экспериментальные исследования. В то же время кусочно-однородные пластины как конструкции могут математически моделировать реальные объекты. Характерным примером может служить расчет целика, оставляемого в выработанном пространстве шахты. Именно в этом смысле рассматривается пластина как конструкция.

Существуют и развиваются различные приближенные подходы. Это связано с тем, что разработанные схемы, например наиболее широко используемого метода конечных элементов, имеют ряд ограничений. При построении конечномерной аппроксимации напряженно-деформированного состояния упругого тела достаточно трудно получить двустороннюю оценку сходимости численного процесса. Это обстоятельство не позволяет эффективно контролировать ошибки вычислений, связанные, например, с дискретизацией задачи, погрешностями округления, численным интегрированием и т.п. Разрывы функций компонент тензора напряжений на границах элементов, связанные с применением негладких аппроксимаций перемещений, нарушают уравнения равновесия и приводят к появлению паразитных поверхностных сил. Интегральное задание граничных условий в напряжениях не гарантирует точности их выполнения при конечномерном моделировании. Повышение достоверности вычислительных методов, уменьшение неопределенностей, связанных с физическими и (или) геометрическими упрощениями, обуславливают необходимость применения строгих методов верификации и валидации. Под верификацией понимается определение точности численного моделирования выбранной модели, а валидация есть определение степени достоверности описания исследуемого явления с помощью избранного численного метода, т.е. проверка того, насколько данная математическая модель и ее численная реализация согласуются с соответствующими экспериментальными данными.

Рассмотрим кусочно-однородную пластину, представленную на рис. 1, моду-

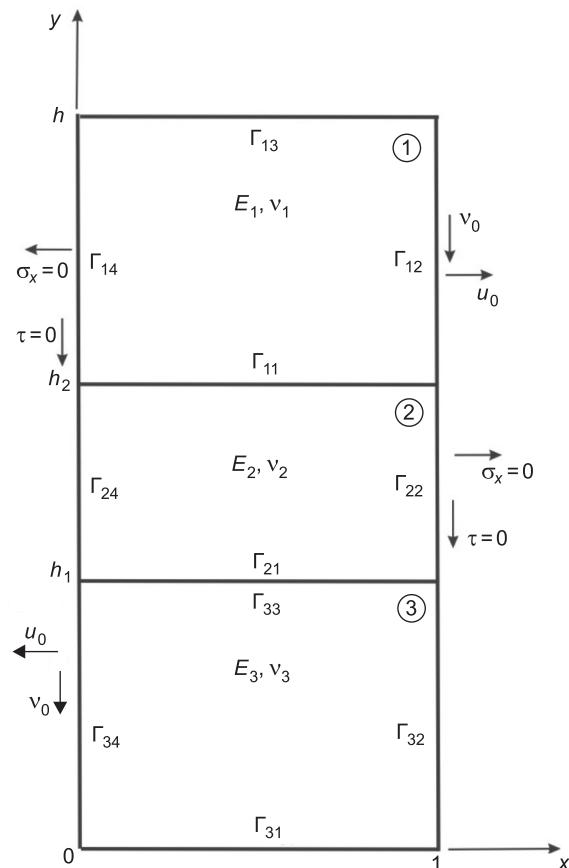


Рис. 1. Расчетная схема пластины

ли Юнга и коэффициенты Пуассона частей которой подлежат определению. Величины, имеющие размерность длины, отнесены к ширине пластины, а размерность напряжений — к характерному значению на $\Gamma_{31}(\Gamma_{13})$. Периметр пластины обозначим через

$$\Gamma = \Gamma_{31} + \Gamma_{32} + \Gamma_{22} + \Gamma_{12} + \Gamma_{13} + \Gamma_{14} + \Gamma_{24} + \Gamma_{34}.$$

Систему сингулярных интегральных уравнений, связывающую граничные значения компонент напряжений и смещений для каждой из составных частей пластины, имеем в виде [1]

$$\begin{aligned} f(t_o) + 2\mu g(t_o) &= \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_o} dt, \\ \kappa \overline{f(t_o)} - 2\mu \overline{g(t_o)} &= \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\kappa \overline{f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_o} dt + \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_o}{t - t_o}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\kappa = 3 - 4v$, $\mu = E[2(1 + v)]^{-1}$ (E — модуль Юнга, v — коэффициент Пуассона);

$$f(t) = i \int_o^t (X_n + iY_n) ds = f_1 + if_2; \quad (2)$$

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;

Γ — граница рассматриваемой однородной части пластины;

t_o — аффикс точки границы Γ ;

f_1 и f_2 — соответственно действительная и мнимая части $f(t)$.

Система уравнений (1) описывает одновременно и единообразно все три основные задачи теории упругости, которые могут использоваться в той или иной вариации.

Будем предполагать, что по частям периметра Γ_{13} и Γ_{31} действуют внешние усилия, а части $\Gamma_{12} + \Gamma_{22} + \Gamma_{32}$ и $\Gamma_{14} + \Gamma_{24} + \Gamma_{34}$ свободны от напряжений, т.е.

$$\sigma_x = 0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_{12}, \Gamma_{22}, \Gamma_{32}, \Gamma_{14}, \Gamma_{24}, \Gamma_{34}. \quad (3)$$

Дополнительно к (3) будем считать известными из эксперимента на $\Gamma_{12} + \Gamma_{22} + \Gamma_{32}$ и $\Gamma_{14} + \Gamma_{24} + \Gamma_{34}$ компоненты смещений

$$u = u_0(y), \quad v = v_0(y), \quad (4)$$

т.е. имеем переопределенные граничные условия (3) и (4) на боковых гранях $x = 0$ и $x = 1$ и, вообще говоря, полностью неизвестные на Γ_{13} и Γ_{31} . В классической постановке [2, 3] необходимо иметь кроме (3) и (4) известными аналогичные функции на Γ_{13} и Γ_{31} , поэтому рассматриваемая здесь проблема более сложная и не имеет аналога в мировой практике. Для исключения процедуры регуляризации при восстановлении упругих характеристик необходимо иметь уравнения, связывающие компоненты нормальных и касательных напряжений и смещений на границе рассматриваемой области в виде (1), (2).

Разрешая систему (1) относительно смещений для боковой грани верхней части составной пластины $x = 1$, $h_2 \leq y \leq h$, получаем

$$4\mu_1\alpha_1 = v_1\alpha_2 + \alpha_3, \quad (5)$$

$$4\mu_1\alpha_4 = v_1\alpha_5 + \alpha_6,$$

где

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= u_{12}(y) - \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{yu_{11}ds}{(s-1)^2 + y^2} - \int_1^0 \frac{(\Delta-y)u_{13}ds}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} - \right. \\
&\quad \left. - \int_{\Delta}^0 \frac{u_{14}ds}{(s-y)^2 + 1} \right\} + \frac{1}{\pi} \left\{ - \int_0^1 \frac{y[(s-1)^2 - y^2]u_{11} - 2(s-1)y^2v_{11}}{[(s-1)^2 + y^2]^2} ds + \right. \\
&\quad \left. + \int_1^0 \frac{(\Delta-y)[(s-1)^2 - (\Delta-y)^2]u_{13} + 2(s-1)(\Delta-y)^2v_{13}}{[(s-1)^2 + (\Delta-y)^2]^2} ds - \right. \\
&\quad \left. - \int_{\Delta}^0 \frac{[(s-y)^2 - 1]u_{14} + 2(s-y)v_{14}}{[(s-y)^2 + 1]^2} ds \right\}, \\
\alpha_2 &= -4f_{121}(y) - \frac{4}{\pi} \int_0^{\Delta} \frac{f_{122}ds}{s-y} - \\
&\quad - \frac{4}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{(s-1)f_{112} - yf_{111}}{(s-1)^2 + y^2} ds + \int_1^0 \frac{(s-1)f_{132} + (\Delta-y)f_{131}}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} ds + \right. \\
&\quad \left. + \int_{\Delta}^0 \frac{f_{141} + (s-y)f_{142}}{(s-y)^2 + 1} ds \right\}, \\
\alpha_3 &= -2f_{121}(y) + \frac{4}{\pi} \int_0^{\Delta} \frac{f_{122}ds}{s-y} + \\
&\quad + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{4(s-1)f_{112} - 2yf_{111}}{(s-1)^2 + y^2} ds + \int_1^0 \frac{4(s-1)f_{132} + 2(\Delta-y)f_{131}}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} ds + \right. \\
&\quad \left. + \int_{\Delta}^0 \frac{2f_{141} + 4(s-y)f_{142}}{(s-y)^2 + 1} ds \right\} + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{2y[(s-1)^2 - y^2]f_{111} - 4(s-1)y^2f_{112}}{[(s-1)^2 + y^2]^2} ds - \right. \\
&\quad \left. - \int_1^0 \frac{2(\Delta-y)[(s-1)^2 - (\Delta-y)^2]f_{131} + 4(s-1)(\Delta-y)^2f_{132}}{[(s-1)^2 + (\Delta-y)^2]^2} ds + \right. \\
&\quad \left. + \int_{\Delta}^0 \frac{2[(s-y)^2 - 1]f_{141} + 4(s-y)f_{142}}{[(s-y)^2 + 1]^2} ds \right\}, \\
\alpha_4 &= v_{12}(y) + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{yv_{11}ds}{(s-1)^2 + y^2} + \int_1^0 \frac{(\Delta-y)v_{13}ds}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} + \right. \\
&\quad \left. + \int_{\Delta}^0 \frac{v_{14}ds}{(s-y)^2 + 1} \right\} + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{2(s-1)y^2u_{11} + y[(s-1)^2 - y^2]v_{11}}{[(s-y)^2 + y^2]^2} ds + \right. \\
&\quad \left. + \int_1^0 \frac{2(s-1)(\Delta-y)^2u_{13} - (\Delta-y)[(s-1)^2 - (\Delta-y)^2]v_{13}}{[(s-1)^2 + (\Delta-y)^2]^2} ds - \right. \\
&\quad \left. - \int_{\Delta}^0 \frac{2(s-1)u_{14} - [(s-1)^2 - 1]v_{14}}{[(s-1)^2 + 1]^2} ds \right\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_5 = & -4f_{122}(y) + \frac{4}{\pi} \int_0^\Delta \frac{f_{121} ds}{s-y} + \frac{4}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{(s-1)f_{111} - y f_{112}}{(s-1)^2 + y^2} ds + \right. \\
& \left. + \int_1^0 \frac{(s-1)f_{131} + (\Delta-y)f_{132}}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} ds + \int_\Delta^0 \frac{f_{142} + (s-y)f_{141}}{(s-y)^2 + 1} ds \right\}, \\
\alpha_6 = & -2f_{122}(y) - \frac{4}{\pi} \int_0^\Delta \frac{f_{121} ds}{s-y} - \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{4(s-1)f_{111} - 2y f_{112}}{(s-1)^2 + y^2} ds + \right. \\
& + \int_1^0 \frac{4(s-1)f_{131} + 2(\Delta-y)f_{132}}{(s-1)^2 + (\Delta-y)^2} ds + \int_\Delta^0 \frac{2f_{142} + 4(s-y)f_{141}}{(s-y)^2 + 1} ds \Big\} - \\
& - \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{4(s-1)y^2 f_{111} + 2y[(s-1)^2 - y^2]f_{112}}{[(s-1)^2 + y^2]^2} ds + \right. \\
& + \int_1^0 \frac{4(s-1)(\Delta-y)^2 f_{131} - 2(\Delta-y)[(s-1)^2 - (\Delta-y)^2]f_{132}}{[(s-1)^2 + (\Delta-y)^2]^2} ds - \\
& \left. - \int_\Delta^0 \frac{4(s-y)f_{141} - 2[(s-y)^2 - 1]f_{142}}{[(s-y)^2 + 1]^2} ds \right\}, \Delta = h - h_2.
\end{aligned}$$

Здесь у функций первый индекс обозначает часть составной пластины, второй — отношение к части периметра, третий — действительную или мнимые части (2). Исключая μ_1 из (5), для определения коэффициента Пуассона получим выражение

$$v_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_5 - \alpha_3 \alpha_4}{\alpha_2 \alpha_4 - \alpha_1 \alpha_5}. \quad (6)$$

Модуль Юнга определяется соотношением

$$E_1 = \frac{1+v_1}{2\alpha_1} (\nu_1 \alpha_2 + \alpha_3). \quad (7)$$

Аналогично выражения можно выписать и для остальных двух частей, составляющих кусочно-однородную пластину.

Классическая обратная задача по определению упругих характеристик пород предполагает известными нормальные и касательные компоненты напряжений и смещений на всем периметре исследуемой области. Две компоненты формулируются при постановке задачи, а две получаются натурными замерами. В этих условиях соотношения, аналогичные (6), (7), с учетом (5) позволяют определить упругие характеристики слоев. При этом значения y , подставляемые в (6), (7), необходимо выбирать в середине боковой грани рассматриваемой части пластины, где влияние контактных условий на деформирование наименьшее. Если же, как и в работе [4], предположить, что граничные условия переопределены только на частях границы $\Gamma_{12} + \Gamma_{22} + \Gamma_{32}$ и $\Gamma_{14} + \Gamma_{24} + \Gamma_{34}$ (рис. 1) и полностью неизвестны на Γ_{13} и Γ_{31} , то необходимо вводить в рассмотрение первое приближение

$$\begin{aligned}
u(x) &= u_{01}^1(x), \quad v(x) = v_{01}^1(x) \text{ на } \Gamma_{13}, \\
u(x) &= u_{03}^1(x), \quad v(x) = v_{03}^1(x) \text{ на } \Gamma_{31}.
\end{aligned} \quad (8)$$

В качестве примера решения прямой задачи рассмотрим пластину (рис. 1), для которой $h_1 = 2$, $h_2 = 4$ и $h = 6$, коэффициенты Пуассона $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 0,2$. На рис. 2 представлены три варианта деформирования контуров пластин (для $E = 10^4$) с граничными условиями на Γ_{13} и Γ_{31}

$$v_{13} = -1, \quad u_{13} = 0, \quad v_{31} = 1, \quad u_{31} = 0 \quad (9)$$

и (3) на боковых гранях и отличающихся, соответственно, значениями модулей Юнга.

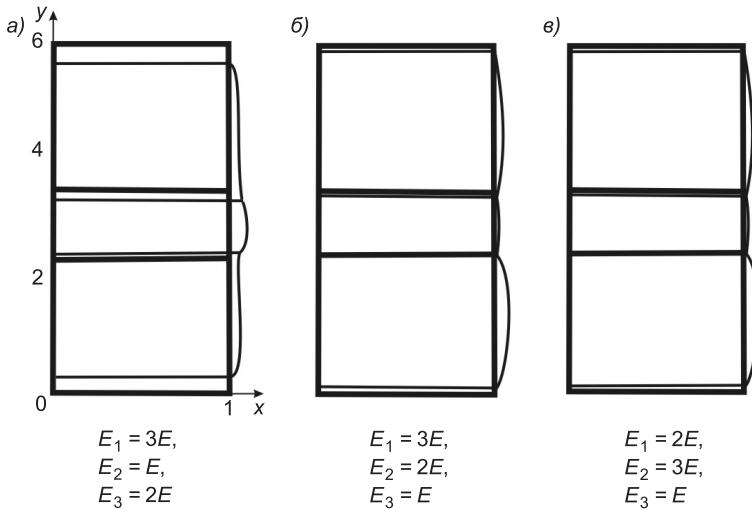


Рис. 2. Деформирование периметров пластин

Для получения дополнительной информации на рис. 2 в действительности рассматриваются половины пластин ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq h$) с характерными граничными условиями $u(y) = 0, \tau(y) = 0$ на $x = 0, 0 \leq y \leq h$. На рис. 3, а представлены компоненты смещений грани $x = 1, 0 \leq y \leq h$. Значения компоненты нормальных смещений и мнимая часть $f(y)$ для $x = 0, 0 \leq y \leq 6$ приведены на рис. 3, б. Здесь дополнительной информацией является $\text{Im}(f)$, характеризующая нормальные напряжения $\sigma_x(y)$ на оси симметрии пластины $x = 0$. В зависимости от отношений модулей Юнга соответствующие кривые приведены на рис. 3, а. В окрестности $y = 0$ и $y = 6$ во всех трех случаях (рис. 3, а) при переходе через границу раздела свойств материалов частей пластины скачки напряжений $\sigma_x(y)$ зависят от соотношения модулей Юнга. Если уменьшать высоту части 2 (см. рис. 1), т.е. $h_2 - h_1 \rightarrow 0,1$, то компоненты $\sigma_x(y)$ стремятся к постоянному значению в пределах этой части.

Анализ смещений боковых граней (рис. 2, 3) показывает, что достаточно точно определяются границы раздела свойств частей пластины и значения модулей Юнга (на уровне больше — меньше) для них. Принимая за тестовый пример третий вариант (кривая 3 на рис. 3, а), полученные смещения боковых граней ставим в соответствие (8), которые в первом приближении аппроксимируем в виде (9).

Из решения прямых задач (3), (9) подбираем первое приближение для модулей Юнга. Не уменьшая общности, первое приближение для коэффициентов Пуассона примем, например, в виде

$$\nu_1^1 = \nu_2^1 = \nu_3^1 = 0,25, \quad (10)$$

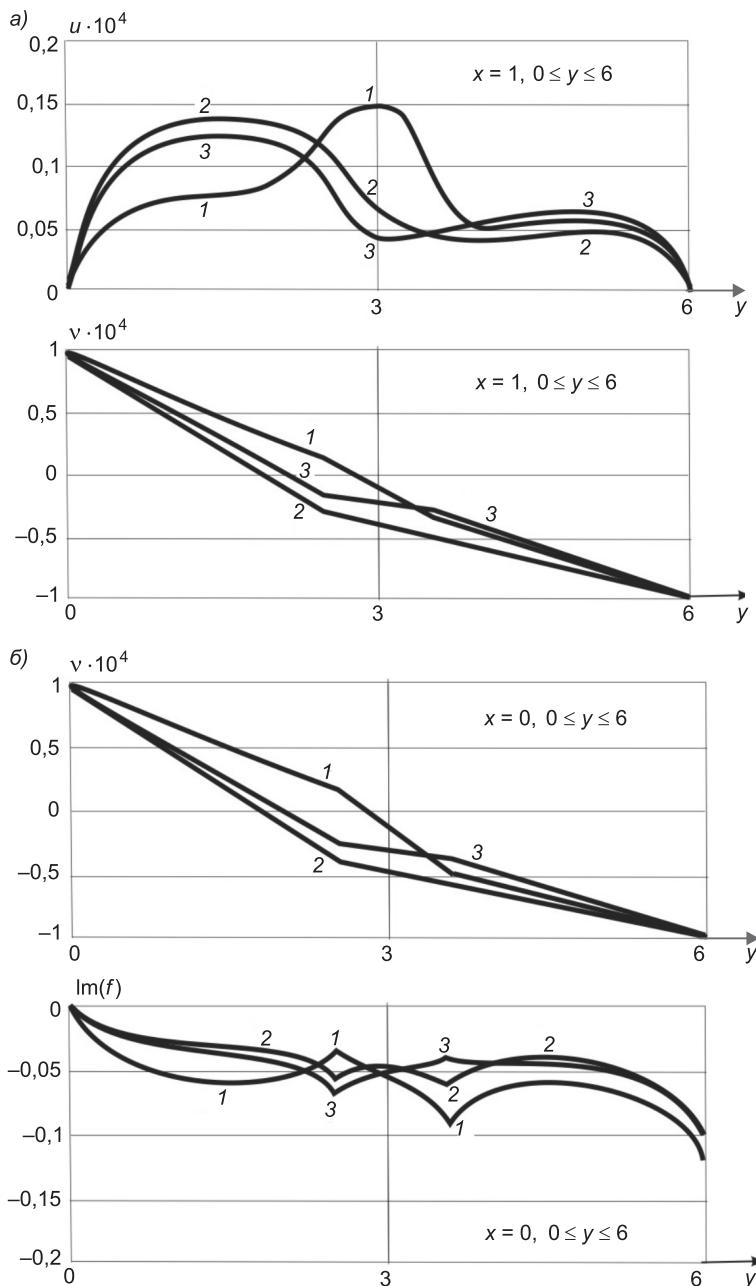


Рис. 3. Компоненты смещений и напряжений

обеспечивающее (4). После этого из решения прямой задачи (3), (9) вычисляем в первом приближении значения компонент смещений и напряжений всюду на границах и контактах, в том числе и значения

$$f_{131}^1, f_{132}^1, f_{311}^1, f_{312}^1 \quad (11)$$

соответственно на Γ_{13} и Γ_{31} . Имея все эти приближения, вычисляем второе для модулей Юнга и коэффициентов Пуассона по формулам, аналогичным (6), (7), для всех частей пластиинки. Первый цикл приближений заканчивается использованием полученных значений физических характеристик пластины для решения прямой задачи с граничными условиями (3), (11), т.е. вычисления на Γ_{13} , Γ_{31} компонент смещений

$$u_{01}^2(x), \quad v_{01}^2(x), \quad u_{03}^2(x), \quad v_{03}^2(x). \quad (12)$$

Последующие циклы сводятся к решению прямой задачи типа (3), (12) для получения значений, аналогичных (11), что позволяет по формулам (6), (7) вычислить следующие приближения для модулей Юнга и коэффициентов Пуассона. Это открывает возможность к вычислению очередного приближения для компонент смещений на Γ_{13} и Γ_{31} .

Таким образом, предложен метод восстановления упругих характеристик составных пластин, рассматриваемых как конструкция, которые зависят от граничных условий нагружения и условий на контактах и которые тоже идентифицируются в процессе получения приближенного решения для всех этих обратных задач. Наличие уравнений, связывающих граничные значения компонент напряжений и смещений, позволило свести проблему обратных задач к итерационной процедуре получения приближенного решения, колеблющегося около точного, т.е. исключить процесс регуляризации. Полученные формулы для определения модулей Юнга и коэффициентов Пуассона частей, составляющих пластину, существенно упрощают и ускоряют процесс сходимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миренков, В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов. — Новосибирск: Наука, 2009. — 176 с.
2. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. — М. : Наука, 1979. — 386 с.
3. Капцов, А.В. Идентификация плоской трещины в упругом теле с помощью инвариантных интегралов [Текст] / А.В. Капцов, Е.И. Шифрин // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2008. — № 3. — С. 215–227.
4. 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., д-р техн. наук, проф.

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
ШУТОВ В.А., д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
ПОЛУЭКТОВ В.А., канд. техн. наук, доц.*

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Получено 20.12.11

Mirenkov V.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Shutov V.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Poluektov V.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

DETERMINATION OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF PIECEWISE-HOMOGENEOUS PLATES

A system of singular integral equations is obtained, which expresses a relationship between the boundary values of the normal and tangential stresses as well as the displacements. This enables the solution of inverse problems without the regularization. An

approximate solution can be obtained, which is accurate up to predetermined precision. Mathematical expressions for the determination of the Young's modulus and Poisson's ratio in joined plates are obtained. The solution of the problem is reduced to an iterative procedure.

Key words: plate, inverse problem, integral equations, regularization, boundary conditions, solution, convergence, accuracy, ill-posedness.

REFERENCES

1. Mirenkov, V.E. Matematicheskoe Modelirovanie Deformirovaniya Gornykh Porod Okolo Oslablenij [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov. — Novosibirsk : Nauka, 2009. — 176 p.
 2. Tikhonov, A.N. Solutions of Ill-Posed Problems [Text] / A.N. Tikhonov, V.Ya. Arsenin. — Winston ; N.Y., 1977.
 3. Kapcov, A.V. Identifikacija ploskoy treshhiny v uprugom tele s pomoshch'yu invariantnykh integralov [Text] / A.V. Kapcov, E.I. Shifrin // Izv. RAN MTT. — 2008. — N 3. — P. 215–227.
 4. Mirenkov, V.E. Identification of properties, geometry and boundary conditions for piecewise-homogeneous plates [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 1.— P. 22–30.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:666.972.7

Г.И. БЕРДОВ, Н.И. НИКОНЕНКО, Л.В. ИЛЬИНА

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Введение оптимального количества тонкодисперсных минеральных добавок (золы-уноса, известняковой муки) позволяет повысить прочность при сжатии образцов, полученных из цемента марки 500, на 10–15 %. Меньшее влияние оказывает добавка микрокремнезема.

Ключевые слова: цемент, дисперсные минеральные добавки, зола-унос, известняковая мука, микрокремнезем, механическая прочность, цементный камень.

Для повышения прочности цементного камня и бетона широко используется введение минеральных добавок, например микрокремнезема, золы-уноса, известняковой муки [1]. Эти добавки имеют различную дисперсность, от которой зависит их оптимальное содержание.

В работе [2] исследовано влияние золы-уноса и известняковой муки на свойства тяжелого бетона. Удельная поверхность материалов по Блейну составляла, $\text{см}^2/\text{г}$: цемент — 3980, зола-унос — 2850, известняковая мука — 10 000. Зола-унос вводилась в состав бетона взамен 30, 40, 50 и 60 % цемента. Известняковая мука вводилась дополнительно к золе-унос в количестве 20 % от массы вяжущего. При всех дозировках золы-уноса отмечено снижение прочности бетона во все сроки твердения (1, 7 и 28 сут). Замена части золы-уноса известняковой мукой приводила к дополнительному снижению прочности бетона. При замене 60 % цемента золой прочность бетона при сжатии после 28 сут твердения в нормальных условиях снижалась с 51,7 до 32,7 МПа (на 37 %). Преимуществами, достигаемыми при введении золы-уноса, автор работы [2] считает самоуплотнение бетона, т.е. отсутствие необходимости уплотнения во время укладки, а также значительное уменьшение коэффициента миграции хлорид-ионов и понижение коэффициента газопроницаемости.

В данной работе исследовалось влияние дисперсных добавок на прочность цементного камня. Использован цемент и материалы добавок, выпускаемые в ФРГ. Изготовление и испытание образцов цементного камня произведено в Высшей технической школе г. Бохум, ФРГ. Исследование структуры и свойств использованных материалов выполнено в Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин).

В работе при этом использован цемент марки СЕМ I 52,5 R(ft). Он соответствует принятой в России марке 500. Цемент содержит, мас. %:

SiO_2 — 19,9; Al_2O_3 — 2,34; Fe_2O_3 — 1,31; CaO — 63,4; MgO — 0,73.

Удельная поверхность цемента, определенная по воздухопроницаемости порошка на приборе PCX-2, составляет $4890 \text{ см}^2/\text{г}$, т.е. этот цемент — тонкоизмельченный материал.

В качестве добавок использованы микрокремнезем, зола-унос и известняковая мука. Микрокремнезем Elkem Microsilika Grade 971-U, производства BASF Constructions Polymers GmbH, ФРГ, имел содержание SiO_2 не менее 97,5 %. Наличие гало на дифрактограмме образца свидетельствует о присутствии аморфной фазы, на ее фоне отмечены малоинтенсивные пики кристаллической фазы, не поддающиеся идентификации. Зола-унос EFA-Fuller KM/C, поставляемая предприятием BauMineral, ФРГ, в качестве добавки в цемент, в составе кристаллических фаз имела 82 мас. % муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и 18 мас. % кварца (SiO_2). Наличие на дифрактограмме характерного гало свидетельствует о присутствии аморфной фазы.

У известняковой муки KS-Mehl, производимой дочерним предприятием Heidelberg Zement, Baustoffe fur Geotechnik, ФРГ, единственной кристаллической фазой является кальцит (CaCO_3), содержание которого составляет 97 мас. %.

Исследованные добавки представляют собой тонкоизмельченные порошки. При этом большое значение имеет не только удельная поверхность (или средний размер зерен) порошка, но и распределение частиц по фракциям, гранулометрический состав материала. Для контроля дисперсности порошков в данной работе использован лазерный анализатор типа PRO-7000 Seishin Entergrice Co, LTD, Tokyo, обеспечивающий определение размеров частиц в пределах от 1 до 192 мкм по 16 интервалам значений.

Результаты гранулометрического анализа микрокремнезема, золы-унос и известняковой муки представлены в табл. 1. Полученные результаты показывают, что дисперсность микрокремнезема ближе к дисперсности цемента, оцениваемой по величине удельной поверхности, но превышает ее.

Зола-унос и известняковая мука имеют более высокую удельную поверхность, чем микрокремнезем. Вместе с тем характерно следующее. Среднеобъемный размер зерен микрокремнезема и известняковой муки одинаков — 7,5 мкм, а золы-уноса больше — 9,7 мкм. При этом микрокремнезем имеет значительно меньшую объемную долю частиц малых

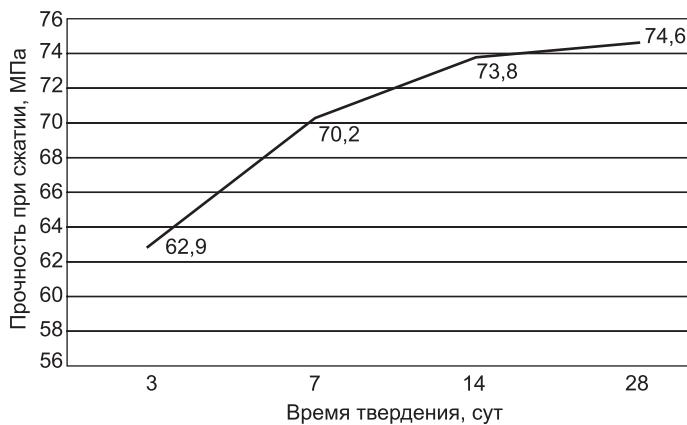
Таблица 1
Результаты лазерного гранулометрического анализа дисперсности добавок

Характеристики дисперсности	Микрокремнезем Elkem Microsilika Grade 971-U	Зола-унос EFA-Fuller	Известняковая мука KS-Mehl
Удельная поверхность, $\text{cm}^2/\text{см}^3$	13 590	19 260	23 110
Удельная поверхность, $\text{cm}^2/\text{г}$	5230	7420	8560
Среднеобъемный размер зерен, мкм	7,5	9,7	7,5
Среднеповерхностный размер зерен, мкм	2,9	1,1	0,9
Объемная доля частиц (%) с размерами, мкм	менее 4	24,3	37,0
	4–12	48,0	23,4
	свыше 12	27,7	37,7
Доля поверхности, занимаемой частицами (%) с размерами, мкм	менее 4	62,9	86,1
	4–12	30,5	9,4
	свыше 12	6,6	4,5

фракций — 24,3 % по сравнению с 32,2 % у золы-уноса. В то же время у микрокремнезема преобладают зерна с размерами 4...12 мкм — 48,0 %. У золы-уноса (32,2 %) и известняковой муки (25,3 %) их доля меньше. Крупные фракции с размером зерен более 12 мкм в наибольшем количестве содержит зола-унос (44,4 %), меньше — известняковая мука (37,7 %) и микрокремнезем (27,7 %). Взаимодействие между частицами добавки и формирующими частицами цементного камня осуществляется на поверхности этих частиц. В табл. 1 приведены значения среднеповерхностных размеров частиц добавок и доли поверхности, занимаемой фракциями различного размера.

Известняковая мука и зола-унос имеют значительно меньший среднеповерхностный размер частиц (соответственно 0,9 и 1,1 мкм), чем микрокремнезем (2,9 мкм). При этом, соответственно, у них значительно большую поверхность занимают частицы с размерами менее 4 мкм (86,1 и 83,8 % соответственно), чем у микрокремнезема (62,9 %). Это предопределяет более интенсивное взаимодействие с цементом этих добавок по сравнению с микрокремнеземом.

Прочность при сжатии определена на образцах цементного камня с размерами 40×40×40 мм. Твердение образцов происходило при нормальных условиях в течение 3, 7, 14 и 28 сут. Зависимость прочности при сжатии образцов цементного камня без добавок представлена на рисунке.



Зависимость прочности цементного камня от продолжительности твердения в нормальных условиях

Микрокремнезем и золу-унос вводили в состав цемента в количестве 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 %. Известняковую муку вводили в количестве 2; 5; 7; 9 и 11 %. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Во всех случаях четко проявляется оптимальное содержание добавок, обеспечивающее максимальное значение прочности образцов цементного камня. В исследованных интервалах содержания добавок оно соответствовало для микрокремнезема и золы-уноса 1,5 %, для известняковой муки — 7 %. Увеличение прочности при сжатии составляет: при введении 7 % известняковой муки — 15 %; 1,5 % золы-уноса — 11,5 %; 1,5 % микрокремнезема — 3 %.

Зависимость прочности при сжатии от содержания минеральных добавок может быть обусловлена следующим. Взаимодействие добавок с клинкерными минералами осуществляется в зоне контакта частиц этих компонентов. Очевидно, оптимальная концентрация добавок соответствует случаю, когда ее частицы со всех сторон плотно окружены частицами це-

Таблица 2

Зависимость прочности при сжатии (МПа) образцов цементного камня от содержания минеральных добавок

Продолжительность твердения, сут	Microsilica Grade 971-U				
	Содержание добавки, мас. %				
	1	1,5	2	2,5	3
3	63,2	63,4	60,9	66,8	65,7
7	65,2	69,3	68,5	72,8	72,2
14	71,3	74,1	71,0	74,3	71,8
28	75,6	76,9	71,3	75,2	72,6

Продолжительность твердения, сут	Зола-унос EFA-Füller KM/C				
	Содержание добавки, мас. %				
	1	1,5	2	2,5	3
3	69,0	69,2	68,3	67,3	67,2
7	77,6	77,8	72,1	78,7	82,2
14	81,2	79,0	82,8	81,1	67,4
28	84,7	84,9	83,2	81,6	77,3

Продолжительность твердения, сут	Известняковая мука KS-Mehl				
	Содержание добавки, мас. %				
	2	5	7	9	11
3	62,9	78,0	66,8	63,5	68,1
7	68,5	78,8	72,0	73,2	69,3
14	79,8	84,1	75,6	73,4	74,4
28	81,3	84,4	86,3	74,7	74,6

мента. Меньшее количество добавок приводит к снижению эффективности их действия. При большем их содержании возможны прямые контакты между частицами добавок, что также снизит эффективность их влияния.

Воздействие добавок на механическую прочность цементного камня обусловлено рядом причин:

- 1) они обеспечивают микроармирование цементного камня;
- 2) тормозят развитие микротрещин;
- 3) оказывают влияние на процесс гидратации цемента.

В случае приложения внешней нагрузки происходит распределение напряжений между компонентами рассматриваемой системы, т.е. цементного камня и материала добавок.

Если на границе раздела компонентов разрывы отсутствуют, то деформация каждого из них является примерно одинаковой. Вследствие этого основная часть приложенной нагрузки будет приходиться на компонент, имеющий большее значение модуля упругости [3]. Таким образом, с точки зрения перераспределения напряжений между компонентами композиционных материалов предпочтительнее использовать наполнители, обладающие более высоким значением модуля упругости. Этому соответствует более высокое значение твердости вещества (табл. 3). К числу таких добавок можно отнести золу-унос, основными структурными компонентами которой являются кварц, муллит, стекло, а также микрокремнезем.

Таблица 3

Плотность и твердость веществ, входящих в состав добавок [4]

Наименование	Химическая формула основного соединения	Кристаллическая система	Плотность, г/см ³	Твердость по шкале Мооса
Кварц	SiO ₂	Тригональная	2,5...2,8	7
Кальцит	CaCO ₃	Гексагональная	2,6...2,8	3
Муллит	3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	Ромбическая	3,2	7
Стекло	—	—	2,5...2,6	4,5...6,5

Кальцит, составляющий основу известняковой муки, имеет достаточно малую твердость — 3 по шкале Мооса. Она меньше, чем у цементного камня. То есть в данном случае трудно ожидать эффективного микроармирования цементного камня, и действие добавки обусловлено другими причинами.

В рассматриваемом материале можно выделить три основных элемента структуры, определяющих механическую прочность: частицы твердого наполнителя, цементное связующее и контактную зону между ними. Разрушение будет происходить по наиболее слабым элементам структуры. Рассматриваемые наполнители отличаются высокой прочностью. Наиболее вероятно, что слабым местом структуры материала будет контактная зона или цементное связующее. По-видимому, влияние CaCO₃ будет проявляться в наибольшей мере на контактной зоне системы. Оптимальное содержание добавки будет определяться ее воздействием на процесс гидратации цемента, формирование контактной зоны между частицами добавки и цементным камнем, а не микроармированием цементного камня. В рассматриваемом случае оптимальное содержание известняковой муки, обладающей высокой дисперсностью, составляет 7 мас. %. Можно отметить также неоднократно указанное в литературе более высокое значение прочности бетона при использовании известнякового крупного заполнителя.

Таким образом, введение оптимального количества высокодисперсных минеральных добавок (золы-уноса, известняковой муки) позволяет повысить прочность цементного камня, полученного из цемента марки 500, на 10–15 %. Оптимальное количество добавки зависит от ее дисперсности и от таких свойств, как твердость, плотность, модуль упругости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Добавки в бетон: Справ. пособие : Пер. с англ. / Под ред. В.С. Рамачандрана [Текст]. — М. : Стройиздат, 1988. — 575 с.
- Сказлич, М. Самоуплотняющийся бетон с различным содержанием золы-уноса и известняковой муки [Текст] / М. Сказлич // Concrete Plant Intern., Междунар. бетонное производство. — 2011. — № 6. — С. 42–45.
- Кингери, У.Д. Введение в керамику [Текст] / У.Д. Кингери. — М. : Стройиздат, 1967. — 499 с.
- Перельман, В.И. Краткий справочник химика / Под ред. Б.В. Некрасова [Текст]. — М. : Госхимиздат, 1955. — 559 с.

**БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)**

**НИКОНЕНКО Нина Игоревна, асп.; E-mail: nikoshk@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)**

Получено 23.10.11

Berdov Gennadiy Illich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Niconenco Nina Igorevna, post-graduate student; E-mail: nikoshk@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Ilyina Lilia Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: nsklika@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

EFFECT OF FINE MINERAL SUPPLEMENTS MECHANICAL STRENGTH CEMENT STONE

The introduction of the optimal number of fine mineral admixtures (fly ash, limestoneflour) can increase compressive strength of samples, the obtained cement grade 500, 10–15 %. Less affected by the addition of micro-silica.

Key words: cement, dispersed mineral supplements, fly ash, limestone powder, microsilica, mechanical strength of the cement stone.

REFERENCES

1. Additives in Concrete: A Reference Guide : Trans, from English / Ed. by V.S. Ramachandran [Text]. — M. : Stroyizdat, 1988. — 575 p.
 2. Skazlich, M. Self-compacting concrete with different content of fly ash and limestoneflour [Text] / M. Skazlich // Concrete Plant Intern. — 2011. — N 6. — P. 42–45.
 3. Kingeri, U.D. Introduction to Ceramics [Text] / U.D. Kingeri. — M. : Stroyizdat, 1967. — 499 p.
 4. Perelman, V.I. Quick Reference Chemist / Ed. by B.V. Necrasow [Text]. — M. : Goskhimizdat, 1955. — 559 p.
-

УДК 691.327:666.973.6.001

А.Н. ХАРХАРДИН

РАСЧЕТ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СОСТАВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО ПЕНОБЕТОНА

Часть 1

Приводится расширенный анализ и метод расчета структурообразующих элементов в составе цементного геля (пасты) и пенобетона на базовой основе $B/C \geq 0,38$ и параметра кратности пеноцементной суспензии.

Ключевые слова: цементный пенобетон, структура, состав.

Существующие представления о структуре пенобетона основаны на модели, предложенной Т.К. Пауэрсом [1]. Согласно современным данным, при полной гидратации цемента в химическую связь с его минералами вступает 20–25% воды от массы цемента. Объем гидратированного цемента в 2,1–2,2 раза больше, чем объем цемента до гидратации, но меньше, чем суммарный объем цемента и химически связанный воды на 0,254 от ее объема. В геле полностью гидратированного цемента остаются внутренние микропоры с размером меньше, чем возможный наименьший размер зародыша кристаллических новообразований. Поэтому они не зарастают новообразованиями и остаются свободными в виде остаточной гелевой пористости. При полной гидратации цемента и $B/C = 0,38$ относительная пористость цементного камня приблизительно равна пористости цементного геля и достигает величины 0,28. При $B/C > 0,38$ к гелевой пористости добавляется контракционная пористость, образовавшаяся в результате уменьшения объема воды и цемента при его гидратации. При $B/C \geq 0,5$ в систему добавляются капиллярные и воздушные поры, образуемые при испарении избытка воды и в процессе приготовления пеноцементной суспензии.

Для описания возможных превращений в двухфазной водоцементной смеси при гидратации цемента и двухфазной системы образуемого пенобетона, состоящего из твердой и дискретно распределенной в ней газовой фазы в виде воздушных пор различного размера и объема, воспользуемся уравнением для фазотопологических переходов дискретных систем [2]:

$$\eta = \eta_1 \left[1 - \frac{1}{3k \ln(120,754 \eta_1^5)} \right], \quad (1)$$

где η_1 , η — плотность упаковки (объемная доля) элементов в исходной и в смежной структурах системы;

k — коэффициент взаимодействия элементов системы (структуры): для взаимодействующих элементов $k \neq 1$, для невзаимодействующих $k = 1$.

Рекуррентное вычисление по уравнению (1) при $k = 1$, начиная от предельной пористости системы, т.е. от $\epsilon \leq 1$ (либо $\eta_1 \leq 1$), дает следующий ряд пористости при изменении ее структуры:

$$1 \rightarrow 0,930465 \rightarrow 0,8605 \rightarrow 0,7896 \rightarrow 0,7167 \rightarrow 0,6403 \rightarrow 0,5571 \rightarrow 0,4577 \rightarrow 0,2855$$

(0→0,0695→0,1395→0,2105→0,2833→0,3597→0,4429→0,5423→0,7145).

В скобках приведены величины объемной доли твердой фазы в системе. Допускается и замена фаз: газовой (жидкой) фазы на твердую и наоборот. Если рассматривать двухфазную систему, состоящую из геля и его пор, то из этих рядов следует, что наименьшая пористость твердой фазы $\varepsilon \leq 0,0695$, а критическая (гелевая) пористость $\varepsilon_r \leq 0,2833$. В верхнем ряду она повышается до $\varepsilon_r \leq 0,2855$.

Полученные ряды значений пористости содержат наибольшую $\varepsilon \leq 0,93$ и величины: топологическую плотность упаковки монодисперсных пор $\varepsilon \leq 0,6403$, псевдотвердого $\varepsilon \leq 0,5571$, псевдожидкого $\varepsilon \leq 0,4577$ и критического их состояния в системе $\varepsilon_c \leq 0,2855$. Поскольку в уравнении (1) плотность упаковки структурообразующих элементов системы стоит в пятой степени, то предельная пористость системы будет равна $\varepsilon = 0,930465^{1/5} = 0,9857$, в том числе для органических систем. Среднее геометрическое из величин $\varepsilon \leq 1$ и $\varepsilon \leq 0,930465$ дает пористость $\varepsilon = 0,930465^{1/2} = 0,9646$. Пористость систем остальных двух топологических уровней: $\varepsilon \leq 0,930465^{1/3} \leq 0,9763$ и $\varepsilon \leq 0,930465^{1/4} \leq 0,9821$. В таких пределах наибольшей пористости и плотности упаковки атомов твердой фазы $0,9305 \leq \varepsilon \leq 0,98$ природа создает свои структуры органического и минерального (неорганического) мира.

Принимая плотность цементного камня согласно Т.К. Пауэрсу $\gamma = 2100...2200$ кг/м³ и свободный объем в системе, равный топологической величине 0,9305, получим предсказываемую наименьшую среднюю плотность пенобетона:

$$\gamma = (1 - 0,9305)(2100...2200) \text{ кг/м}^3 = 146...153 \text{ кг/м}^3.$$

Для легкого пенобетона с малыми по объему межузловыми элементами

$$\gamma = (1 - 0,9646)(2000...2100) \text{ кг/м}^3 = 70...75 \text{ кг/м}^3.$$

Для технических облегченных пено- и поропластов

$$\gamma = (1 - 0,9763)(900...1200) \text{ кг/м}^3 = 20...28 \text{ кг/м}^3.$$

Для пенопластов и пористой сердцевины растительных стеблей, например подсолнечника, при максимальном значении $\eta = 0,9857$ получим реальное значение средней плотности легких поризованных органических тел:

$$\gamma = (1 - 0,9857) (800...1650) \text{ кг/м}^3 = 11...24 \text{ кг/м}^3.$$

Приведем примерную количественную оценку пористой структуры пенобетона при $B/C = 0,38$ водоцементной смеси с помощью уравнения (1). Для этого установим выражение для объемной доли (плотности упаковки частиц) твердой фазы в двухфазной системе, состоящей из объема воды V_B и объема цемента V_C :

$$\eta_C = V_C / (V_C + V_B) = 1 / \left(1 + \frac{V_B \rho_B \cdot \rho_C}{V_C \rho_C \cdot \rho_B} \right) = 1 / \left(1 + \frac{B \rho_C}{C \rho_B} \right), \quad (2)$$

где ρ_C , ρ_B — плотность цемента и воды соответственно; принимаем в дальнейших расчетах $\rho_C = 3150$ кг/м³, $\rho_B = 1000$ кг/м³, $\rho_C/\rho_B = 3,15$.

Из выражения (2) при $B/C = 0,38$ $\eta_C = 1 / (1 + 0,38 \cdot 3,15) = 0,455$. При этом объемная доля жидкой фазы η_J в водоцементной смеси равна $\eta_J = 1 - 0,455 = 0,545$. При гидратации цемента происходит топологический переход с изменением соотношения по объему фаз. Так, при

$\eta_1 = \eta_{\text{ц}} = 0,455$ и $\eta_1 = \eta_{\text{ж}} = 0,545$ из уравнения (1) при $k = 1\dots1,1$ получим $\eta_{\text{ж}} = 0,28\dots0,29$ и $\eta_{\text{ж}} = 0,44\dots0,45$. Объемная доля структурообразующих компонентов по отношению к первоначальному единичному объему цементной смеси составит: твердой фазы — 0,28, жидкой фазы — 0,44 и газовой фазы после испарения воды $\varepsilon_r = 1 - (0,44 + 0,28) = 0,28$. Дальнейшее рекуррентное вычисление по формуле (1) для жидкой фазы приводит к критической (гелевой) пористости цементного геля. Так, при $\eta_{\text{ж}} = 0,45$ и $k = 1,1$ получим $\eta_c = 0,28$. Водоцементное отношение в новой двухфазной системе, при котором в структуре пенобетона появляется капиллярная пористость, будет равно

$$B/\Gamma \geq 0,44 \rho_{\text{в}} / 0,28 \rho_{\text{ц}} \geq 0,44 / (0,28 \cdot 3,15) \geq 0,5.$$

Используя современные представления о структуре пенобетона, выражим аналитической зависимостью структурообразующие элементы пенобетона в топологических и удобных для расчета параметрах. Важным параметром устойчивой водоцементной вспененной суспензии является водоцементное отношение, которое легко получить из уравнения (2) в виде

$$B/\Gamma = (1/\eta_{\text{ц}} - 1) \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}} = 0,317(1/\eta_{\text{ц}} - 1), \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ц}}$ — плотность упаковки частиц цемента, форма которых выравнивается до сферической в начале гелеобразования.

Примечание. Для заданной марки (класса) тяжелого бетона, B/Γ и цемента, используя выражения (2), (3), можно вычислить расход (в объемных долях) цементного теста и цемента (Γ — по массе), где $\varphi_{\text{цт}} = (1 - \alpha^3 \varphi_3)$, α — линейный коэффициент разведения зерен цементным тестом:

$$\varphi_{\text{цт}} = \varphi_{\text{ц}} \left(1 + \frac{B}{\Gamma} \frac{\rho_{\text{ц}}}{\rho_{\text{в}}} \right) / \alpha^3, \quad \varphi_{\text{ц}} = \varphi_{\text{цт}} \left[1 / \left(1 + \frac{B}{\Gamma} \frac{\rho_{\text{ц}}}{\rho_{\text{в}}} \right) \right] \alpha^3, \quad \Gamma = \varphi_{\text{цт}} \left[\rho_{\text{ц}} / \left(1 + \frac{B}{\Gamma} \frac{\rho_{\text{ц}}}{\rho_{\text{в}}} \right) \right] \alpha^3.$$

1. Количество (долевой объем) воды, необходимой для гидратации цемента по отношению к суммарному объему воды и цемента в суспензии, выразим в виде следующей зависимости:

$$B_r = \frac{\alpha k_r \Gamma \cdot \rho_{\text{ц}}}{(V_{\text{ц}} + V_{\text{в}}) \rho_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{ц}}} = \alpha k_r \eta_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}} = \frac{0,25\alpha}{B/\Gamma + 0,317},$$

где $\alpha \leq 1$ — степень гидратации цемента, обычно находится в пределах $\alpha = 0,6\dots0,9$;

k_r, k'_r — количество воды от массы цемента, необходимой для его гидратации, $k_r = (0,2\dots0,25)$, $k'_r = (0,2\dots0,25)\Gamma$.

2. Объемная доля цементного геля без пор и контракции

$$\Gamma_{\phi} = \eta_{\text{ц}} + \alpha k_r \eta_{\text{ц}} (1 - 0,254) \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}} = \eta_{\text{ц}} (1 + 0,746 \alpha k_r \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}).$$

Подставляя в это выражение уравнение (2) для $\eta_{\text{ц}}$ и принятые величины свойств воды и цемента (при $\alpha = 1$), получим

$$\begin{aligned} \Gamma_{\phi} &= \frac{1 + 0,746 \alpha k_r \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}}{1 + B/\Gamma (\rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}})} = \frac{(\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}) + 0,746 \alpha k_r}{B/\Gamma + \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}} = \\ &= \frac{0,317 + 0,1865 \alpha}{B/\Gamma + 0,317} = \frac{0,504}{B/\Gamma + 0,317}. \end{aligned}$$

Из основного выражения п. 2 при полной гидратации цемента ($\alpha = 1$), $k_r = 0,25$ и $\rho_{ц}/\rho_в = 3,15$ получим $\Gamma_\phi = 1,5875\eta_ц$. Так как согласно Т. Пауэрсу объемная доля цементного геля без пор и контракции составляет 0,72 от всего его объема вместе с порами, то $1,5875\eta_ц = 0,72$. Отсюда объемная доля твердого геля в переводе на плотность упаковки частиц цемента в этой системе составит $\eta_ц = 0,45355$, при этом согласно уравнению (3) $B/\Gamma = 0,3825$, тогда как согласно уравнению (1) при $B/\Gamma = 0,38$ получим $\eta_ц = 0,455166$. При этом $\Gamma_\phi = 1,5875 \cdot 0,455166 = 0,722565$, а объемная доля в нем пор $\varepsilon_r = 1 - 0,722565 = 0,277435$. Поскольку B/Γ отношение при приготовлении цементной суспензии выполняется достаточно точно, то величина гелевой пористости ε_r в экспериментальных исследованиях устанавливается с определенной погрешностью и усредняется до 0,28. Для вычисления величины ε_r по уравнению (1) и сходимости получаемого результата с величиной 0,27744 при $\eta_ж = 1 - 0,455166 = 0,544834$ в этом уравнении определим коэффициент взаимодействия k воды с цементом при его гидратации.

Для невзаимодействующих элементов структуры в неупорядоченных системах ранее нами была получена средняя критическая величина плотности упаковки элементов структуры для различных неупорядоченных систем $\eta_c(\varepsilon_c) = 0,25490381$. Тогда из отношения $\varepsilon_r/\varepsilon_c$ получим $k = 0,27744/0,2549 = 1,0884$. Рекуррентное вычисление по уравнению (1) при $k = 1,088$ и $\eta_1 = \eta_ж = 0,544834$, $\eta_ц = 0,455166$ ($B/\Gamma = 0,38$) приводит к двойному топологическому переходу и $\eta_c(\varepsilon_r) = 0,27744$:

$$\text{при } \eta_ж = 0,544834 \rightarrow 0,44985 \rightarrow 0,27744;$$

$$\text{при } \eta_ц = 0,455166 \rightarrow 0,55015 \rightarrow 0,72256;$$

$$\text{при } B/\Gamma = 0,38 \rightarrow 0,2596 \rightarrow 0,12189.$$

Допуская возможность отсутствия пор в цементном геле, когда пустоты между частицами цемента в плотном слое при его гидратации полностью зарастают новообразованиями гидратной фазы, имеем равенство $1,5875\eta_ц \leq 1$, отсюда $\eta_ц \leq 0,630$. Ее топологическое значение $\eta_ц = 0,1$ получают из выражения $\eta_ц \leq (0,1/k_1^n)^{0,2}$ по минимальному индексу амплитуды или первой критической плотности упаковки слабо взаимодействующих твердых сфер, где $k_1 = 0,975827$. При $n = 0$ из этого выражения для взаимодействующих элементов $\eta_ц \leq 0,63096$. При всех других значениях $n = 1; 2; 3\dots 6$ получают стандартные топологические плотности случайной упаковки твердых сферических частиц. Из основного выражения п. 2 при $\Gamma_\phi = 1$ выполняется условие

$$1/\eta_ц - 1 = 0,746\alpha k_r \rho_ц / \rho_в,$$

это

$$\eta_ц - 1 = \varepsilon_{cb} = 0,746\alpha k_r \eta_ц \rho_ц / \rho_в = 0,1865/B/\Gamma + 0,31746.$$

Из первого выражения при $\alpha = 1$ по двум известным показателям свойств уточняют третий, где $\eta_ц = 1/(1 + 0,5875) = 0,62993$.

3. Объемная доля пор в цементном геле (гелевая пористость при $k_r = 0,25$ и $\rho_ц/\rho_в = 3,15$) будет равна:

при $B/\Gamma \leq 0,38$

$$\varepsilon_r = 1 - \eta_ц (1 + 0,746\alpha k_r \rho_ц / \rho_в) = 1 - 1,5875\alpha \eta_ц.$$

Подставляя в это выражение уравнение для $\eta_{\text{ц}}$, получим

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{0,317 + 0,1865\alpha}{B/C + 0,31746} = \frac{B/C - 0,1865\alpha}{B/C + 0,31746}.$$

Из этого выражения при $\alpha = 1$ и $B/C = 0,38$ $\varepsilon_r = 0,27744$.

При $B/C \geq 0,38$

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \eta_{\text{ц}} (1 + 0,746\alpha k_r \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}) \frac{\eta_c}{1 - \eta_c} = 0,5875\alpha \eta_{\text{ц}} \frac{\eta_c}{1 - \eta_c}, \\ \varepsilon_r &= \frac{0,317 + 0,1865\alpha}{B/C + 0,31746} \frac{\eta_c}{1 - \eta_c} = \frac{0,123457 + 0,072528\alpha}{B/C + 0,317} = \\ &= \frac{0,1959844}{B/C + 0,31746} = 0,281 \text{ при } \eta_c = 0,28, \\ \varepsilon_r &= \frac{0,1218915 + 0,0716083\alpha}{B/C + 0,31746} = \\ &= \frac{0,1935}{B/C + 0,31746} = 0,277435 \text{ при } \eta_c = 0,27744.\end{aligned}$$

Первый член в этих выражениях показывает потенциально возможную величину *объемной доли связанной остаточной влажности (числитель)* и *свободной (адсорбционной) воды* в цементном геле до его гидратации ($\alpha = 0$), где $\rho_{\text{отн}} = 1...1,12$ (1,11) (см. ниже п. 5, 6):

$$\varepsilon_{\text{св.г}} = \frac{0,12346(0,12189) / 1,12(1,11)}{B/C + 0,31746} = \frac{0,11023(0,10984)}{B/C + 0,31746}.$$

Отсюда при $B/C = 0,38...0,28$ $\varepsilon_{\text{св.г}} = 0,177(0,175)...0,158(0,157)...0,207(0,204)$.

Второй член в этих выражениях определяет потенциально *минимальную величину объемной доли связанной и трудно удаляемой остаточной влаги* при сушке полностью гидратированного ($\alpha = 1$) цементного геля:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{св}} &= \frac{0,071608(0,072528)\alpha}{B/C + 0,31746} = 0,1027(0,1040), \\ \varepsilon_{\text{ов}} &= \frac{0,071608(0,072528)\alpha / 1,0696}{B/C + 0,31746} = 0,096(0,097).\end{aligned}$$

Отсюда следует, что степень гидратации портландцемента в начальный период диффузии воды в клинкерные минералы изменяется в пределах: $0,0725 (0,0716) \cdot \alpha / 0,25\alpha \approx 0,29 - 0,0725(0,0716)\alpha / (0,69746 \cdot 0,25\alpha) \approx 0,41$.

Из выражений для ε_r при $B/C = 0,5$ $\varepsilon_r = 0,23975$ (0,2367). Результаты вычисления гелевой пористости для широкого интервала значений B/C отношения по этим формулам приведены в таблице при $\alpha = 1$.

Как видно из результатов расчета (см. таблицу), гелевая пористость возрастает до $B/C = 0,38$, а затем падает с увеличением водоцементного отношения. Наибольшую гелевую пористость имеют цементы с высоким показателем его теста нормальной густоты (НГЦТ), $\text{НГЦТ} \geq 0,26$. Гелевая пористость при этом совпадает с критической величиной жидкой фазы в системе. Так, например, при $\text{НГЦТ} = 0,2596...0,2605...0,265$ величина критической доли жидкой фазы, вычисленная по формулам (1), (2), (3) при $k = 1,0884$ и

**Изменение гелевой пористости и плотности упаковки частиц цемента
в зависимости от водоцементного отношения**

Показатель	Водоцементное отношение								
	0,22	0,25	0,26	0,30	0,38	0,5	0,6	0,7	0,8
η_c	0,5907	0,5594	0,5498	0,5141	0,4552	0,3884	0,3460	0,3120	0,2841
ε_r	0,0623	0,1120	0,1279	0,1838	0,2774	0,3855	0,4507	0,5047	0,5490
ε_r	0,3600	0,3410	0,3350	0,3134	0,2774	0,2367	0,2109	0,1902	0,1732
ε_r	0,3646	0,3453	0,3394	0,3174	0,2800	0,2398	0,2136	0,1926	0,1754

$\eta_1(\eta_{jk}) = 0,4498; 0,4507; 0,455$, составляет $\eta_c(\varepsilon_r) = 0,2774; 0,280; 0,291$, а при $k = 1$ этот диапазон сужается: 0,4490...0,4493...0,4507.

Плотность упаковки частиц цемента в подходящих жидкостях находится в пределах $0,63096 \leq \eta_1 \leq 0,633473$. Первое обычное вычисление по уравнению (1) при $k = 1$ приводит к псевдотвердому состоянию слоя этих частиц $0,5465 < \eta_c < 0,5494$. Второе рекуррентное вычисление по этому уравнению и жидкой фазе $0,4535 < \eta_{jk} < 0,4506$ для взаимодействующих фаз при $k = 1,088$ приводит к величине гелевой пористости в пределах $0,2880 > \varepsilon_r > 0,2798$. Следовательно, гелевая пористость не является столь постоянной величиной.

4. Объемная доля цементного геля с его порами

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{гф.п}} &= \eta_c(1 + 0,746\alpha k_r \rho_c / \rho_b) / (1 - \eta_c) = 1,5875\alpha \eta_c / (1 - \eta_c) = \\ &= \frac{(\rho_b / \rho_c) + 0,746\alpha k_r}{B/\Gamma + \rho_b / \rho_c} / (1 - \eta_c) = \frac{0,317 + 0,1865\alpha}{B/\Gamma + \rho_b / \rho_c} / (1 - \eta_c) = \\ &= \frac{0,441 + 0,259\alpha}{B/\Gamma + \rho_b / \rho_c}. \end{aligned}$$

При $\eta_c = \varepsilon_r = 0,2800(0,27744)$ и $\alpha = 1$

$$\varepsilon_{\text{гф.п}} = 0,7(0,69746) / (B/\Gamma + 0,31746).$$

Отсюда при $\varepsilon_{\text{гф.п}} = 1$ получим $B/\Gamma = 0,38$ — устойчивую цементную пасту.

5. Объемная доля и плотность связанной воды в цементном камне

$$\varepsilon_{\text{cb}} = 0,746\alpha k_r \eta_c (\rho_c / \rho_b) / k'_b = 0,1865\alpha / (B/\Gamma + \rho_b / \rho_c) k'_b.$$

При $B/\Gamma = 0,42854$, $k'_b = 1$ и $\alpha = 1$ из этого выражения получим $\varepsilon_{\text{cb}} = 0,25$, а при $B/\Gamma = 0,28...0,38$ $\varepsilon_{\text{cb}} = (0,31215...0,2674) / k'_b$, где k'_b — коэффициент взаимодействия фаз, $k'_b = (0,31215...0,2674) / 0,25 = 1,2486...1,0696$. Отсюда следует, что с увеличением поверхности гелевых пор и гелевой пористости коэффициент взаимодействия фаз и относительная плотность в ней воды повышаются. Следует предположить, что в пределах этих B/Γ $k'_b = \rho_{\text{отн}} = 1,2486...1,0696$.

6. Объемная доля воды в порах геля (гелевая пористость) и ее относительная плотность при $\eta_c = 0,28(0,27744)$.

Так как вода в порах геля и в полостях гидратированного цементного теста (пасты) находится на поверхности твердой фазы в адсорбционном состоянии и в межслоевой его части, то можно получить показатели взаимодействия фаз и относительной ее плотности из следующего выражения:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\text{в.г}} &= \eta_{\text{ц}} (1 + 0,746\alpha k_r \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}) \frac{\eta_c}{k_{\text{в}}(1 - \eta_c)} = \\
&= \frac{(\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}) + 0,746\alpha k_r}{B/\Gamma + \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}} \frac{\eta_c}{k_{\text{в}}(1 - \eta_c)} = \frac{0,1098379 + 0,0645271\alpha}{B/\Gamma + 0,31746} = \\
&= \frac{0,174365}{B/\Gamma + 0,31746}.
\end{aligned}$$

Из этого выражения при $B/\Gamma = 0,38$ и $\eta_c = 0,277435$ $k_{\text{в}} = 1,10974$, а при $\eta_c = 0,28$ $k_{\text{в}} = 1,12399$. При этом $\varepsilon_{\text{в.г}} = 0,2500$ — вода в порах геля переходит в плотное адсорбционное состояние с относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 1,10974$ и $\rho_{\text{отн}} = 1,12$. Объемная доля воды соответствует гелевой пористости и $\eta_c = 0,25 \cdot 1,0974 = 0,27744$, а при $\rho_{\text{отн}} = 1,12$ $\eta_c = 0,25 \cdot 1,12 = 0,28$ соответственно.

6а. Необходимая объемная доля воды для заполнения пор геля с относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 1,12 \dots 1,11$ (п. 6а) и $\eta_c = 0,28(0,27744)$:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\text{в.г}} &= \eta_{\text{ц}} (1 + 0,746\alpha k_r \rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}) \rho_{\text{отн}} \eta_c / (1 - \eta_c) = \\
&= \frac{(\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}) + 0,746\alpha k_r}{B/\Gamma + \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ц}}} 0,38889 \cdot 1,12 (0,38396 \cdot 1,10974) = \\
&= \frac{0,1382715(0,13526785) + 0,081231(0,079467)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{0,2195026(0,2147344)}{B/\Gamma + 0,31746}.
\end{aligned}$$

При $B/\Gamma = 0,38$ из этого выражения получим $\varepsilon_{\text{в.г}} = 0,314717$ ($0,3078806$) = $k_{\text{в}}\eta_c = (1,12399 \dots 1,10974)\eta_c$, а при $B/\Gamma = 0,5$ $\varepsilon_{\text{в.г}} = 0,268528$ ($0,262685$).

7. Объемная доля контракционной пористости, образуемой в результате уменьшения объема системы цемент–вода при гидратации цемента.

Так как при гидратации цемента протекает фазотопологическое превращение (переход) гелевой (твёрдой) фазы в новообразования, то уменьшение ее объема согласно уравнению (1) происходит на величину

$$\Delta\eta = \eta_1 / 3k \ln(120,754\eta_1^5) = 0,72 / 3k \ln(120,754 \cdot 0,72^5) = 0,07616 / k.$$

При $k = 1$ и $k = 0,28 / 0,2549038 = 1,09845$ из этого выражения получим $\Delta\eta = 0,07616 \dots 0,06933$. Так как $\eta_1 = 1 \dots 0,27744 = 0,72256$, то из этого выражения при $k = 1$ и $k = 0,27744 / 0,2549038 = 1,08839$ получим $\Delta\eta = 0,0760 / k = 0,0760 \dots 0,0698$. Объемная доля контракционной пористости на единичный объем новой фазы при $\eta_c = 0,28 \dots 0,27744$ и связанной воды $\varepsilon_{\text{cb}} = 0,1865$ составит

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\text{кт}} &= \Delta\eta \alpha \varepsilon_{\text{cb}} \eta_{\text{ц}} (\rho_{\text{ц}} / \rho_{\text{в}}) \eta_c / (1 - \eta_c) = \\
&= \frac{(0,07616 \dots 0,069334)\alpha \cdot 0,1865 \cdot 0,28 / 0,72}{B/\Gamma + 0,31746} = \\
&= \frac{0,28(0,01973 \dots 0,01796)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,00552 \dots 0,00503)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{кт}} &= \frac{(0,0760...0,0698)\alpha \cdot 0,1865 \cdot 0,27744 / 0,722565}{B/\Gamma + 0,31746} = \\ &= \frac{0,27744(0,01962...0,01802)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,00544...0,00500)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746}.\end{aligned}$$

При $B/\Gamma = 0,38$ из этих выражений получим $\varepsilon_{\text{кт}} \approx (0,0078...0,0072)\alpha$.

С учетом взаимодействия фаз и плотности воды в адсорбционном слое ($\rho_{\text{отн}} = 1,12...1,11$, $k_b = 1,12399...1,11$) запишем

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{кт}} &= \Delta\eta\alpha\varepsilon_{\text{св}}\eta_{\text{ц}}(\rho_{\text{ц}}/\rho_{\text{в}})\eta_c/\rho_{\text{отн}}k_b(1-\eta_c) = \\ &= \frac{(0,00552...0,00503)\alpha / 1,25887}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,004385...0,003995)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746}.\end{aligned}$$

При $\eta_c = 0,27744$

$$\varepsilon_{\text{кт}} = \frac{(0,00544...0,00500)\alpha / 1,23152}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,004417...0,004056)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746}.$$

Отсюда при $B/\Gamma = 0,38...0,5$ $\varepsilon_{\text{кт}} \approx (0,0063...0,0058)\alpha$.

При наибольшем значении $k_b = 1,259361...1,2545566$ при $\eta_c = 0,28...0,27744$ и $\rho_{\text{отн}} = 1,12...1,11$ соответственно получим:
при $\eta_c = 0,28$

$$\varepsilon_{\text{кт}} = \frac{(0,00552...0,00503)\alpha / 1,4105}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,003915...0,003566)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746};$$

при $\eta_c = 0,27744$

$$\varepsilon_{\text{кт}} = \frac{(0,00544...0,00500)\alpha / 1,39223}{B/\Gamma + 0,31746} = \frac{(0,0039...0,0036)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746}.$$

При $B/\Gamma = 0,38$ из этих выражений имеем $\varepsilon_{\text{кт}} = (0,0056...0,0052)\alpha$. Если степень гидратации портландцемента $\alpha = 0,8$, то $\varepsilon_{\text{кт}} = 0,0045...0,0042$.

Принимая коэффициент взаимодействия фаз при топологическом переходе геля в цементный камень (при гидратации цемента) равным

$$k_b = \varepsilon_r(\eta_c)/\varepsilon_{\text{св}} = 0,27744(0,28)/0,1865 = 1,487587(1,50134),$$

получим

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{кт}} &= \Delta\eta\alpha\varepsilon_{\text{св}}\eta_{\text{ц}}(\rho_{\text{ц}}/\rho_{\text{в}})\eta_c/k_b\rho_{\text{отн}}(1-\eta_c) = \\ &= \frac{(0,07616...0,069334)\alpha \cdot 0,1865 \cdot 0,28 / (0,28 / 0,1865)1,12 \cdot 0,72}{B/\Gamma + 0,31746} = \\ &= \frac{(0,0033...0,0030)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{кт}} &= \frac{(0,0760...0,0698)\alpha \cdot 0,1865 \cdot 0,27744 / (0,27744 / 0,1865)1,11 \cdot 0,722565}{B/\Gamma + 0,31746} = \\ &= \frac{(0,0033...0,0030)\alpha}{B/\Gamma + 0,31746}.\end{aligned}$$

Из одинаково равных выражений при $B/\Gamma = 0,38$ $\varepsilon_{\text{кт}} = (0,0047...0,0043)\alpha$.

При $\alpha = 0,9$ получим близкий к предыдущему результат $\varepsilon_{\text{кт}} = 0,0042 \dots 0,0039$.

Следовательно, уменьшение объема системы цемент–вода при гидратации цемента пропорционально объемной доли цементного камня и квадрату объемной доли связанной в нем воды при топологическом превращении гелевой фазы в гидросиликаты и обратно пропорционально плотности воды в адсорбционных слоях и между тоберморитовыми слоями новообразований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пауэрс, Т.К. Физическая структура портландцементного теста [Текст] / Т.К. Пауэрс // Химия цементов. Под ред. Х.Ф. Тэйлора. — М. : Изд.-во лит. по строительству, 1969. — 247 с.
2. Хархардин, А.Н. Структурная топология пенобетона [Текст] / А.Н. Хархардин // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 2. — С. 18–26.

ХАРХАРДИН А.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: s – nsm@intbel.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено после доработки 12.10.11

Kharkhardin A.N., doctor of technical sciences, professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Russia

CALCULATION OF STRUCTURING ELEMENTS AND COMPOSITION OF CEMENT BASED FOAM CONCRETE. Part 1

The expanded analysis and calculation method of structuring elements consisting of cement gel (paste) and foam concrete with ratio W/C = 0,38 and expansion rate parameter of «foam-cement» suspension are introduced.

Key words: cement based foam concrete, structure, composition.

REFERENCES

1. Powers, T.K. Physical structure of portland cement paste [Text] / T.K. Powers // Chemistry of Cement. Ed. H.F. Naylor. — M., 1969. — 247 p.
 2. Kharkhardin, A.N. Structural topology of foam concrete [Text] / A.N. Kharkhardin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 2. — P. 18–26.
-

УДК 691.31:678.06

В.И. КАЛАШНИКОВ, Е.В. ГУЛЯЕВА, Д.М. ВАЛИЕВ

**ВЛИЯНИЕ ВИДА СУПЕР- И ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ
НА РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЦЕМЕНТНО-МИНЕРАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ,
ПОРОШКОВЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ***

Изучено влияние вида суперпластификатора на реотехнологические свойства цементно-минеральных супензий с различным соотношением цемент : микрокварц. Проведена оценка влияния ряда отечественных и зарубежных суперпластификаторов на свойства бетонных смесей. Установлено, что самоуплотняющиеся реакционно-порошковые бетоны можно получить, используя только самые эффективные гиперпластификаторы.

Ключевые слова: супер- и гиперпластификатор, водоредуцирующий эффект, реотехнологические свойства, самоуплотняющийся бетон.

Наиболее радикальным революционным этапом на долгом пути эволюционного развития бетона явилось использование эффективных суперпластификаторов (СП) и гиперпластификаторов (ГП) нового поколения, микрокремнеземов и каменной муки.

По основному эффекту действия СП и ГП подразделяются на две группы: с эффектом электростатического отталкивания частиц цемента и со стерическим эффектом. К первой группе относятся пластификаторы на основе сульфированных нафталин-формальдегидных поликонденсаторов (НФ), сульфированных меламин-формальдегидных поликонденсаторов (МФ) и очищенных от углеводородов лигносульфанатов (ЛСТ), ко второй — на основе поликарбоксилатов и полиакрилатов. По некоторым данным, силы взаимного отталкивания, вызываемые СП типа полиакрилатов, почти вдвое больше сил отталкивания, вызываемых МФ и НФ, и втрое больше сил, вызываемых ЛСТ. Именно благодаря таким особенностям суперпластификаторы типа полиакрилатов более эффективны [1].

В последние годы при производстве высококачественных бетонов реализуется концепция использования реакционно-активных нанометрических моно- и полиминеральных тонкодисперсных порошков на основе горных пород. Поэтому получение бетонов нового поколения основано на существенном изменении традиционного состава и рецептуры бетона. Новые составы с суперпластификаторами должны, во-первых, обеспечить полную реализацию реологического действия СП за счет адсорбции их полианионов на минеральных дисперсных частичках, изменения электрокинетического потенциала и возникновения одноименных поверхностных зарядов. Агрегативно-неустойчивая водно-дисперсная система превращается в агрегативно-устойчивую. Наибольшее реологическое действие ионно-электростатических диспергаторов проявляется в минеральных водно-дисперсных системах. Во-вто-

* Грант Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Госконтракт № 14.470.11.1254.

рых, в бетонной смеси необходимо иметь достаточное количество агрегативно-устойчивой высококонцентрированной водно-дисперсной смеси (матрицы). При этом необходимо руководствоваться основным правилом: увеличение объема дисперсной фазы обеспечивается не увеличением расхода цемента, а добавлением порошкового наполнителя к цементу в количестве 40–70 %, а в малоцементном бетоне — до 90–100 % [2].

Таким образом, основой получения бетонов нового поколения является высокая разжижающая способность СП и ГП водных дисперсно-тонкозернистых матриц. Исследования реотехнологических свойств таких матриц чрезвычайно актуальны.

При разработке оптимальной рецептуры самоуплотняющегося бетона большую роль играют реологические исследования. Методика исследований разработана по японскому образцу, включает лабораторные исследования исходных материалов и имеет следующие этапы:

- испытание цементного теста;
- испытание раствора;
- испытание бетона [3, 4].

Задача исследования состояла в определении текучести цементно-минеральных суспензий с СП и ГП. Для предварительной оценки водоредуцирующего эффекта в цементных суспензиях супер- и гиперпластификаторов использовали конус Хегерманна (конус для определения консистенции цементно-песчаного раствора при оценке марок цемента по ГОСТ 310.4–81). Нормированный самопроизвольный расплыв пластифицированных суспензий из него был принят в диапазоне 220...360 мм, что соответствовало относительной текучести Γ , равной 4...12. Относительная текучесть Γ по истечении из конуса Хегерманна (по методике германской фирмы TESTING) определялась по формуле

$$\Gamma = (\Delta_p / \Delta_k)^2 - 1,$$

где Δ_p и Δ_k — диаметр расплыва и диаметр нижнего основания конуса (100 мм) соответственно.

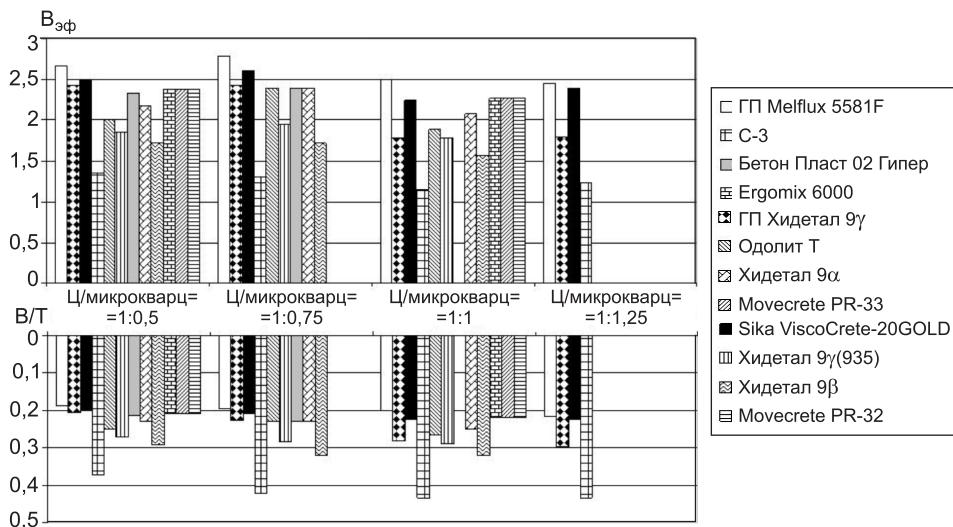
По равновеликим расплывам различных пластифицированных и непластифицированных суспензий рассчитаны водоредуцирующие эффекты по формуле

$$B_{\text{эф}} = (B/T)_n / (B/T)_p,$$

где $(B/T)_n$ и $(B/T)_p$ — водотвердое отношение непластифицированной и пластифицированной суспензий соответственно.

В работе применялись следующие материалы: цемент Красноярский М 500 Д0, микрокварц товарный $S_{\text{уд}} = 260 \text{ м}^2/\text{кг}$ со следующим соотношением Ц/микрокварц = 1:0,5; 1:0,75; 1:1; 1:1,25, а также ряд отечественных и зарубежных суперпластификаторов. Количество СП и ГП во всех составах принималось равным 0,9 % от массы цемента. Результаты исследований представлены на рисунке.

Как видно из представленных данных, действие всех суперпластификаторов в смеси цемент–микрокварц–вода различно. Немецкий гиперпластификатор Melflux, производимый компанией BASF, в суспензии обеспечил самый высокий водоредуцирующий эффект при самом низком водотвердом отношении. Следует отметить, что с увеличением содержания микрокварца в смеси от соотношения 1:0,5 до 1:1,25 водотвердое отношение увеличилось незначительно — с 0,187 до 0,216 соответственно. Гиперпластификаторы Sika ViscoCrete 20Gold, Ergomix 6000, Movecrete



PR-33, Movecrete PR-32 незначительно уступают немецкому гиперпластификатору. Для данных добавок также было установлено, что увеличение содержания наполнителя мало влияет на его пластифицирующую способность — водоредуцирующий эффект остается достаточно высоким. Отечественный гиперпластификатор Хидетал 9 γ ГП в смеси с соотношением компонентов Ц/микрокварц 1:0,5 при низком водотвердом отношении, равном 0,206, имел также высокий водоредуцирующий эффект, однако с увеличением содержания микрокварца до соотношений 1:0,75; 1:1; 1:1,25 наблюдается резкое снижение эффективности действия данного гиперпластификатора, повышение водотвердого отношения до 0,3. Гиперпластификатор Хидетал 9 α менее избирателен, с увеличением содержания тонкодисперсного порошка в два раза водотвердое отношение увеличилось всего на 4 %.

Суперпластификатор С-3 (г. Новомосковск) по всем показателям уступает отечественным и зарубежным гиперпластификаторам на поликарбоксилатной основе.

На следующем этапе было изучено влияние вида добавки на реотехнологические и физико-механические свойства реакционно-порошковых бетонов. Для изготовления бетонов использовался цемент Жигулевский М 500 Д0 с удельной поверхностью $S_{уд} = 360 \text{ м}^2/\text{кг}$, микрокварц Silverbond компании Sibelco (производитель Раменский ГОК) марки Silverbond 30 с дисперсностью менее 34 мкм с $S_{уд} = 313 \text{ м}^2/\text{кг}$, намывной песок Нижегородский фракции 0...1,25 мм, микрокремнезем Новокузнецкий высокодисперсный с $S_{уд} = 5500 \text{ м}^2/\text{кг}$ (по прибору ПСХ), суперпластификаторы: Sika ViscoCrete-20 GOLD, Хидетал 9 γ ГП, Melflux 2651F, FRAME GIPER S и С-3 0,9 % от массы портландцемента. Соотношение цемент : микрокварц было принято 1 : 0,47, т.е. оно соответствовало достаточно высокому водоредуцирующему действию СП в области изученных соотношений Ц : микрокварц. Водотвердое отношение во всех составах было 0,12, водоцементное 0,363. Перемешивание бетонной смеси осуществлялось миксером при скорости вращения 300...600 об / мин. Реологический критерий, равный отношению объема водно-цементно-минеральной дисперсии к объему немолотого песка, определяющий толщину пленки водной дисперсии на поверхности песка, был достаточно высок. Результаты испытаний реакционно-порошковых бетонов представлены в таблице.

Результаты испытаний реакционно-порошковых бетонов

Наименование	На 1 м ³ , кг	ρ , кг / м ³	$\frac{\Pi_m}{Ц}$	$\frac{\Pi_t}{Ц}$	$\frac{\Pi_m + \Pi_t}{Ц}$	Прочность $R_{из}/R_{сж}$ через, сут, МПа
			1	7	28	
Цемент Жигулевский ПЦ 500 ДО	681	2291	0,46	1,47	1,94	7 / 37,4 11,6 / 106 14 / 120
Микрокварц (П _m)	321	B / Ц = 0,363	B / T = 0,12			
Песок Нижегородский (П _t)	1001					
Микрокремнезем Новокузнецкий	75,3					
ГП Melflux 2651F	6,12					
Σ сух	2084,5					
Вода	250					
$M_{б.с.}$	2334,5					
Цемент Жигулевский ПЦ 500 ДО	665	2199	0,46	1,46	1,92	6,15 / 35 11,1 / 67,6 12,0 / 94,8
Микрокварц (П _m)	310,5	B / Ц = 0,363	B / T = 0,12			
Песок Нижегородский (П _t)	968					
Микрокремнезем Новокузнецкий	73					
СП С-3	6,0					
Σ сух	2022,5					
Вода	242					
$M_{б.с.}$	2264,5					
Цемент Жигулевский ПЦ 500 ДО	676	2269	0,46	1,46	1,92	1,65 / 6,16 9,76 / 84 11,9 / 118
Микрокварц (П _m)	316	B / Ц = 0,363	B / T = 0,12			
Песок Нижегородский (П _t)	984					
Микрокремнезем Новокузнецкий	74					
ГП FRAME GIPER S	6,06					
Σ сух	2056					
Вода	246					
$M_{б.с.}$	2302					
Цемент Жигулевский ПЦ 500 ДО	705	2353	0,46	1,46	1,92	6,4 / 40,4 11,6 / 101 14,3 / 122
Микрокварц (П _m)	329	B / Ц = 0,363	B / T = 0,12			
Песок Нижегородский (П _t)	1026					
Микрокремнезем Новокузнецкий	77,3					
СП Sika ViscoCrete-20 GOLD	6,3					
Σ сух	2143,6					
Вода	256					
$M_{б.с.}$	2400					
Цемент Жигулевский ПЦ 500 ДО	656	2223	0,46	1,46	1,92	7,9 / 30,6 10,2 / 80,0 11,4 / 104

PK Хегерманна 285 мм
 $I_{ЦД}^{П_t} = 1,66$

$Ц_R^{уд} = 5,67$ кг / МПа
 $R_{Ц}^{уд} = 0,18$ МПа / кг
 $Ц_{R_i}^{уд} = 48,6$ кг / МПа
 $R_i/R_c = 0,12$

PK Хегерманна 153 мм
(после 30 встряхиваний
на встряхивающем столи-
ке)
 $I_{ЦД}^{П_t} = 1,66$

$Ц_R^{уд} = 7$ кг / МПа
 $R_{Ц}^{уд} = 0,14$ МПа / кг
 $Ц_{R_i}^{уд} = 55,4$ кг / МПа
 $R_i/R_c = 0,13$

PK Хегерманна 320 мм
 $I_{ЦД}^{П_t} = 1,66$

$Ц_R^{уд} = 5,7$ кг / МПа
 $R_{Ц}^{уд} = 0,175$ МПа / кг
 $Ц_{R_i}^{уд} = 57$ кг / МПа
 $R_i/R_c = 0,1$

PK Хегерманна 327 мм
 $I_{ЦД}^{П_t} = 1,66$

$Ц_R^{уд} = 5,8$ кг / МПа
 $R_{Ц}^{уд} = 0,17$ МПа / кг
 $Ц_{R_i}^{уд} = 49,3$ кг / МПа
 $R_i/R_c = 0,12$

Окончание табл.

Наименование	На 1 м ³ , кг	ρ , кг/м ³	$\frac{\Pi_m}{Ц}$	$\frac{\Pi_t}{Ц}$	$\frac{\Pi_m + \Pi_t}{Ц}$	Прочность $R_{из}/R_{сж}$ через, сут, МПа
			1	7	28	
Микрокварц (Π_m)	306	$B/C = 0,363$	$B/T = 0,12$			
Песок Нижегородский (Π_t)	955					
Микрокремнезем Новокузнецкий	72					
ГП Хидетал 9γ	5,9					
Сух	1995					
Вода	239					
$M_{б.с.}$	2234					

Примечание. $I_{ЦД}^{\Pi_t} = V_{ЦД} / V_{\Pi_t}$.

Бетонная смесь с гиперпластификаторами Melflux 2651F, FRAME GIPER S, Sika ViscoCrete-20 GOLD на поликарбоксилатной основе имела самопроизвольный расплыв из конуса Хегерманна от 285 до 327 мм, т.е. она была самоуплотняющейся и саморастекающейся. Представляет интерес проследить кинетические значения прироста прочности порошкового бетона. Так, в составах на гиперпластификаторах Melflux и Sika ViscoCrete-20 GOLD одно- и семисуточная прочность составляет от 28-суточной соответственно 31–33 и 88–83 %.

Если обратиться к кинетическим показателям набора прочности состава с использованием гиперпластификатора FRAME GIPER S, то можно убедиться в том, что односуточная прочность составила 5 % от 28-суточной в то время как у всех других она не была менее 30 %. Это свидетельствует о том, что данный гиперпластификатор является добавкой, замедляющей процесс твердения бетона в начальные сроки. К 28 сут твердения бетона в нормальных условиях во всех трех составах с гиперпластификатором прочностные показатели практически сравнялись.

Составы с использованием отечественного гиперпластификатора Хидетал на поликарбоксилатной основе и суперпластификатора С-3 имели одинаковую консистенцию. Расплыв конуса определялся после 30 встряхиваний на встряхивающем столике, т.е., используя данные добавки, получить самоуплотняющийся бетон без значительного увеличения B/T невозможно. Но повышение содержания воды для достижения расплыва смеси из конуса Хегерманна до 250...300 мм превращает бетонную смесь в расслаивающуюся, т.е. не годную для производства.

Следует также отметить, что в бетоне на С-3 удельный расход цемента на единицу прочности повысился с 5,7 до 7 кг/МПа, а замена зарубежных гиперпластификаторов на отечественный Хидетал увеличила этот показатель на 10 %. Важно отметить то, что С-3, не позволяющий получить самоуплотняющийся бетон без увеличения воды затворения, а следовательно, понижения прочности может быть использован для заводской вибрационной технологии изготовления бетонов. Замена рецептуры бетонов старого поколения и превращение их в порошково-активированные оказывают позитивное влияние на реологическое действие недостаточно эффективных суперпластификаторов.

Таким образом, важным фактором получения самоуплотняющихся высокопрочных бетонов нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности бетона является выбор СП и ГП. Для

оценки действия последних необходимо проверять эффективность классифицирующей способности добавок на цементе, смеси цемента с каменной мукой и на последнем этапе в бетоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона [Текст] / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. — М. : Казан. гос. архитектурно-строит. ун-т, 2006. — 244 с.
2. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения [Текст] / В.И. Калашников // Строит. материалы. — 2011. — № 3. — С. 103–105.
3. Болотских, О.Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика [Текст] / О.Н. Болотских // Бетонный завод. — 2007. — № 1. — С. 28–35.
4. Rings, K. Selbstverdichtender Beton SVB ein neuer Hochleistungsbeton [Текст] / K. Rings, H. Kolczyk. — Информация нем. фирмы Heidelberger Addiment.

КАЛАШНИКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: techbeton@rguas.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ГУЛЯЕВА Екатерина Владимировна, асп.; E-mail: gulyaeva5@gmail.com

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВАЛИЕВ Дамир Маратович, асп.; E-mail: damir_vm@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 27.10.11

Kalashnikov Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Guljaeva Ekaterina Vladimirovna, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Valiev Damir Maratovich, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

INFLUENCE OF THE TYPE SUPER- AND ON GIPERPLASTICIZERS REOTEHNOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT-MINERAL SUSPENSIONS, POWDER CONCRETE MIXES AND STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE

The influence of type of superplasticizer on properties reotchnological cement-mineral suspensions with different ratios of cement : microquartz. An assessment of the effectiveness of a number of domestic and foreign superplasticizers on the properties of concrete mixes. It is established that the self-compacting of reactive powder concretes can be obtained using only the most efficient giperplasticizers.

Key words: super- and giperplasticizers, water-reducing effect reotchnological properties, self-compacting concrete.

REFERENCES

1. Izotov, V.S. Chemical additives for the modification of concrete: a monograph [Text] / V.S. Izotov, Yu.A. Sokolova. — M. : Kazan State Architecture and Construction University, 2006. — 244 p.
2. Kalashnikov, V.I. Terminology of concrete of new generation [Text] / V.I. Kalashnikov // Stroitel'nye Materialy. — 2011. — N 3. — P. 103–105.
3. Bolotskih, O.N. Self-compacting concrete and diagnostics [Text] / O.N. Bolotskih // Concrete Plant. — 2007. — N 1. — P. 28–35.
4. Rings, K. Selbstverdichtender Beton SVB ein neuer Hochleistungsbeton [Text] / K. Rings, H. Kolczyk. — Information German firm «Heidelberger Addiment».

УДК 691.32:620.191.33

В.А. ПЕРФИЛОВ, М.О. ЗУБОВА, Д.Л. НЕИЗВЕСТНЫЙ

**ПРИМЕНЕНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН
И МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ**

В процессе изучения физико-механических свойств фибробетонов разработаны новые составы тяжелых бетонов на основе базальтовых волокон-фибр. Результатом комплексного введения в сырьевую смесь базальтовых фибровых волокон диаметром 13...17 мкм и длиной 6...12 мм, а также модифицирующей добавки «Полипласт СП-4» является увеличение прочности на сжатие и морозостойкости бетонной смеси.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фибробетоны, базальтовое волокно, модифицирующие добавки, суперпластификаторы, прочность, морозостойкость.

В настоящее время возрастающими темпами осуществляется применение такого материала, как фибробетон. Это очевидно, ведь современное строительство предъявляет довольно высокие требования к качественным характеристикам бетонов, таким как прочность, трещиностойкость, долговечность. Этим требованиям в полной мере соответствуют бетоны, в которых армирующим бетон компонентом является базальтовое фибровое волокно.

Этот материал давно и хорошо известен на Западе. В основном он нашел свое применение в дорожном и аэродромном строительстве. В России бетон, армированный фибровыми волокнами, применяется в ничтожных количествах. Ярким примером служит крупнейшее строительство нового здания Национальной библиотеки на Московском проспекте в г. Санкт-Петербурге, где для изготовления буронабивных свай применялась базальтовая фибра [1]. В Волгограде, к сожалению, такие примеры отсутствуют. Хотя в перспективе этот материал может найти достойное применение. В настоящее время в регионе ведется активное строительство автосалонов с огромными по площади выставочными залами. При возведении полов этих зданий можно смело применять фибробетонную смесь на основе базальтовых волокон-фибр. Ведь применяя в качестве армирующих бетонную матрицу компонентов базальтовые волокна, обладающие малой плотностью, можно обеспечить трехмерное повышение прочности, препятствуя образованию трещин. Помимо прочностных характеристик к преимуществам полов, выполненных с применением базальтовых фибровых волокон, можно отнести высокую коррозионную стойкость, низкую трудоемкость работ и, что немаловажно, экономическую эффективность применения этого материала.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что бетоны, упрочненные базальтовыми волокнами, имеют высокие значения физико-механических характеристик. Применение высокодисперсных волокнистых наполнителей в цементных бетонах оказывает положительное влияние на процессы структурообразования, физико-ме-

нические и эксплуатационные свойства бетона. Это достигается за счет улучшенной адгезии волокон к цементной матрице, сравнительно высокой прочности и модуля упругости волокон, их стойкости по отношению к щелочной среде [2].

Известные фибробетонные смеси [3, 4], включающие портландцемент, базальтовое волокно или его отходы, песок, а также поливиниловый спирт, гипс строительный и воду, отличаются небольшой прочностью на сжатие и малой морозостойкостью. При этом используется повышенное содержание минерального волокна и воздушное вяжущее — гипс строительный [3], снижающий морозостойкость. А применяемые мелкие фракции отходов производства базальтового волокна [4] в процессе формирования структуры бетонной смеси не обеспечивают достаточное сцепление с портландцементом, снижая плотность, а следовательно, прочность и морозостойкость затвердевшего бетона.

Целью научных исследований является увеличение прочности на сжатие и морозостойкости фибробетонов с использованием базальтовых дисперсных волокон. В связи с этим был осуществлен подбор составов бетонных смесей. Бетонная смесь включает в себя портландцемент, кварцевый песок, минеральное волокно, модифицирующую добавку и воду.

В качестве связующего использовался портландцемент ПЦ 500-Д0. Для повышения прочности бетона на макроуровне в качестве минерального волокна вводились базальтовые волокна-фибры диаметром 13...17 мкм и длиной 6...12 мм с прочностью на растяжение до 2000 МПа, блокирующие развитие макротрещин и являющиеся за счет сцепления с цементной матрицей центрами крупных новообразований в структуре затвердевшего бетона.

Для упрочнения структуры на микроуровне использовалась модифицирующая добавка — суперпластификатор «Полипласт СП-4», разработанный в соответствии с ТУ 5745-026-5804865-2007, который представляет собой порошок сополимеров темно-коричневого цвета на основе нафталинсульфокислоты. Добавка, адсорбируясь на поверхности зерен цемента, обладает пластифицирующе-водоредуцирующим действием, что позволяет значительно увеличить подвижность смеси, снизить количество воды затворения, уменьшить водоцементное отношение и тем самым увеличить плотность, прочность и морозостойкость затвердевшего бетона.

Таким образом, комплексное введение в бетонную смесь базальтовых волокон-фибр и суперпластификатора «Полипласт СП-4» способствует увеличению подвижности смеси при низком количестве воды затворения, что значительно повышает однородность и плотность, а следовательно, способствует увеличению прочности и морозостойкости на макро- и микроуровнях в результате более равномерного распределения небольшого количества базальтовых фибрьных волокон по всему объему бетонной смеси.

Способ приготовления бетонной смеси. Для более эффективного растворения модифицирующей добавки «Полипласт СП-4» и увеличения реакционной способности ее предварительно растворяют с небольшим количеством воды затворения (10–15 % от общего объема) в ультразвуковом диспергаторе (УЗД) с частотой 20 кГц в течение 1 мин до получения однородного раствора и вводят в бетонную смесь после предварительного перемешивания портландцемента, кварцевого песка, фибрьных волокон и оставшейся воды затворения. Предлагаемый способ получения модифицированной сырьевой смеси позволяет упрочнить структуру бетона на микро- иnanoуровнях.

Для определения механических свойств из бетонной смеси приготавливают по стандартной методике образцы-кубы размерами 10×10×10 см

и образцы-балочки размерами $4 \times 4 \times 16$ см, твердеющие в естественных условиях, и испытывают на прочность и морозостойкость.

Для экспериментальной проверки сырьевой смеси готовили несколько составов смесей, отличающихся различным содержанием компонентов в процентном соотношении по массе, три из которых показали оптимальные результаты. Количественные составы бетонной смеси в сравнении с известным составом [4] представлены в табл. 1.

Таблица 1
Количественные составы предлагаемой бетонной смеси

Состав	Соотношение компонентов смеси, мас. %			
	1	2	3	Известный состав [4]
Портландцемент	28	29	30	20...22
Кварцевый песок	56	58	60	43...44
Базальтовые волокна-фибры диаметром 13...17 мкм и длиной 6...12 мм	0,05	0,09	0,18	—
Отходы производства базальтового волокна	—	—	—	3,5...5,0
Суперпластификатор «Полипласт СП-4»	0,12	0,15	0,18	—
Вода	15,83	12,76	9,64	33,5...29

Таблица 2
Физико-механические свойства бетона

Состав предлагаемой бетонной смеси	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Морозостойкость, циклы
№ 1	50,34	6,0	300
№ 2	55,08	6,8	365
№ 3	56,16	7,1	400
Известный состав [4]	38...40,5	6,5...7,2	295...315

Физико-механические свойства бетона, приготовленного по указанному способу, в естественных условиях 28-суточного твердения в сравнении с известным составом [4] представлены в табл. 2. Анализ представленных данных показывает, что введение в бетонную смесь базальтовых волокон-фибр, а также суперпластификатора «Полипласт СП-4» при указанных соотношениях входящих в нее компонентов способствует, согласно составам № 1–3, увеличению прочности на сжатие по сравнению с известным составом на 32,5–38,7 %. Увеличение морозостойкости предлагаемой бетонной смеси (составы № 2 и 3) по сравнению с известным составом составляет 23,7–27,0 % при сохранении необходимой прочности при изгибе [4].

Таким образом, применение в составе бетонной смеси дисперсной арматуры из базальтовых волокон и суперпластификатора «Полипласт СП-4» способствует увеличению прочности и морозостойкости бетонной смеси, приготовленной по предлагаемому способу, при значительном снижении расхода фибры, что позволяет уменьшить затраты на производство бетонной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АСН-Инфо и Строительный еженедельник, www.stroy-press.ru.
2. Перфилов, В.А. Фибробетоны с высокодисперсными волокнистыми наполнителями [Текст] / В.А. Перфилов, А.В. Аткина, О.А. Кусмарцева // Междунар. на-

уч.-практ. конф. «Малоэтажное строительство» в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области». — Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. — С. 89–91.

3. Патент РФ № 2114081. Фибробетонная смесь [Текст] / Д.Е. Барабаш, В.И. Москаленко, В.И. Шубин, Л.П. Салогуб от 27.06.1998 г.
4. Патент РФ № 2288198. Бетонная смесь [Текст] / Г.М. Кондрашов, Б.М. Гольдштейн, В.А. Леонченко от 27.11.2006 г.

*ПЕРФИЛОВ Владимир Александрович, д-р техн. наук, доц.
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
ЗУБОВА Мария Олеговна, асп.
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
НЕИЗВЕСТНЫЙ Дмитрий Леонидович, асп.
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 13.10.11

Perfilov Vladimir Alexandrovich, doctor of technical sciences, assistant professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Zubova Mariya Olegovna, post-graduate student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Neizvestnyi Dmitriy Leonidovich, post-graduate student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE OF APPLICATION OF BASALT FIBRES AND MODIFYING ADDITIVE FOR INCREASE STRENGTH CHARACTERISTICS OF HEAVY CONCRETE

In studying the physical and mechanical properties of fiber reinforced concrete, the development of new formulations of heavy concrete, based on basalt fiber-fibers. The result of the complex introduction to the raw mixture of basalt fiber filaments with a diameter 13...17 mkm and with length 6...12 mm, as well as modifying additive «Polyplast SP 4» is to increase the strength of the compressive strength and frost resistance of concrete.

Key words: fibreconcretes, basalt fibre, modifying addition, superplastic, strength, frost resistance.

REFERENCES

1. ASN-info and Construction Weekly, www.stroy-press.ru.
2. Perfilov, V.A. Fibreconcrete with highly dispersed fibre components [Text] / V.A. Perfilov, A.V. Atkina, O.A. Kusmarceva // Intern. scientific and practical conf. «Small flooring building» in National project «Available and comfort dwelling for citizens of Russia: technologies and materials, problems and perspectives in Volgograd region». — Volgograd : VolgSACU, 2009. — P. 89–91.
3. Patent RF N 2114081. Fiber-concrete Mixture [Text] / D.E. Barabash, V.I. Moskalenko, V.I. Shubin, L.P. Salogub from 27.06.1998.
4. Patent RF N 2288198. Concrete Mixture [Text] / G.M. Kondrashov, B.M. Goldenshtein, V.A. Leonchenko from 27.11.2006.

УДК 691.544:666.951

**В.Д. ЧЕРКАСОВ, В.И. БУЗУЛУКОВ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ,
Е.В. КИСЕЛЕВ, Д.В. ЧЕРКАСОВ**

**АКТИВНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА
НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО
ДИАТОМИТА**

Кремнеземсодержащие минералы широко используются в строительстве. К высококремнеземистым материалам относится и диатомит. Несмотря на наличие крупных залежей, диатомит не нашел пока широкого применения в качестве минеральной добавки в цементы из-за понижения прочности цементных материалов. Данное исследование направлено на изучение химических методов модификации диатомита с целью получения активной минеральной добавки.

Ключевые слова: диатомит, гидроксид кальция, химическое модификация, активная минеральная добавка, цемент, предел прочности при сжатии.

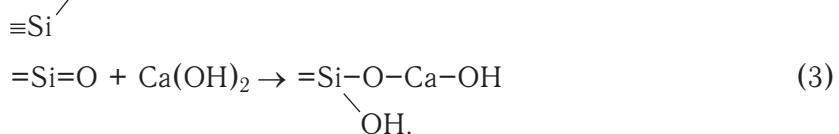
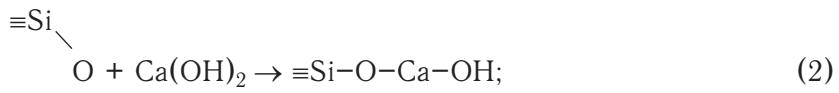
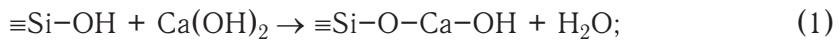
В настоящее время исследования по химическому модифицированию пористых кремнеземсодержащих природных материалов (диатомитов, опок и т.д.) в основном связаны с повышением их сорбционных свойств и каталитической активности [1–3]. В то же время работ, посвященных изучению методов химического модификации указанных материалов с целью получения веществ с ожидаемыми свойствами для использования их в строительстве¹, явно недостаточно. Особенно это относится к таким материалам, как диатомиты, ограниченное применение которых в строительстве связано с понижением прочности цементных композитов в их присутствии.

Повысить эффективность использования диатомитов в цементных системах можно путем изменения природы и структуры поверхности частиц диатомита в результате химического модификации. Известные методы химического модификации твердых веществ в целом делятся на две группы [2]: иммобилизация и сборка на поверхности. В первом случае целевой продукт получается в результате химического взаимодействия молекул модификатора с поверхностными атомами или группой атомов носителя. Основным достоинством метода является простота и возможность создания на поверхности значительной концентрации нанесенного вещества. Метод сборки на поверхности заключается в том, что относительно простые химические соединения, привитые к поверхности (например, методом иммобилизации), подвергаются дальнейшим последовательным превращениям. Основной недостаток данного метода — наличие промежуточных стадий и, как следствие, меньшее количество при-

¹ Пустовгар А.П. Эффективность применения активированных диатомитов в сухих строительных смесях // Стройт. материалы. 2006. № 10. С. 62–64.

Schober G. Die chemischen Umsetzungen bei der Herstellung von Porenbeton: Aus Zement, Kalk, Gips und Quarzsand wird Porenbeton // Zement-Kalk-Gips Intern. 2005. N 7. P. 63–70.

витых групп заданного типа, чем при иммобилизации. По нашему мнению, наиболее простым и доступным способом активации поверхности частиц диатомита является щелочное модифицирование гидроксидом кальция путем известкования. Благодаря химическому взаимодействию силанольных и силоксановых групп, расположенных на поверхности кремнеземсоставляющей диатомита с гидроксидом кальция, образуются фрагменты молекул гидросиликата кальция, связанные химически с матрицей кремнезема:



Эти активные группы типа (2) и (3) будут служить центрами кристаллизации гидратов в затворенных цементсодержащих системах. Благодаря относительно равномерному распределению пор в структуре диатомита [4], а следовательно, и на его поверхности в процессах структурообразования будут принимать участие группы гидросиликата кальция, главным образом расположенные на межпоровых участках поверхности диатомита. Учитывая размер этих групп и строение поверхности диатомита, предлагаемое модифицирование может привести к локальному изменению природы и структуры поверхности частиц диатомита на наноразмерном уровне.

В качестве добавок обычно используется высокодисперсный диатомит с большой удельной поверхностью. Следовательно, количество модифицированного диатомита, которое можно использовать в цементных системах в качестве добавки-затравки, способствующей кристаллизации гидратов и улучшающей структуру цементного камня, может быть очень небольшим.

В настоящей работе приведены результаты изучения влияния условий модифицирования диатомита гидроксидом кальция, а также состава цементных композитов на прочностные свойства затвердевшего цемента.

В качестве исходного материала для модифицирования был использован диатомит Инзенского месторождения (Ульяновская обл.), предварительно размолотый на шаровых мельницах (размер частиц до 0,16 мм), а в качестве минерального вяжущего — бездобавочный портландцемент производства ОАО «Мордовцемент» марки М500. Исходный диатомит хорошо адсорбирует воду, и в зависимости от температуры и влажности окружающей среды содержание воды в нем различно. Чтобы не учитывать содержание физически сорбированной воды в диатомите при модифицировании, его предварительно высушивали при 105 °C до постоянной массы.

Известковую обработку диатомита производили в реакторе, снабженном термометром и перемешивающим устройством, которое помещено в термостат. В реактор помещали определенный объем воды и при перемешивании добавляли оксид кальция. После 30 мин перемешивания в полученную суспензию гидроксида кальция добавляли расчетное количе-

ство диатомита и, не останавливая перемешивание, выдерживали смесь при заданной температуре в течение определенного времени. После завершения процесса смесь охлаждали, осадок отфильтровывали, промывали водой и сушили при температуре 105...107 °С. Полученный продукт в дальнейшем использовался в качестве добавки в цемент. Эффективность модифицирования диатомита оценивалась по влиянию его на предел прочности при сжатии затвердевшего цемента после 28 сут твердения в нормально-влажностных условиях.

При модифицировании диатомита варьировались: температура (30...98 °С), массовое соотношение жидкой и твердой фаз ($m_{ж} : m_{тв} = 4-8 : 1$), мольное соотношение (модуль) $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ (0,05...0,4), продолжительность модифицирования (1,5...7,0 ч). Количество вводимого диатомита в цемент изменялось в пределах (мас. % от массы цемента) 0,5...10,0. Основные результаты проведенных испытаний приведены на рис. 1 и 2, где R — предел прочности при сжатии.

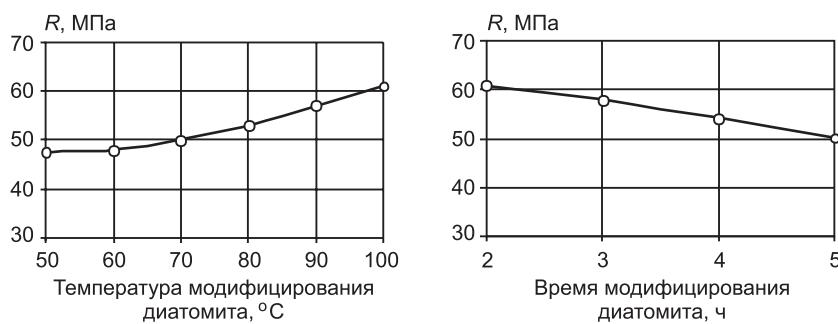


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии от времени и температуры модифицированного диатомита

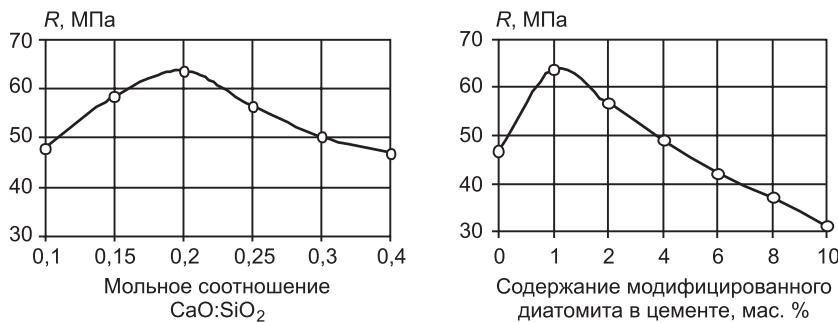


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от мольного соотношения и содержания в цементе модифицированного диатомита

Следует отметить, что при модифицировании диатомита оптимальное отношение масс жидкой и твердой фаз ($m_{ж} : m_{тв}$) оказалось равным 5; изменение этой величины в сторону увеличения не оказывается на свойствах конечного продукта, а уменьшение — ухудшает перемешиваемость супензии.

Из представленных данных следует, что продолжительность модифицирования диатомита зависит от температуры среды: чем выше температура, тем меньше время модифицирования. Наблюдаемая зависимость характерна для химических реакций. То, что в условиях модифи-

цирования диатомита гидроксидом кальция происходит химическое взаимодействие исходных веществ, было установлено по результатам химического анализа (см. таблицу). Из представленных в таблице данных следует, что по мере увеличения модуля $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ в исходном диатомите увеличивается относительное содержание CaO и уменьшается содержание SiO_2 и других оксидов, входящих в состав диатомита. Такие изменения объясняются тем, что на поверхности кремнезема происходит замена протона силанольной группы на ион кальция, т.е. часть атомов кремния на поверхности как бы заменяется на ионы кальция. Увеличение содержания CO_2 в модифицированном диатомите связано с частичной карбонизацией кальциевых гидросиликатных групп в условиях модификации.

Химический состав диатомитов, модифицированных гидроксидом кальция

№ п/п	Мольное отношение $\text{CaO}:\text{SiO}_2$	Состав, мас. %							Общая пористость, %
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	CO_2	П.п.п.	
1	Диатомит немодифицированный	76,20	11,90	4,70	1,50	1,10	$5,85 \cdot 10^{-2}$	4,60	70
2	0,10	74,90	7,70	3,00	9,80	1,20	1,70	3,40	65
3	0,20	68,60	6,00	2,30	14,80	1,20	2,80	7,10	64
4	0,30	62,50	5,60	2,00	18,90	1,20	6,50	9,80	63
5	0,40	57,10	4,00	1,60	23,70	1,20	9,90	12,40	61

Для установления изменений в структуре поверхности кремнезема — основной составляющей диатомита — проведен инфракрасный спектральный анализ немодифицированного и модифицированного диатомитов. Установлено, что с увеличением соотношения $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ происходит уменьшение интенсивности полос поглощения при 474 cm^{-1} и в области $1000...1500 \text{ cm}^{-1}$, которые относят к деформационным $\delta(\equiv\text{SiOH})$ и валентным ассиметричным $\nu_{as}(\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv)$ колебаниям группы кремний — кислород². Это связано с тем, что по мере увеличения содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в реакционной смеси при модификации происходит постепенное заполнение поверхности кремнезема ионами кальция, которое на ИК-спектрах модифицированных диатомитов выражается постепенным уменьшением интенсивности полос поглощения $(\equiv\text{Si}-\text{O})$ -групп.

Изучение зависимости прочности затвердевшего цемента от кальциевого модуля в модифицированном диатомите показало, что максимальная прочность достигается при мольном соотношении $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ в исходной смеси, равном 0,15...0,18 (рис. 2). При такой относительно малой величине кальциевого модуля при модификации химические превращения происходят преимущественно на поверхности частиц диатомита с участием силанольных групп. Подтверждением этого процесса может служить и то, что при карбонизации модифицированного диатомита его эффективность как активной добавки понижается. Карбонизация проводилась путем пропускания газообразного CO_2 в водную суспензию модифицированного диатомита. Можно предположить, что в условиях мо-

² Киселев А.В., Лыгин В.И. ИК-спектры поверхностных соединений и адсорбированных веществ. М.: Наука, 1972. 460 с.

Литтл Л. Инфракрасные спектры адсорбированных молекул. М.: Мир, 1969. 512 с.

дифицирования диатомита гидроксид кальция взаимодействует не только с кремнеземной составляющей диатомита, но и с глинистыми примесями с образованием гидроалюмосиликатов кальция, способных оказывать определенное влияние на процессы структурообразования в затворенном цементе. Однако, как показано в работе [3], такое взаимодействие имеет место при мольном соотношении $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ в исходной системе выше 0,69.

Как показали исследования, прочность затвердевшего цементного композита значительно зависит от содержания модифицированного диатомита (рис. 2). Максимальное увеличение предела прочности при сжатии (до 35 %) достигается при введении относительно небольших количеств химически модифицированного диатомита: примерно 0,8–1,0 % от массы цемента. Все это свидетельствует в пользу того, что частицы модифицированного диатомита действительно проявляют свойства центров кристаллизации продуктов гидратации цемента, тем самым влияя на структуру и свойства затвердевшего цемента.

На основании изложенного можно предложить следующие условия получения эффективной добавки на основе диатомита в цементные системы:

- температура среды 93...95 °C;
- соотношение масс жидкой и твердой фаз 5 : 1;
- мольное соотношение $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 0,15...0,18$;
- продолжительность процесса модификации 2,0...2,5 ч.

Полученный продукт после сушки при вышеуказанных условиях необходимо хранить в плотно закрытой таре. Во избежание частичной карбонизации при синтезе и расхода дополнительной энергии при сушке модифицированный диатомит после удаления водного раствора путем фильтрации можно использовать без высушивания остаточной воды. В этом случае необходимо предварительно определить влажность модифицированного диатомита и установленное количество воды учесть при расчете количества вводимой добавки в цемент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тертых, В.А. Химические реакции с участием поверхности кремнезема [Текст] / В.А. Тертых, Л.А. Белякова. — Киев : Наук. думка, 1991. — 264 с.
2. Модифицированные кремнеземы в сорбции, катализе, хроматографии [Текст] ; под ред. Г.В. Лисичкина. — М. : Химия, 1986. — 248 с.
3. Манукян, А.Г. Синтез и свойства адсорбирующих и фильтрующих материалов на основе диатомитов [Текст] / А.Г. Манукян, Г.Г. Мартиросян // Журн. прикл. химии. — 1999. — Т. 72, № 11. — С. 1795–1800.
4. Дистанов, У.Г. Природные сорбенты СССР [Текст] / У.Г. Дистанов, А.С. Михайлов. — М. : Наука, 1990. — 168 с.

ЧЕРКАСОВ В.Д., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
БУЗУЛУКОВ В.И., д-р техн. наук, проф.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
КИСЕЛЕВ Е.В., канд. техн. наук, доц.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ЕМЕЛЬЯНОВ А.И., канд. техн. наук, доц.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ЧЕРКАСОВ Д.В., студ.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 27.12.11

Cherkasov Vasiliy Dmitriyevich, a.m. of RAASN, doctor of technical sciences, professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

Buzulukov Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

Kiselev Yevgeniy Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

Yemelyanov Aleksey Ivanovich, candidate of technical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

Cherkasov Dmitriy Vasilyevich, student, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

ACTIVE MINERAL ADDITION BASED ON CHEMICALLY MODIFIED DIATOMITE

Silica minerals are used widely in construction. Diatomite also concerns to high-silica minerals. In spite of being huge deposits, diatomite has no wide use as a mineral addition because of strength decrease of cement materials. The point of this research is the analysis of chemical methods of diatomite's modifying. The goal is to get active mineral addition.

Key words: diatomite, calcium hydroxide, chemical modifying, active mineral addition, cement, compression strength.

REFERENCES

1. Tertykh, V.A. Chemical Reactions Involving the Surface of Silica [Text] / V.A. Tertykh, L.A. Belyakova. — Kiev : Nauk. Dumka, 1991. — 264 p.
 2. Modified Silica in Sorbtion, Catalysis and Chromatography [Text] ; Ed. G.V. Lisichkin. — M. : Chemistry, 1986. — 248 p.
 3. Manukyan, A.G. Synthesis and properties of the adsorbent and filter materials based on diatomite [Text] / A.G. Manukyan, G.G. Martirosyan // J. of Applied Chemistry. — 1999. — Vol. 72, N 11. — P. 1795–1800.
 4. Distanov, U.G. Natural Sorbents of the USSR [Text] / U.G. Distanov, A.S. Mikhaylov. — M. : Science, 1990. — 168 p.
-

УДК 691.42

И.М. СЕБЕЛЕВ, Н.А. МАШКИН, Ю.А. ШАРАВИН

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПО ФАСАДНОЙ КЕРАМИКЕ

Показано, что нанесение защитно-декоративных полимерных порошковых покрытий на поверхность кирпича позволяет расширить цветовую гамму отделки фасадов зданий. Введение металлических опилок в состав керамической массы из пылеватых суглинков при производстве лицевого кирпича позволяет повысить качество изделий.

Ключевые слова: лицевой кирпич, порошковые покрытия, долговечность.

Современные кирпичные здания нередко имеют только желто-коричневые и красно-коричневые оттенки фасадной отделки. Для повышения декоративной выразительности кирпича предлагается технология нанесения защитно-декоративных полимерных порошковых покрытий на поверхность рядового и облицовочного кирпича. Данная технология позволяет получить на поверхности кирпича атмосферостойкое защитно-декоративное покрытие со сроком службы более 20 лет и цветовой гаммой, включающей около 2000 цветов, оттенков и фактур. Кирпич с полимерным покрытием может применяться для декоративной отделки фасадов, лоджий, балконов, для внутренней отделки помещений, а также кладки каминов, отопительных печей с температурой наружной поверхности не выше 80...100 °C (рис. 1).

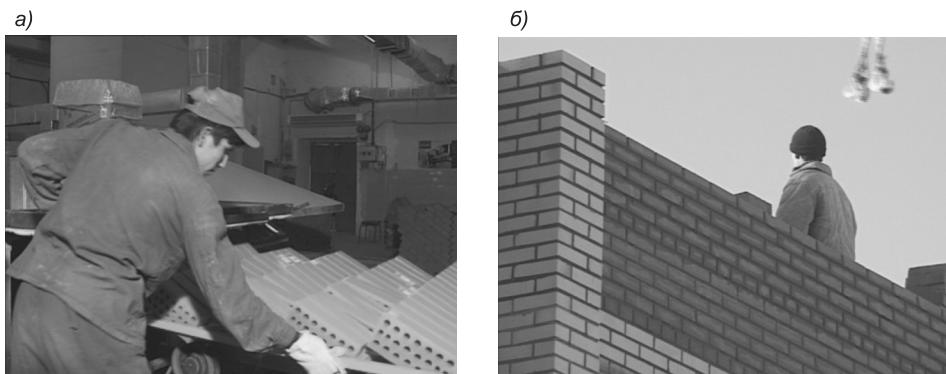


Рис. 1. Технологическая линия по нанесению порошковых полимерных покрытий на фасадную керамику (а) и пример использования окрашенного кирпича в строительстве (б)

Для исследований применялось глинистое сырье Западной Сибири, представляющее собой лессовидные пылеватые суглинки с содержанием глинистой фракции 12,1...25,5 мас. %. Пылеватые суглинки, как правило, обладают низкими структурно-механическими характеристиками, имеют высокую чувствительность к сушке и плохо формуются. Поэтому такое сырье требует корректирования различными способами. Наиболее перспективно введение структурирующих добавок в лессовидные пылеватые

суглинки. В качестве таких добавок рекомендованы стеклобой и металлические опилки (отходы производства). Добавка уже 2,5 мас. % металлонаполнителя дает возможность получать кирпич марок 125–150. При введении 10 мас. % металлонаполнителя прочность кирпича повышается до 18...20 МПа [1].

Процесс получения полимерного порошкового покрытия на поверхности керамических изделий производится путем нанесения порошковой краски в электростатическом поле повышенной напряженности (до 100 кВ) с последующим формированием полимерного слоя в специализированных камерах поверхностного инфракрасного нагрева [2]. Технология состоит из следующих операций: сортировка кирпича, укладка в кассеты, подготовка поверхности, предварительный нагрев, нанесение покрытия, формирование покрытия, охлаждение, упаковка и складирование (рис. 2).

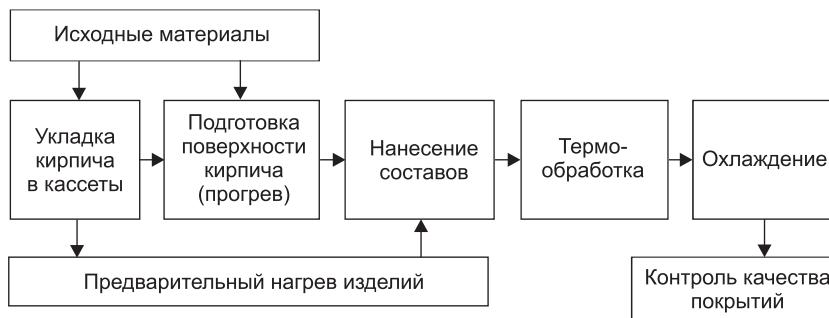


Рис. 2. Технологическая схема получения покрытий из порошков полимеров по кирпичу

Наиболее оптимальным способом подготовки поверхности кирпича перед нанесением порошковых полимерных покрытий следует признать термическое обезжикивание поверхности как наиболее технологичное, хотя более высокие показатели адгезии имеют покрытия, нанесенные на поверхность кирпича, очищенную механическим способом.

Для повышения декоративных свойств стеновых материалов, в том числе керамического кирпича, целесообразно использовать, помимо технологий глазурования и окрашивания в массе, нанесение порошковых полимерных покрытий.

ИК-спектры полифениленсульфидного покрытия и подстилающего керамического слоя, снятые на ИК фурье-спектрометре Scimitar FTS 2000, подтвердили высокую степень адгезии полимерного и подстилающего слоев (рис. 3, 4). В спектре кирпича интенсивная полоса поглощения при 1086 см^{-1} соответствует валентным колебаниям Si—O связей. Деформационные колебания этих связей находятся в области $800\ldots400 \text{ см}^{-1}$. В спектре полимерного покрытия присутствуют полосы групп CH_n ($n = 1, 2, 3$), CO, а также полосы, обусловленные валентно-деформационными колебаниями циклов.

Пробы готовили методом таблетирования в бромистом кали. Для построения калибровочного графика брали навеску ПФС 0,05 г, бромистого кали 0,8 г и парахлортиофенола 0,012 г. Навески перемешивали в вибрационной мельнице в течение 30 мин. Таблетки запрессовывали в кольцевых пресс-формах диаметром 20 мм при давлении 250 МПа в течение 2 мин. Перед прессованием пробы вакуумировали в течение 15 мин.

При ускоренных испытаниях порошковых полимерных покрытий на атмосферостойкость использовался везерометр типа ИП-1-3. Образцы

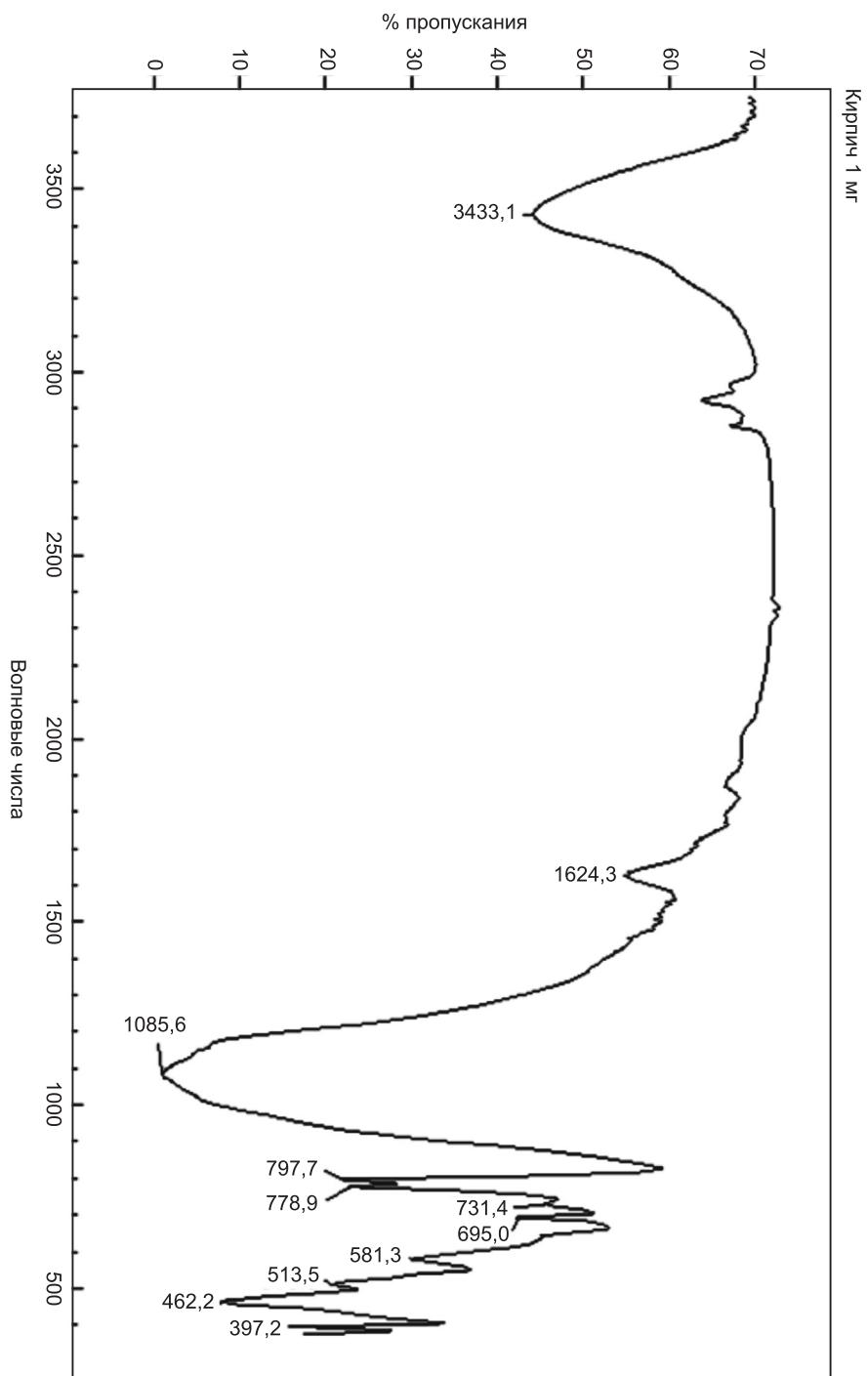


Рис. 3. ИК-спектр керамического кирпича с металлонаполнителем

кирпича с покрытием устанавливались в кассете аппарата и подвергались попеременному воздействию света и воды по следующему режиму. В течение первых пяти суток облучение и орошение велось попеременно: 10 мин — облучение с орошением и 50 мин — облучение без орошения. Затем в течение пяти суток — 30 мин в час облучение с орошением и 30 мин без орошения, и в последующие пять суток облучение велось без орошения.

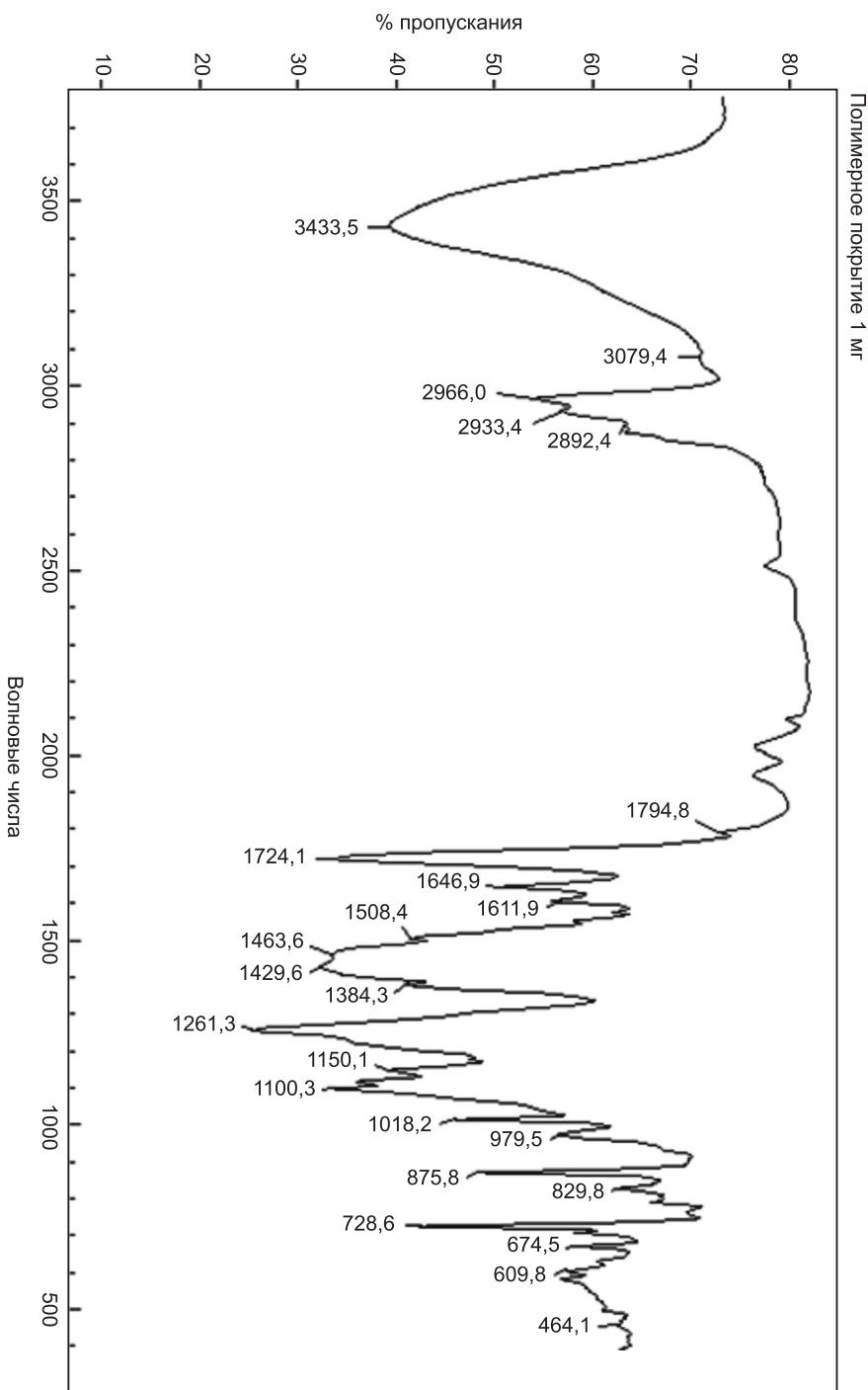


Рис. 4. ИК-спектр полимерного порошкового покрытия по керамическому кирпичу с металлонаполнителем

Режим испытаний в везерометре был выбран исходя из климатических условий города Новосибирска, где среднее число дней с количеством осадков более 0,1 мм составляет 86, отношение дождливых дней к недождливым 86:279 или примерно 1:3,5.

Атмосфера- и светостойкость образцов оценивалась визуально и по потере массы за время испытаний по отношению к первоначальному. Общее время испытаний составило 15 сут, температура 40...60 °С. Как вид-

но из таблицы, полимерные порошковые покрытия выдержали испытания без изменений, на глазурованном кирпиче наблюдались только единичные волосяные трещины. Результаты свидетельствуют о достаточно высокой атмосферостойкости порошковых полимерных покрытий, сопоставимой со стандартной глазурованной керамикой, долговечность которой превышает 20 лет.

Ускоренные испытания покрытий на атмосферостойкость

Вид образца	Масса образца при испытании, г		Потеря массы		Изменение лицевой поверхности образца
	до	после	г	%	
Глазурованный кирпич	317	314	3	0,95	Единичные волосяные трещины
Стандартный кирпич с порошковым покрытием	276	274	2	0,72	Без изменений
Кирпич с металлонаполнителем и порошковым покрытием	282	280	2	0,71	Без изменений

Выводы. Для получения лицевого керамического кирпича испытаны порошковые полимерные покрытия, атмосферостойкие и обладающие высокой адгезионной способностью к керамическому черепку. С точки зрения обеспечения атмосферостойкости и долговечности порошковых полимерных покрытий по керамике предпочтительны эпоксидные и полифениленсульфидные полимеры.

Испытания полимерных покрытий на стойкость и долговечность показали, что лицевой кирпич с металлонаполнителем и с порошковым полимерным покрытием не уступает глазированному кирпичу. При этом в результате воздействия агрессивных и атмосферных факторов на глазури появляется сетка мелких трещин, в то время как полимерные покрытия сохраняют цвет и сплошность, что позволяет прогнозировать их высокую долговечность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2215706. Шихта для изготовления армированных керамических изделий / Н.А. Машкин, Ю.А. Шаравин, Т.Ф. Каткова и др.; опубл. 10.11.03 г., Бюл. № 31 (приоритет от 08.02.02 г.).
2. Машкин, Н.А. Оптимизация технологии отделочных и изоляционных материалов / Н.А. Машкин, Н.Е. Зибницкая, Ю.А. Шаравин // Стройт. материалы. — 2006. — № 11. — С. 12–13.

СЕБЕЛЕВ Иван Михайлович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

МАШКИН Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ШАРАВИН Юрий Алексеевич, соиск.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 08.12.11

Sebelev Ivan Michailovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Mashkin Nikolai Alekseevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mashkin@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Sharavin Yuri Alekseevich, degree seeker, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

ENSURING THE LONGEVITY OF DECORATIVE POWDER POLYMERIC COATINGS ON FACADE CERAMIC

Shown that the protective-decorative polymeric powder coatings on the surface of the brick, extends color gamut finishing facades. The introduction of metal into sawdust ceramic mass of silt loam soil in facial bricks, to improve the quality of products.

Key words: face brick, powder coating, durability.

REFERENCES

1. Patent RF N 2215706. The Charge for the Manufacture of Reinforced Ceramics [Text] / N.A. Mashkin, Yu.A. Sharavin, T.F. Katkova et al.; Publ. 10.11.03. Bull. N 31 (priority from 08.02.02).
 2. Mashkin, N.A. Optimization technology of finishing and insulation materials [Text] / N.A. Mashkin, N.E. Zibnicka, Yu.A. Sharavin // Building Materials. — 2006. — N 11. — P. 12–13.
-

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 628.214:69.057:621.542

А.С. ДЕДОВ, А.С. МЕЛЬНИКОВА, Н.А. ПОПОВ, О.В. ТКАЧЕНКО,
Д.Э. АБРАМЕНКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ЗАМЕНЫ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Рассматриваются методы и оборудование для бестраншейной замены трубопроводов различного назначения.

Ключевые слова: бестраншная замена, пневматический ударный механизм, форсаж холостого хода, центральная сквозная трубка.

Преимущества бестраншного метода замены трубопроводов над методом замены открытым способом очевидны и бесспорны. В настоящее время для замены ветхих трубопроводов применяется, как правило, два метода — статический и динамический. Статический метод основан на применении механизма, который развивает определенное тяговое усилие (гидродомкрат, различные лебедки и т.п.) и перемещает по старой трубе расширитель с резцами и новую трубу. Динамическим называют метод, при котором в качестве основной технологической машины используется пневмопробойник, работающий на энергии сжатого воздуха. Динамический метод имеет ряд преимуществ над статическим, основное из которых это более высокие разрушающие нагрузки на старый трубопровод, что позволяет разрушать более прочные стенки и трубы большого диаметра, а также обходить и разрушать различные препятствия, встречающиеся на пути.

Технология замены труб водоотведения. Работы по замене трубопровода можно производить как из существующих колодцев без проведения земляных работ, так и из приямков в случае замены трубопроводов больших диаметров. Максимальная длина заменяемого участка может варьироваться от 50 до 100 м и выше. Энергия удара, развиваемая пневмоударным механизмом, позволяет разрушать старые трубы, изготовленные из любого материала. Перед началом восстановительных работ проводится исследование старого трубопровода. На данном этапе выясняют, в каком состоянии находятся старые коммуникации, какой комплект оборудования и технология будут оптимальны в данном случае. Канализационные колодцы осматривают визуально, а для обследования внутренней поверхности трубопровода желательно применять видеокамеру. При маленьких диаметрах камеру протаскивают при помощи троса, при диаметре 400...1200 мм целесообразно использование камеры на самоходном шасси (рис. 1), при диаметре более 1200 мм исследование может произ-

© Дедов А.С., Мельникова А.С., Попов Н.А., Ткаченко О.В., Абраменков Д.Э., 2011

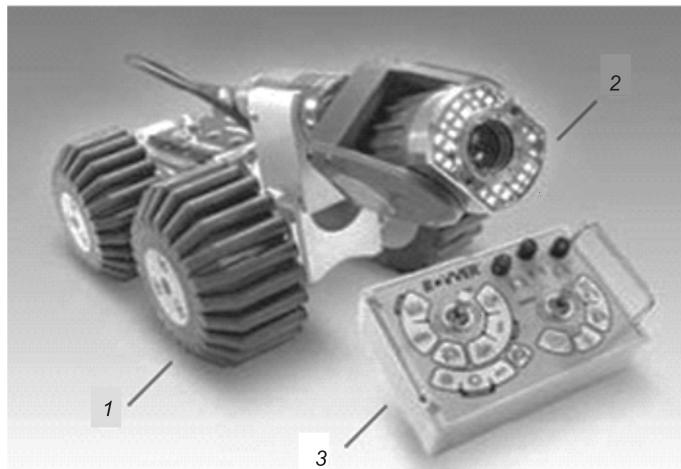


Рис. 1. Видеокамера на самоходном шасси

1 — колеса; 2 — видеокамера; 3 — пульт дистанционного управления

водить рабочий при условии соблюдения техники безопасности (предварительное удаление из трубы взрывоопасных, ядовитых газов и т.д.). Также перед началом работ исследуются физико-механические свойства грунта. Если старый трубопровод полностью забит или обрушился, то первым этапом работ становятся меры по его очистке. Для удаления «пробки» можно воспользоваться серийно выпускаемыми каналопромывочными машинами на базе автомобильного шасси, которые позволяют развивать давление до 15 МПа (КО-512, КО-507А2, КО-560) [1]. Если при помощи данных машин засор удалить не удается, то целесообразно воспользоваться лидерным пневматическим проходчиком небольшого диаметра, который крепят на специальных штангах. Характеристики основных лидерных проходчиков приведены в таблице (стоит обратить внимание на пробойник ПСП-38, имеющий наименьшие массу и расход воздуха на один удар). Полной очистки внутренней поверхности старой трубы не требуется, поскольку пневмоударный механизм (ПУМ) имеет достаточную энергию удара для преодоления наносов, сколов, посторонних предметов, проникших внутрь трубопровода, корней деревьев и т.п.

Характеристики лидерных пневматических проходчиков

Страна, фирма-разработчик, модель	Диаметр пробойника, мм	Длина пробойника, мм	Масса пробойника, кг	Частота ударов, Гц	Расход воздуха, м ³ /мин
ФРГ, Grundomat, 40E	40	880	4,5	10,0	0,4
ФРГ, Terra, T-042	42	900	7,0	8,3	0,6
ФРГ, Grundomat, 45E	45	900	8,0	8,3	0,45
ФРГ, Essig IPM-45	45	965	8,2	5,5	0,8
Англия, Pneumatic punc, 4S	45	800	7,0	—	1,35
США, Pirce Arrow, 2inch	51	1067	11,6	8,7	1,4
ФРГ, Essig IPM-55	55	1120	12,2	5,5	0,8
Россия, ИГД СО РАН, ДЖЛ-798	45	900	6,0	7,0	0,3
Россия, ИГД СО РАН, СО-198	55	1100	14,0	6,0	0,5
Россия, НГАСУ (Сибстрин), ПСП-38 [4]	38	550	2,7	30,0	1,2

При необходимости более детально изучить внутреннюю поверхность заменяемой трубы очистку внутренней поверхности можно проводить с использованием металлических щеток, которые протаскивают через трубопровод при помощи троса с последующей промывкой каналопромывочной машиной. В зависимости от степени обводнения грунта и диаметра заменяемого трубопровода возможно применение трех методов замены. При малом диаметре (не более 110 мм) новый трубопровод поставляется в бухте, с которой и затягивается под землю, в связи с чем данный метод получил название «затягивание плети». При высокой влажности ($G > 0,8$) применяется так называемая «задняя подтяжка». В этом случае часть тянувшей нагрузки (15–20 %) передается на планшайбу, установленную на конце новой трубы. В остальных случаях применяется метод «передней подтяжки».

Данная технология предусматривает изготовление нового трубопровода из полимерных труб. В настоящее время наиболее известны следующие виды полимерных труб: ПВХ (поливинилхлорид), ПП (полипропилен), ПЭ (полиэтилен). Широкое применение имеют полиэтиленовые трубы, которые делятся на две группы: из полиэтилена низкого давления и высокой плотности (ПНД или LDPE) и полиэтилена высокого давления и низкой плотности (ПВД или HDPE). Наибольшее распространение получили трубы ПНД, которые имеют следующие достоинства:

1. Высокая устойчивость к истиранию и долговечность — пластиковые трубы имеют гарантийный срок службы 50 лет. Для сравнения — стандартные металлические трубы заменяются максимум через 25 лет.

2. Гидродинамическая пропускная способность труб ПНД канализационных 100...110 мм или с большим диаметром. Они имеют гладкие стенки, на которые мусор не зацепляется, и трубы сохраняют первоначальную проходимость в течение значительного промежутка времени.

3. Трубы ПНД за время эксплуатации могут переносить небольшие деформации, которые не оказывают губительного действия на трубопровод из пластика.

4. Упругость труб помогает снизить давление грунта и избежать их разрыва при подземной прокладке канализации или трубопроводов.

5. После установки полиэтиленовым трубам не требуется создание специальных условий или какого-либо сложного ухода.

6. Замерзание воды внутри труб из ПНД не приводит к ее разрушению.

7. Полимерные трубы нетоксичны и экологически безопасны.

8. Трубы из ПНД выдерживают значительные отрицательные температуры, что дает возможность работать с ними в зимних условиях.

Применение труб ПВХ в мировой практике ограничивается использованием их во внутренней канализации. Трубы ПП (полипропилен) довольно хрупкие и чувствительные к механическому воздействию, что ограничивает их применение при бестраншейной замене [2, 3].

После очистки и подготовки старой трубы приступают к установке вспомогательного оборудования. В работах по бестраншейной замене используются оба канализационных колодца, между которыми проложена старая труба. Колодец, в котором будут вестись основные работы и из которого будет затягиваться новая труба, называется «рабочим колодцем». Колодец, в котором закончится новая труба, имеет название «приемный колодец». Обычно колодцы назначают таким образом, чтобы лоток приемного колодца был выше лотка рабочего колодца для организации движения канализационных стоков. В приемном колодце устанавливается блок, через который будет проходить канат, причем блок выставляется

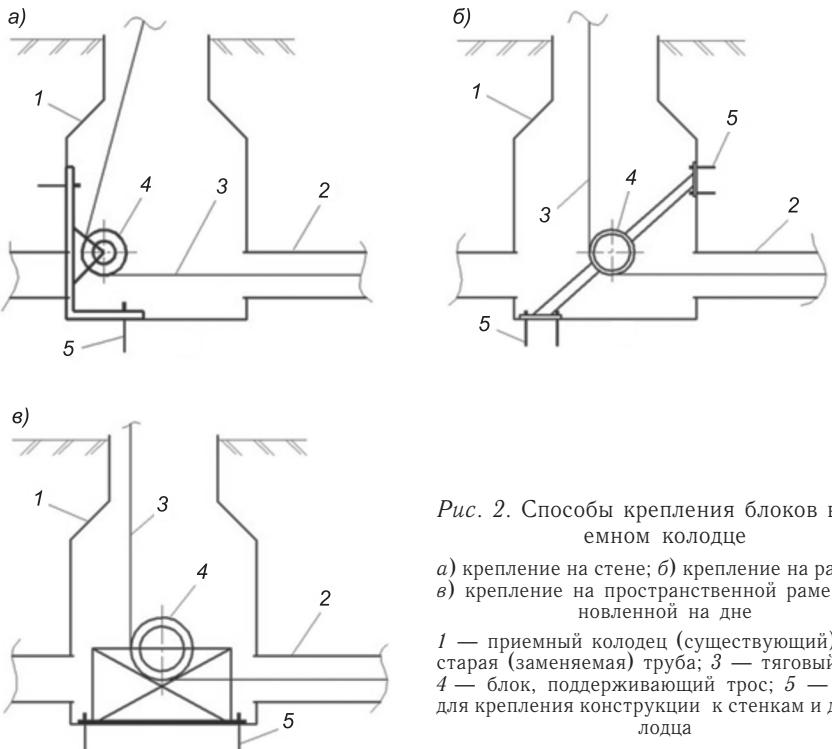


Рис. 2. Способы крепления блоков в приемном колодце
а) крепление на стене; б) крепление на раскосе;
в) крепление на пространственной раме, установленной на дне

1 — приемный колодец (существующий); 2 — старая (заменяемая) труба; 3 — тяговый трос; 4 — блок, поддерживающий трос; 5 — анкер для крепления конструкции к стенкам и дну колодца

напротив ремонтируемой трубы таким образом, чтобы ветвь каната заходила в трубу по центральной оси. Добиться этого можно за счет расположения блока на раскосе или планке, закрепленной на противоположной стене, или на объемной конструкции, выполненной из металлического профиля и расположенной на дне колодца. При этом не допускается смещение блока от проектного положения (рис. 2).

После установки блока через старый трубопровод из приемного колодца в рабочий протягивают проволоку и, закрепив на ее конце трос, затягивают обратно. Над рабочим колодцем устанавливается грузоподъемная лебедка, при помощи которой пневмопробойник опускают к месту работ.

Пневмопробойник устанавливается напротив разрушаемой трубы, после чего конец троса, который находится в рабочем колодце, пропускается через резец-расширитель и закрепляется на пневмопробойнике. Резец представляет собой усеченный конус и предназначен для разрушения старого трубопровода. Для эффективного разрушения и втрамбовывания в грунт старой трубы диаметр расширителя принимается на 10 % больше, чем диаметр старого трубопровода. В случае, когда старый трубопровод выполнен из хрупкого материала, расширитель выполняется гладким, при необходимости разрушения металлических трубопроводов на расширитель устанавливают один или несколько ножей, предназначенных для разрезания старой трубы. Для обеспечения работы пневмопробойник при помощи рукавов соединяют с источником сжатого воздуха (мобильным компрессором). Поскольку вход для подачи сжатого воздуха находится на заднем торце пневмопробойника, то во время его движения питающий рукав должен располагаться внутри нового трубопровода, в связи с этим для обеспечения беспрерывной работы рукав должен быть проведен через все секции устанавливаемого трубопровода. Подвод воздуха возможен через старую трубу со стороны приемного колодца, но в этом случае

существует вероятность повреждения рукава и полной остановки пневмопробойника. Первая секция нового трубопровода жестко крепится на муфте, расположенной на корпусе пневмопробойника. Тяговый трос вторым своим концом проходит через блок, расположенный в приемном колодце, и присоединяется к пневматической тяговой лебедке, которая располагается на поверхности над приемным колодцем. Лебедка принимает пневматической, что позволяет обеспечить постоянное усилие при любом режиме перемещения пневмопробойника и даже при его остановке при встрече с препятствием. Тяговая лебедка предназначена:

- для направления движения пневмоударника;
- компенсации отдачи и более плотного контакта расширителя с резцами и трубой;
- создания дополнительного статического усилия, направленного на разрушение старого трубопровода.

После проведения всех подготовительных работ запускается пневматическая лебедка, которая создает необходимое тяговое усилие. Далее в работу включается компрессор, и пневмоударник, двигаясь, разрушает старый трубопровод, втрамбовывая разрушенные фрагменты в грунт, образует при этом скважину и затягивает в нее секции нового трубопровода.

Инновационное решение. Поскольку расширитель выполнен цельнометаллическим, прохождение стоков через ремонтируемый участок блокируется. Для того чтобы избежать аварийной ситуации в приемном колодце, внутрь трубы, из которой поступают стоки, устанавливается пневматическая заглушка. Стоки, которые собираются в колодце с более высокой отметкой лотка, удаляются при помощи илососной машины КО-507 А или КО-560. Однако, чтобы избавиться от использования машин и не перекрывать магистраль на время замены, можно использовать следующий метод: в пневмоударном механизме [5] выполняется сквозная центральная трубка, проходящая через весь корпус в осевом направлении. Отверстие выполняется также и в колпаке-резаке. На работу механизма трубка влияния не оказывает, поскольку геометрические зависимости остаются неизменными (рис. 3).

При небольших расходах возможно прохождение стоков самотеком через центральную трубку. В случае значительных объемов сточных вод к выходному концу центральной трубы возможно присоединение всасывающего патрубка от фекального насоса (например,

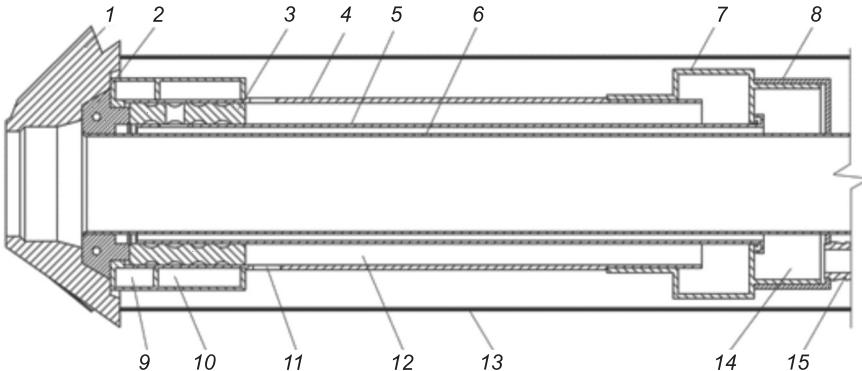


Рис. 3. Пневмоударный механизм со сквозной центральной трубкой

1 — колпак с ножами; 2 — наковальня; 3 — ударник; 4 — корпус; 5 — воздухораспределительная трубка; 6 — центральная трубка для спуска стоков; 7 — стакан; 8 — крышка; 9 — камера холостого хода; 10 — камера форсажа холостого хода; 11 — выхлопное отверстие; 12 — камера рабочего хода; 13 — секции нового трубопровода; 14 — предкамера сетевого воздуха; 15 — ниппель для впуска воздуха из сети сжатого воздуха

Calpeda A) или дизельной мотопомпы (например, Varisco J6-250). Пере качивание производится в выходной трубопровод, расположенный в рабочем колодце.

Аналитическое описание работы ПУМ. Обобщенная физико-математическая модель дроссельного пневматического ударного механизма с камерой форсажа холостого хода (рис. 4), находящегося в составе пневмопробойника, запишется в виде системы уравнений изменения давления и температуры воздуха, ускорений перемещения ударника, корпуса и трубы:

$$\left\{ \begin{array}{l} dp_n/dt = k [W(\omega_{no}\varphi_{no} - \omega_{\phi n}\varphi_{\phi n} - \omega_p\varphi_p - \omega_x\varphi_x)]/V_n, \\ dp_\phi/dt = k [W(\omega_{\phi n}\varphi_{\phi n} - \omega_{x\phi}\varphi_{x\phi} + \text{sgn}(y_{x\phi}\psi_{x\phi}))]/V_\phi, \\ dp_p/dt = k [W(\omega_p\varphi_p - \omega_{ap}\varphi_{ap} + \text{sgn}(y_{x\phi}\psi_{x\phi}) + \text{sgn}(y_{yk}\psi_{yk}) + \\ + \text{sgn}(y_{yt}\psi_{yt})] + p_p(dx_y/dt) S_y]/[V_p - x_y S_y], \\ dp_x/dt = k [W(\omega_x\varphi_x - \omega_{ax}\varphi_{ax} + \omega_{x\phi}\varphi_{x\phi} + \omega_{3x}\varphi_{3x} + \\ + \text{sgn}(y_{x\phi}\psi_{x\phi}) + \text{sgn}(y_{yk}\psi_{yk}) + \text{sgn}(\omega_{3x}\varphi_{3x}) + \text{sgn}(y_{yt}\psi_{yt})] - \\ - p_x(dx_y/dt) S_y]/[V_x + x_x S_y], \\ d\theta_n/dt = \theta_n [W(\omega_{no}\varphi_{no}\Omega_{no} - \omega_{\phi n}\varphi_{\phi n}\Omega_{\phi n} - \omega_p\varphi_p\Omega_p - \omega_x\varphi_x\Omega_x)]/p_n V_n, \\ d\theta_\phi/dt = \theta_\phi [W(\omega_{\phi n}\varphi_{\phi n}\Omega_{\phi n} + \text{sgn}(\omega_{x\phi}\psi_{x\phi}\Omega_{x\phi}))]/p_\phi V_\phi, \end{array} \right.$$

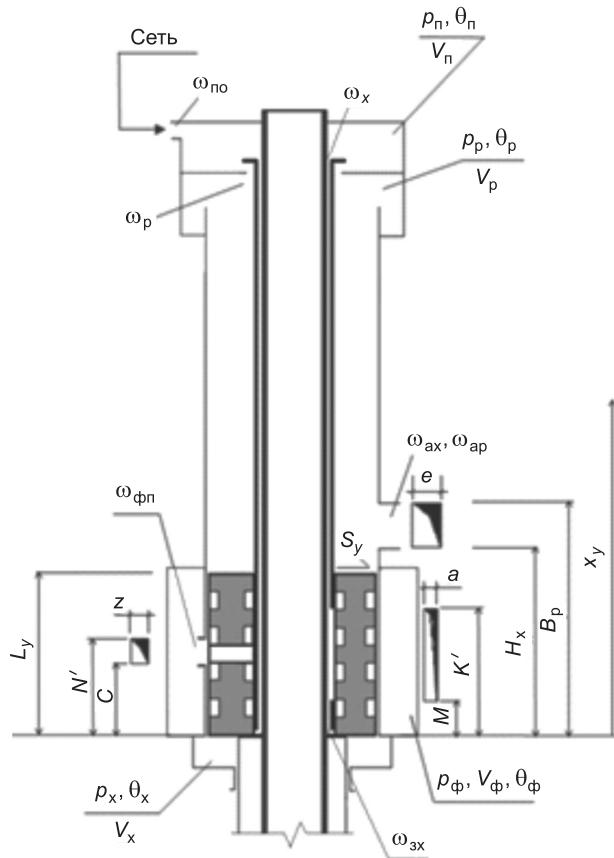


Рис. 4. Принципиальная схема ПУМ с камерой форсажа холостого хода и сквозной центральной трубкой

$$\left\{ \begin{array}{l} d\theta_p/dt = \theta_p [W(\omega_p \varphi_p \Omega_p - \omega_{ap} \varphi_{ap} \Omega_{ap} + \operatorname{sgn}(y_{x\phi} \psi_{x\phi} \Omega_{x\phi}) + \\ + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk} \Omega_{yk}) + \operatorname{sgn}(y_{yt} \psi_{yt} \Omega_{yt})) + \\ + (k-1) p_p (dx_y/dt) S_y] / [p_p (V_p - x_y S_y)], \\ d\theta_x/dt = \theta_x [W(\omega_x \varphi_x \Omega_x - \omega_{ax} \varphi_{ax} \Omega_{ax} + \omega_{x\phi} \varphi_{x\phi} \Omega_{x\phi} + \\ + \omega_{3x} \varphi_{3x} \Omega_{3x} + \operatorname{sgn}(y_{x\phi} \psi_{x\phi} \Omega_{x\phi}) + \operatorname{sgn}(\omega_{3x} \varphi_{3x} \Omega_{3x}) + \\ + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk} \Omega_{yk}) + \operatorname{sgn}(y_{yt} \psi_{yt} \Omega_{yt})) - \\ - (k-1) p_x (dx_y/dt) S_y] / [p_x (V_x + x_y S_y)], \\ d^2 x_y/dt^2 = [S_y (p_x - p_p) + \operatorname{sgn}(F_{yt} + F_{yk})] / m_y \quad \text{при } x_y \geq 0, \\ (dx_y/dt)_0 = -k_{uy} (dx_y/dt)_y \quad \text{при } x_y < 0, \\ d^2 x_k/dt^2 = [(S_y - S_u) (p_x - p_p) + \operatorname{sgn}(F_{yk} - F_h)] / m_k \quad \text{при } x_k \geq 0, \\ (dx_k/dt)_0 = -k_{uk} (dx_k/dt)_y \quad \text{при } x_k < 0, \\ d^2 x_t/dt^2 = [S_t (p_x - p_u) + \operatorname{sgn}(F_{yt})] / m_t \quad \text{при } x_t \geq 0, \\ (dx_t/dt)_0 = -k_{ut} (dx_t/dt)_y \quad \text{при } x_t < 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Обозначения в системе уравнений (1) имеют следующий физический смысл:

p_n, p_ϕ, p_p, p_x — давления воздуха в предкамере и камерах форсажа, рабочего и холостого хода;

V_n, V_ϕ, V_p, V_x — объемы предкамеры, камер форсажа, рабочего и холостого хода;

$\omega_{po}, \omega_p, \omega_x, \omega_{\phi p}, \omega_{x\phi}, \omega_{3x}$ — площади проходных сечений дросселей впуска в предкамеру и камеры рабочего и холостого хода из предкамеры в форсажную камеру и из нее в камеру холостого хода, а также канала запуска;

ω_{ap}, ω_{ax} — площади проходных сечений каналов на выпуске отработавшего воздуха из камер рабочего и холостого хода;

$\varphi_{po}, \varphi_{\phi p}, \varphi_p, \varphi_x, \varphi_{3x}$ — функции впуска воздуха в предкамеру, камеру форсажа и из нее в камеру холостого хода, в камеру рабочего и холостого хода и канал запуска;

$\Omega_{ap}, \Omega_x, \Omega_{ax}$ — функции расхода воздуха в зависимости от изменения температуры на выпуске в атмосферу из камер рабочего и холостого хода, камеры форсажа;

$\psi_{yk}, \psi_{yt}, \psi_{x\phi}$ — функции перетечек через кольцевой зазор между ударником и корпусом, ударником и трубкой при расположении ударника в камере рабочего и холостого хода при перекрытом ударником канале форсажа и открытом канале выпуска;

$\Omega_p, \Omega_x, \Omega_{x\phi}, \Omega_{3x}$ — функции расхода воздуха в зависимости от изменения температур со стороны камер рабочего и холостого хода и камеры форсажа и через канал форсажа;

$y_{yk}, y_{yt}, y_{x\phi}$ — площади проходных сечений каналов, на которых осуществляются перетечки;

$W = [2kR/(k-1)]^{1/2}$; R — газовая постоянная; k — показатель процесса;

$\theta_u, \theta_\phi, \theta_p, \theta_x$ — температура воздуха в предкамере и камере форсажа, рабочего и холостого хода;

k_{uy}, k_{uk}, k_{ut} — коэффициенты «отскока» ударника и корпуса от инструмента и трубы от корпуса;

F_{yt} , F_{yk} , F_h — силы трения ударника о трубку и корпус и сила нажатия на корпус;
 x_y , x_k , x_t — перемещение ударника, корпуса и трубы;
 S_y , S_i , S_t — площади диаметральных сечений ударника, инструмента и трубы;
 t — время;
 m_y , m_k , m_t — масса ударника, корпуса и трубы.

Для функций перетечек φ_{yk} , φ_{yt} , функций форсажа φ_ϕ , $\varphi_{x\phi}$, функций впуска φ_{po} , φ_{fp} , φ_{rp} , φ_{xp} и выпуска φ_{ap} , φ_{ax} , которые в зависимости подобны с заменой индексов «куда — откуда» i , j , баро- и термодинамические функции имеют вид

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} 0,5283 > \frac{p_i}{p_j} & p_j \sqrt{\theta_j} 0,2588, \\ & \frac{p_i}{p_j} \\ 0,5283 \leq \frac{p_i}{p_j} & p_j \sqrt{\theta_j} \sqrt{(p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(k+1)/k}}, \\ & \frac{p_i}{p_j} \\ 0,5283 > \frac{p_j}{p_i} & -p_i \sqrt{\theta_i} 0,2588, \\ & \frac{p_j}{p_i} \\ 0,5283 \leq \frac{p_j}{p_i} & -p_i \sqrt{\theta_i} \sqrt{(p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(k+1)/k}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\Psi_{ij} \equiv \varphi_{ij}. \quad (3)$$

Функции изменения показателя термодинамического процесса заменяются с Ω на Ω' при условиях изменения направления процесса на обратный:

для функций впуска Ω_{po} , Ω_{yt} , Ω_{yk} , Ω_{ap} , Ω_{ax} , $\Omega_{x\phi}$, Ω_{fp} , Ω_{rp} , Ω_{xp}

$$\Omega_{ij} = \begin{cases} \varphi_{ij} > 0 & k - (\theta_i / \theta_j), \\ \varphi_{ij} \leq 0 & k - 1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\Omega'_{ij} = \begin{cases} \varphi_{ji} \leq 0 & k - (\theta_j / \theta_i), \\ \varphi_{ji} > 0 & k - 1; \end{cases} \quad (5)$$

для функций координат каналов выпуска, форсажа и щели на трубке

$$\omega_{ap} = \begin{cases} (x_y + L_y) > B_p, & 0, \\ B_p \geq (x_y + L_y) > H_x, & (B_p - (x_y + L_y))e, \\ (x_y + L_y) \leq H_x, & (B_p - H_x)e; \end{cases} \quad (6)$$

$$\omega_{ax} = \begin{cases} x_y < H_x, & 0, \\ H_x \leq x_y < B_p, & (x_y - H_x)e, \\ x_y \geq B_p, & (B_p - H_x)e; \end{cases} \quad (7)$$

$$y_{x\phi} = \begin{cases} x_y < C, & 0, \\ C \leq x_y < N', & (x_y - C)z, \\ x_y \geq N', & (N' - C)z; \end{cases} \quad (8)$$

$$y_{\text{щ}} = \begin{cases} x_y < M, & 0, \\ M \leq x_y < K', & (x_y - M)a, \\ x_y \geq K', & (K' - M)a. \end{cases} \quad (9)$$

Способы соединения секций трубопровода. Практика отмечает несколько способов крепления секций трубопровода друг к другу.

Крепление при помощи сварки торцов секций нового трубопровода встык. Основным преимуществом стыковой сварки является то, что полученное соединение по прочности не уступает самой трубе в отличие от металлических труб. В качестве ограничивающего фактора выступает отрицательная температура воздуха, при которой сварку полиэтилена не проводят. Обычно для сварки используется приспособление, которое включает в себя четыре хомута для крепления и точной центровки трубы (по два захвата на трубу), два из них расположены на подвижной платформе и два на неподвижной. Привод подвижной платформы ручной или гидравлический. Перед началом сварки соединяемые патрубки осматривают и контролируют геометрические размеры (диаметр, толщину стенок и овальность трубы), после осмотра патрубки центруют, закрепляя их при помощи хомутов. Для обеспечения качества сварки необходимо плотное прилегание торцов патрубков друг к другу, это реализуется при помощи устройства, которое имеет название «торцеватель». Для производства сварки вместо ножа устанавливают круглый нагревательный элемент, изготовленный из фторопласта, к которому прижимают трубы, материал патрубков расплавляется на 1...2 мм, после чего нагревательный элемент извлекают, а торцы патрубков прижимают друг к другу. Свариваемые элементы остаются под осевой нагрузкой до температуры 30...40 °C. Внешний вид сварочного аппарата представлен на рис. 5.

Крепление новых патрубков при помощи резьбы. Для предотвращения развинчивания от вибрации резьба оснащается специальным замком.

При замене стальных трубопроводов целесообразно колпак-резец выполнить с одним ножом, направленным вертикально вниз. В этом случае стенки старой трубы, раздвинутые расширителем, образуют кожух, который защитит секции нового трубопровода от нежелательного трения об осыпающийся грунт (рис. 6).

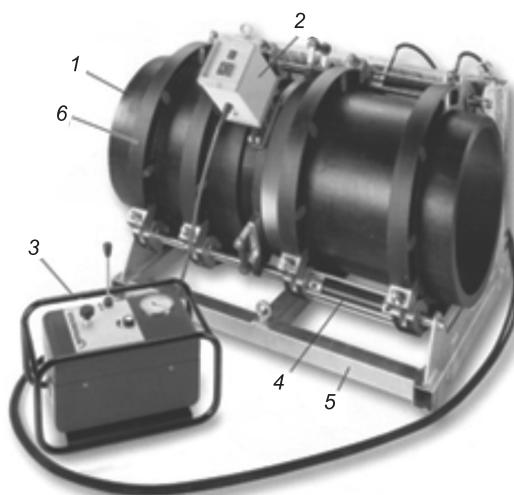


Рис. 5. Аппарат для стыковой сварки труб
1 — свариваемые трубы; 2 — блок управления нагревательным элементом; 3 — пульт управления и контроля;
4 — устройства для прижимания торцов трубы; 5 — рама аппарата; 6 — устройство для фиксации труб

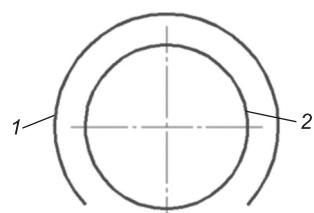


Рис. 6. Старая труба (1) и секции новой трубы (2)

Выводы. Преимущества бестраншейных методов проведения работ заключаются в следующем:

- 1) бестраншная технология характеризуется высоким уровнем механизации;
- 2) при замене «старых» труб имеется возможность работы из колодца в колодец (без проведения земляных работ и нарушения благоустройства территории);
- 3) возможность использования одного комплекта оборудования для ведения работ в широком диапазоне диаметров заменяемых трубопроводов;
- 4) мобильность энергоснабжения (использование передвижного компрессора);
- 5) достаточная точность проходки;
- 6) применение пневматического ударного механизма со сквозной центральной трубкой позволяет проводить замену трубопровода на действующем участке сети без его отключения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбаков, А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика) : технический учебник-справочник [Текст] / А.П. Рыбаков. — М. : ПрессБюро № 1, 2005. — 304 с.
2. ГОСТ ИСО 161-1-2004. Трубы из термопластов для транспортирования жидких и газовых сред. Введ. 26.05.2004. — М. : Изд-во стандартов, 2004. — 8 с.
3. СП 40-107-2003. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем внутренней канализации из полипропиленовых труб. Введ. 01.05.2003. — М. : Изд-во стандартов, 2003. — 34 с.
4. А.с. 247179 СССР МКП Е21с, В25д. Пневматический молоток / Н.А. Клужин, Э.А. Абраменков, Д.Г. Суворов, Б.М. Бирюков. Заявитель ИГД СО АН СССР. — № 1076493/22-3. Заявл. 18.05.1966, опубл. 04.08.1969. Бюл. № 22.
5. Пат. 2393316 РФ, МКП Е21В 1/30; Е02F 5/18. Пневматическое ударное устройство для образования скважин в грунте / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.А. Батищев, Н.А. Дьячков, А.А. Кутумов, Ю.Э. Малышева, О.В. Ткаченко. Заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. арх.-строит. ун-т. — 2008143780/03. Заявл. 05.11.2008, опубл. 27.06.10. Бюл. № 18.

ДЕДОВ А.С., ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

МЕЛЬНИКОВА А.С., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ПОПОВ Н.А., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ТКАЧЕНКО О.В., студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 21.12.11

Dedov A.S., senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Melnikova A.S., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Popov N.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Tkachenko O.V., student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov D.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

TECHNOLOGY TRENCHLESS REPLACEMENT PIPE DRAINAGE

The methods and equipment for trenchless pipe replacement for various purposes.

Key words: trenchless replacement, pneumatic hammer mechanism, boost idling, center pass-through tube.

REFERENCES

1. Rybakov, A.P. Fundamentals of Trenchless Technology (Theory & Practice) : A Technical Reference Manual [Text] / A.P. Rybakov. — M. : PressByuro N 1, 2005. — 304 p.
2. Standard ISO 161-1-2004. Thermoplastic Pipe to Transport Liquid and Gaseous Media. — Introduced. 26.05.2004. — M. : Publ. Standards, 2004. — 8 p.
3. SP 40-107-2003. Design, Installation and Operation of Domestic Sewage From the Polypropylene Tubes. — Introduced. 01.05.2003. — M. : Publ. Standards, 2003. — 34 p.
4. A.s. 247179 Soviet INC E 21s, B25d. Pneumatic Hammer / N.A. Klushin, E.A. Abramenkov, D.G. Suvorov, B.M. Biryukov. The applicant IGD CO USSR. — N 1076493/22-3. appl, 18.05.1966, publ. 04.08.1969. Bull. N 22.
5. Pat. 2393316 RF, INC E21V 1/30; E02F 5/18. Pneumatic Impact Device for the Formation of Holes in the Ground / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, A.A. Batishchev, N.A. Djachkov, A.A. Kutumov, Yu.E. Malysheva, O.V. Tkachenko. The applicant and the patentee Novosibirsk State Architectural-Building Univ. — 2008143780/03. appl. 05.11.2008, publ. 27.06.10. Bull. N 18.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.137.2

А.М. БЕРЕГОВОЙ, В.А. БЕРЕГОВОЙ,
А.В. МАЛЬЦЕВ, М.А. ПЕТРЯНИНА

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ ВЛАГИ

Дана приближенная оценка тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции с учетом различной влажности материала и в условиях промерзания наружного слоя при стационарной теплопередаче.

Ключевые слова: влажность материала, промерзание ограждения, стационарная теплопередача, теплопотери через конструкцию.

При проведении теплотехнического проектирования наружных ограждающих конструкций, составлении энергетического паспорта зданий теплопроводность материала обычно определяют по условиям эксплуатации А или Б [1, 2]. Эти условия, связанные только с влажностным режимом помещений и зоной влажности территории строительства, устанавливаются раз и навсегда на весь длительный период эксплуатации здания. Они не учитывают зависимость коэффициента теплопроводности от влажностного состояния материала и от фазовых превращений влаги в его капиллярно-пористой структуре при периодических воздействиях потоков тепла и влаги. В осенний сезон года наружный слой стен может сильно увлажняться косыми дождями и оставаться в стабильно влажном состоянии вплоть до очередного летнего периода естественной сушки конструкций.

К переувлажнению материала ограждающих конструкций приводят ошибки на этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий. При проектировании защиты от переувлажнения ограждений в соответствии с требованиями тех же норм могут быть недостаточно учтены условия эксплуатации (промерзание наружного слоя конструкций, капиллярный подсос грунтовой влаги, климатические факторы района строительства). В процессе строительства здания часто отмечаются дефекты по устройству системы наружного водоотвода с крыш, пароизоляционного слоя или горизонтальной гидроизоляции наружных стен, герметичности стыковых соединений их элементов. При эксплуатации здания нарушаются сроки ремонта элементов и конструктивных слоев, влияющих на влажностное состояние наружных ограждений (карнизные свесы, водоотводящие трубы, слои кровли, подоконные фартуки, цоколи, отмостка).

С наступлением периода низких температур наружный слой увлажненных конструкций ограждений подвергается промерзанию на определенную толщину δ_3 , которая меняется во времени. Процессы теплообмена в таких конструкциях связаны с фазовыми превращениями влаги (льдообразованием, таянием, испарением, конденсацией). Это вызывает

заметные изменения теплофизических показателей материалов, теплово-го баланса в ограждении, постепенное снижение прочностных характеристик конструкции.

В таблице показаны три характерные конструктивные схемы однослойной стены. На второй схеме в отличие от первой имеются экран на откосе в виде сайдинга и вентилируемая воздушная прослойка, оказывающая осушающий эффект на материал конструкции и обеспечивающая влажностное состояние материала в пределах нормативных требований. Третья схема дополнена наружным теплоизоляционным слоем, который по требованиям тех же норм устраивается для всех вновь возводимых стен, приведенное сопротивление теплопередаче которых оказывается ниже требуемой величины.

Характеристика рассмотренных конструктивных схем наружных ограждений

Конструктивные схемы наружных ограждений		
1	2	3
 17.1 cm 64 cm	 64 cm	 10 cm 64 cm
Коэффициенты теплопроводности материала λ_b , Вт/(м · °C)		
Кирпичная кладка $\lambda_b = 0,94$	Кирпичная кладка $\lambda_b = 0,7$	Кирпичная кладка $\lambda_b = 0,7$ Пенополиэтилен $\lambda_b = 0,041$

Линии распределения температуры по толщине ограждений показывают, что наружный слой теплоизоляции (схема 3) позволяет удерживать основной массив стены в зоне положительных температур. Однако влага, содержащаяся в капиллярах и порах конструкции по схемам 1 и 2, может подвергаться замерзанию при достаточно длительном воздействии низких температур до границы, где линия температуры опускается ниже нуля.

Тепло- и массоперенос в однослойном наружном ограждении при отрицательной температуре и при отсутствии фильтрационного движения описывается дифференциальным уравнением [3]

$$c \cdot \gamma_0 \frac{\partial t}{\partial z} = \operatorname{div}(\lambda \nabla t) + \frac{\xi_{\text{л}}}{1 - \xi_{\text{л}}} r \gamma_0 \frac{\partial u_{\text{ж}}}{\partial z}, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость материала;

γ_0 — плотность материала в сухом состоянии;

λ — коэффициент теплопроводности материала;

r — тепло льдообразования;

u — массовое содержание незамерзшей воды;

удельное массосодержание $u = u_{\text{ж}} + u_{\text{л}}$ (сравнительное массосодержание водяного пара пренебрежимо мало);

$\xi_{\text{л}}$ — коэффициент льдистости $\xi_{\text{л}} = \frac{u_{\text{л}}}{u_{\text{л}} + u_{\text{ж}}}$ ($u_{\text{л}}$, $u_{\text{ж}}$ — массовое содержание соответственно льда и воды).

Коэффициент $\xi_{\text{л}}$ практически не зависит от влагосодержания материала ограждения и является однозначной функцией температуры $\xi_{\text{л}} = f(t)$ [3].

Уравнение (2), в котором потенциалом переноса пара является градиент температуры ∇t , а влаги — градиент влагосодержания $\nabla u_{\text{ж}}$, справедливо при любых температурах тела:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \operatorname{div}(a_m \nabla u_{\text{ж}} + a_m \delta \nabla t), \quad (2)$$

где a_m — коэффициент потенциалопроводности суммарного переноса пара и жидкости; δ — суммарный термоградиентный коэффициент,

$$\delta = \frac{a_{m\text{п}} \delta_{\text{п}} + a_{m\text{ж}} \delta_{\text{ж}}}{a_m}.$$

При $\xi_{\text{л}} = 1$, т.е. когда вся вода в наружном слое ограждения превращается в лед:

$$\frac{\partial u_{\text{л}}}{\partial z} = \operatorname{div}(a_{m\text{п}} \delta_{\text{п}} \nabla t), \quad (3)$$

где $a_{m\text{п}}$ — коэффициент потенциалопроводности переноса пара; $\delta_{\text{п}}$ — термоградиентный коэффициент переноса пара.

Решение практических задач о теплопередаче с учетом фазовых превращений влаги и скорости их прохождения по толщине наружного ограждения в реальных (нестационарных) условиях эксплуатации с использованием уравнений (1)–(3) представляет известные математические трудности. Воспользуемся более простой моделью, учитывающей только промерзание увлажненного материала и позволяющей оценить величину тепловых потерь через такое ограждение. При этом примем следующие допущения:

1. С наступлением долговременного периода сильного похолодания температура на наружной поверхности ограждения понизилась до постоянной отрицательной величины $t_{\text{н}} = \text{const}$.

2. В толще ограждения на подвижной границе промерзания сохраняется температура начала промерзания влаги t_3 .

3. В мерзлой и во влажной зонах ограждения температура изменяется по линейному закону.

В соответствии с уравнением теплового баланса на границе промерзания конструкции [4] в капиллярах и порах материала выделяется тепло льдообразования:

$$riu_{\text{ж}} \gamma_0 \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} - \lambda_{\text{в}} \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial x}, \quad (4)$$

где λ_3 , $\lambda_{\text{в}}$, t_3 , $t_{\text{в}}$ — соответственно коэффициенты теплопроводности материала и его температура в мерзлой и влажной зонах наружного ограждения;

$u_{\text{ж}}$ — влажность материала;

i — доля замерзающей влаги;

γ_0 — плотность материала в сухом состоянии.

Для продолжительного и медленного характера изменения низких температур скорость продвижения границы промерзания $\frac{\partial \delta_3}{\partial z} \rightarrow 0$, а величина r пренебрежимо мала. Тогда уравнение (4) теплового баланса на границе мерзлой и влажной зон можно представить исходя из условий стационарной теплопередачи:

$$\lambda_{3^*} \frac{t_3 - t_{\text{н}}}{\delta_3} - \lambda_{\text{в}} \frac{t_{\text{в}} - t_3}{\delta - \delta_3} = 0, \quad (5)$$

где t_3 — температура начала замерзания влаги, $^{\circ}\text{C}$; δ_3 — глубина промерзшей зоны ограждения, м.

Как известно, в конструкциях наружных ограждений с капиллярно-пористой структурой материала температура начала замерзания основной массы свободной влаги колеблется в диапазоне $-1\dots-3$ $^{\circ}\text{C}$. В рассматриваемой модели принята максимально возможная величина δ_3 , достигающая границы нулевого значения температуры на линии ее распределения (таблица). Значение коэффициента теплопроводности материала влажной зоны $\lambda_{\text{в}}$ в уравнении (5) может быть найдено по известной зависимости

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{с}} \left(1 + \omega_0 \frac{\delta_{\omega}}{100} \right), \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ — коэффициент теплопроводности сухого материала; ω_0 — влажность материала, % по объему; δ_{ω} — прирост коэффициента теплопроводности на 1 % объемной влажности материала.

Величина δ_{ω} зависит от вида капиллярно-пористого материала, его плотности и трудно поддается систематизации для получения общей зависимости теплопроводности материала от его влажности. Поэтому более точное значение коэффициента $\lambda_{\text{в}}$ на стадии проектирования и эксплуатации здания целесообразно принимать по результатам экспериментального исследования зависимости $\lambda_{\text{в}} = f(\omega_0)$ для материала, применяемого в проекте или использованного в построенном здании.

Рассмотрим три влажностных состояния в течение отопительного периода года, в которых может находиться при долговременной эксплуатации материал наружного ограждения:

- 1) стабильное состояние сорбционной влажности;
- 2) предельно допустимое ее значение $\omega_{\text{пр}}^{\text{сорб}}$ за счет увеличения сорбционной влажности к концу отопительного периода;
- 3) сверхсорбционная влажность материала при воздействии капельно-жидкой влаги.

Для ограждений по схемам 2 и 3 характерно первое из перечисленных влажностных состояний, поскольку вентилируемая прослойка обеспечивает удаление из стены излишней парообразной влаги, диффундирующей из помещения к наружной поверхности конструкции, а экран (сайдинг) защищает последнюю от проникновения снаружи капельно-жидкой влаги.

Приближенная оценка величины тепловых потерь через каждую из упомянутых конструкций наружных ограждений рассмотрена на следующем примере:

— в качестве основной стены кладка из глиняного обыкновенного кирпича толщиной $\delta = 0,64$ м (без учета внутреннего слоя штукатурки);

— для конструкции по схеме 3 наружный слой теплоизоляции из пенополистирола $\gamma = 100 \text{ кг/m}^3$ толщиной 0,1 м.

Примем:

— максимально возможную глубину зоны промерзания стены по 1-й и 2-й схемам $\delta_3 = 0,37 \text{ м}$ (в таблице эта зона заштрихована);

— температуру $t_3 = -2 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_h = -25 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

— коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждения соответственно 8,7 и 23 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})$.

Для определения величины влажности и коэффициента теплопроводности материала влажной зоны конструкции по схеме 1 примем второе влажностное состояние материала. Тогда $\omega_{\text{пп}}^{\text{сопр}} = 1,5 \%$ [1], а $\lambda_b = 0,94$ (по экспериментальным данным [4]).

Для конструкций по схемам 2 и 3 при первом влажностном состоянии материала может быть выбрано одно из двух рекомендуемых нормами условий эксплуатации — А или Б. Учитывая наличие вентилируемой прослойки под экраном, принимаем условие А. Тогда для кирпичной кладки $\lambda_b = 0,7$, а для пенополистирола $\lambda_b = 0,041$ [2].

Из уравнения (5) найдем коэффициент теплопроводности материала в зоне промерзания конструкции.

Для конструкции по схеме 1

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_b(t_b - t_3)\delta_3}{(t_3 - t_h)(\delta - \delta_3)} = 7,65 / 6,21 = 1,23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot {}^\circ\text{C}),$$

для конструкции по схеме 2

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_b(t_b - t_3)\delta_3}{(t_3 - t_h)(\delta - \delta_3)} = 6,59 / 6,21 = 1,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot {}^\circ\text{C}).$$

Особенность принятой физико-математической модели состоит в том, что мерзлую и влажную зоны наружного ограждения можно рассматривать как отдельные слои, каждый из которых имеет определенное термическое сопротивление R . В этом случае для конструкций ограждений по схеме 1 общее сопротивление теплопередаче R_0 , а также сопротивления теплопередаче промерзшей R_3 и влажной R_b зон найдутся из уравнений

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + R_3 + R_b + \frac{1}{\alpha_h},$$

$$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 0,37 / 1,23 = 0,3 (\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})/\text{Вт},$$

$$R_b = \frac{\delta - \delta_3}{\lambda_b} = 0,27 / 0,94 = 0,29 (\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})/\text{Вт},$$

$$R_0 = 1 / 8,7 + 0,3 + 0,29 + 1 / 23 = 0,75 (\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})/\text{Вт}.$$

Определим величину тепловых потерь через 1 м^2 данной конструкции при максимальной глубине зоны промерзания:

$$Q = (t_b - t_h)/R_0 = 45 / 0,75 = 60 \text{ Вт}.$$

Для конструкции по схеме 2

$$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 0,37 / 1,06 = 0,35 (\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})/\text{Вт},$$

$$R_B = 0,27 / 0,7 = 0,39 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт},$$

$$R_0 = 0,115 + 0,35 + 0,39 + 0,04 = 0,9,$$

$$Q = (t_B - t_H) / R_0 = 45 / 0,9 = 50 \text{ Вт.}$$

Для конструкции по схеме 3, в которой отсутствует слой промерзания:

$$R_0 = 1 / 8,7 + 0,64 / 0,7 + 0,1 / 0,041 + 1 / 23 = 3,51 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт},$$

$$Q = 45 / 3,51 = 12,8 \text{ Вт.}$$

Если не учитывать промерзание наружного ограждения по схемам 1 и 2, то при тех же заданных условиях получим:
для схемы 1

$$R_0 = 1 / 8,7 + 0,64 / 0,94 + 1 / 23 = 0,84 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт},$$

$$Q = 45 / 0,84 = 53,6 \text{ Вт};$$

для схемы 2

$$R_0 = 1 / 8,7 + 0,64 / 0,7 + 1 / 23 = 1,07 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт},$$

$$Q = 45 / 1,07 = 42,1 \text{ Вт},$$

т.е. отмечается занижение тепловых потерь через эти конструкции соответственно на 10,6 и 15,8 %.

Если для конструкции по схеме 1 принять величину влажности материала исходя из условия Б, а не из условия сверхсорбционного увлажнения, то имеем

$$R_0 = 1 / 8,7 + 0,64 / 0,81 + 1 / 23 = 0,95 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт},$$

$$Q = 45 / 0,95 = 47,37 \text{ Вт},$$

т.е. величина занижения тепловых потерь составит уже не 10,6, а 21,1 %.

Согласно принятым допущениям меньшая глубина промерзания δ_3 наружного ограждения будет наблюдаться при более высокой температуре наружного воздуха t_H . Например, при $t_H = -10 \text{ °C}$ для конструкции по схеме 1 величина δ_3 составит 0,17 м (см. среднюю линию распределения температуры в таблице). Область применения рассмотренной расчетной модели, значительно упрощающей реальный механизм тепло- и массопереноса, ограничивается стационарными условиями теплопередачи. Для нестационарных условий на движущейся границе промерзания из-за тепловой инерции конструкции будет отмечаться точка перелома линий распределения температуры при допущении, что температура во влажной и мерзлой зонах изменяется по линейному закону.

Таким образом, результаты расчета при принятых допущениях показывают, что с учетом сверхсорбционного увлажнения и промерзания наружного ограждения его сопротивление теплопередаче оказывается заметно ниже, а теплопотери выше значений, получаемых для конструкции по общепринятой методике расчета.

В нормативных требованиях, изложенных в [1, 2], не рассматривается влияние на теплопроводность материала как сверхсорбционного состояния влажности (за исключением случаев воздействия высокоактивных в гигроскопическом отношении аэрозолей), так и промерзания ограждающей конструкции — параметров, изменяющих ее теплофизические показатели и тепловую эффективность. По этой причине приведенный коэффициент теплопередачи через наружные ограждающие конструкции и удельная величина тепловой энергии на отопление здания, непосредст-

венно определяющая класс энергетической эффективности эксплуатируемого здания, могут получить заведомо заниженное значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст] / Госстрой России. — М. : ФГУП ЦПП, 2004.
2. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст] / Госстрой России. — М. : ФГУП ЦПП, 2004.
3. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики [Текст] / А.В. Лыков. — Минск : АН БССР, 1961. — 520 с.
4. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. — М. : Высш. шк., 1982. — 415 с.

БЕРЕГОВОЙ Александр Маркович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: ambereg@Rambler.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

БЕРЕГОВОЙ Виталий Александрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vabereg@Rambler.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

МАЛЬЦЕВ Алексей Викторович, асп.; E-mail: gsia@pguas.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ПЕТРЯНИНА Мария Александровна, асп.; E-mail: fretop@jandex.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 11.10.11

Beregovoi A.M., doctor of technical sciences, professor; E-mail: ambereg@Rambler.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Beregovoi V.A., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vabereg@Rambler.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Maltsev A.V., post-graduate student; E-mail: gsia@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Petryanina M.A., post-graduate student; E-mail: fretop@jandex.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

THERMAL EFFICIENCY OF THE EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES UNDER WATER UNDERGOING PHASE CHANGE

Approximate evaluation of heat loss through external enclosure structures as steady-state heat transfer is given under various humidity of material and under conditions of freezing of outside layers.

Key words: humidity of material, freezing of enclosure structure, steady-state heat transfer, heat loss through enclosure structure.

REFERENCES

1. SNiP 23-02-2003. Thermal Performance of the Buildings [Text] / Gosstroy of Russia. — М. : FGUP SPP, 2004.
2. SP 23-101-2004. Designing of Thermal Performance of the Buildings [Text] / Gosstroy of Russia. — М. : FGUP SPP, 2004.
3. Lykov, A.V. Theoretical Foundation of Building Thermophysics [Text] / A.V. Lykov. — Minsk : AN BSSR, 1961. — 520 p.
4. Bogoslovsky, V.N. Building Thermophysics [Text] / V.N. Bogoslovsky. — М. : Vysshaya Shcola, 1982. — 415 p.

УДК 628.882/.889:697.87

О.Д. САМАРИН, Ю.Д. ФЕДОРЧЕНКО

ПОСТРОЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ПОМЕЩЕНИЯ

Рассмотрены процессы автоматического управления микроклиматом помещения с учетом особенностей нестационарной теплопередачи и теплоаккумуляции в ограждениях. Предложена параметрическая идентификационная модель процессов управления, использующая данные численного эксперимента.

Ключевые слова: микроклимат, передаточная функция, теплоустойчивость, закон регулирования, идентификационная модель.

В работе [1] при рассмотрении переходных процессов, происходящих при автоматическом регулировании систем обеспечения микроклимата помещения, показано, что последнее может быть представлено в контуре регулирования как два параллельно соединенных звена. Одно из них является линейным инерционным и учитывает процессы теплообмена на поверхностях, обращенных в помещение, а также аккумуляцию теплоты в объеме внутреннего и вентиляционного воздуха. Другое оказывается линейным полуинтегрирующим, т.е. его передаточная функция выглядит как $K/p^{3/2}$, и его наличие связано с характером распространения теплоты в массиве ограждающих конструкций, скорость которого обратно пропорциональна $\sqrt{\tau}$, где τ — время с момента теплового возмущения, с. [2]. Такая модель в принципе позволяет получить эквивалентную передаточную функцию системы и выражение для требуемого коэффициента передачи пропорциональной составляющей регулятора $K_{\text{рег}}$, который в данном случае имеет размерность Вт/К и показывает, насколько должен изменяться компенсирующий тепловой поток $Q_{\text{рег}}$, Вт, за счет работы системы обеспечения микроклимата при отклонении температуры воздуха в помещении t_b , °С, от уставки на 1 К.

В то же время в рассматриваемой публикации не учитывается должным образом то обстоятельство, что в реальных условиях далеко не все ограждения являются с теплотехнической точки зрения массивными. На самом деле некоторые конструкции, например окна и двери, изначально оказываются практически безынерционными, а другие, в частности внутренние перегородки и перекрытия, приходится считать таковыми, начиная с момента, когда температурная волна захватит их на всю толщину. При попытке аналитического учета таких особенностей получаются достаточно сложные выражения, которые весьма трудно преобразовать к интересующему нас инженерному виду. Поэтому в работе [3] была предпринята попытка получить общий вид динамической характеристики помещения, а значит, и форму его передаточной функции с помощью численного эксперимента. При этом использовалась математическая модель процессов в исследуемой системе, включающая дифференциальные и алгебраические уравнения нестационарного теплопереноса и теплопереда-

чи в ограждениях и теплообмена на их поверхностях, которые решались конечно-разностными методами по специально разработанной программе для ЭВМ.

В результате таких расчетов установлено, что помещение в целом может быть описано как линейное частично интегрирующее звено с передаточной функцией следующего вида:

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

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

Известно, что передаточная функция регулятора в самом общем случае может быть записана в форме (2) [2]:

$$W_{\text{пер}} = K_{\text{пер}} \left(1 + \frac{1}{pT_{\text{д}}} + pT_{\text{и}} \right), \quad (2)$$

где $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{д}}$ — соответственно время интегрирования (изодрома) и дифференцирования (предварения) для И- и Д-составляющих регулятора, с. Отсюда [2]

$$W_{\text{общ}} = \frac{W_{\text{пом}}}{1 + W_{\text{пом}} W_{\text{пер}}} \approx \frac{0,9K_{\text{пом}}}{(pT_{\text{пом}})^{2/3} + 0,9K_{\text{пом}} K_{\text{пер}} \left(1 + \frac{1}{pT_{\text{и}}} + pT_{\text{д}} \right)}. \quad (3)$$

Так как $\tau \approx 1/p$ [1], с использованием определения функции $W_{\text{общ}}$ получаем приближенное соотношение для изменения $t_{\text{в}}$ с течением времени в зависимости от характеристик помещения, системы обеспечения его микроклимата и ее регулятора:

$$\frac{\Delta t_{\text{в}}}{Q_{\text{возм}}} \approx \frac{0,9K_{\text{пом}}}{\left(\frac{T_{\text{пом}}}{\tau} \right)^{2/3} + 0,9K_{\text{пом}} K_{\text{пер}} \left(1 + \frac{\tau}{T_{\text{и}}} + \frac{T_{\text{д}}}{\tau} \right)}, \quad (4)$$

откуда окончательно получаем

$$K_{\text{пер}} \approx \frac{\frac{Q_{\text{возм}}}{\Delta t_{\text{в}}} - \frac{(T_{\text{пом}} / \tau)^{2/3}}{0,9K_{\text{пом}}}}{1 + \frac{\tau}{T_{\text{и}}} + \frac{T_{\text{д}}}{\tau}}. \quad (5)$$

Здесь $\Delta t_{\text{в}}$ представляет собой максимально возможное по условиям комфорта отклонение величины $t_{\text{в}}$ от уставки $t_{\text{в},0}$, т.е. допустимую динамическую ошибку регулирования, К. Символ τ здесь имеет смысл расчетного времени регулирования, с, т.е. промежутка времени с момента возникновения теплового возмущения, в течение которого температура $t_{\text{в}}$ должна поддерживаться в допустимом диапазоне $t_{\text{в},0} \pm \Delta t_{\text{в}}$.

В простейшем частном случае, когда используется П-закон регулирования, являющийся оптимальным для большинства помещений с точки

зрения минимизации $K_{\text{пер}}$ и максимального упрощения необходимых технических средств автоматизации [4], выражение (5) приводится к следующему виду:

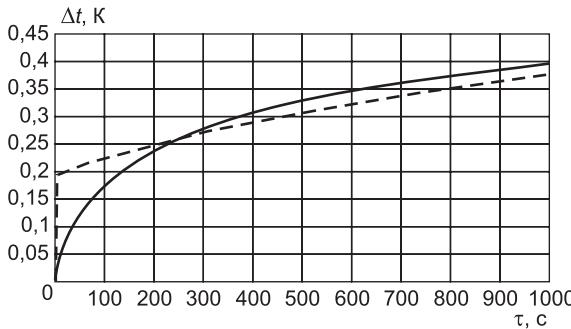
$$K_{\text{пер}} \approx \frac{Q_{\text{возм}}}{\Delta t_{\text{в}}} - \frac{(T_{\text{пом}} / \tau)^{2/3}}{0,9 K_{\text{пом}}}, \quad (6)$$

откуда следует, что двух параметров $K_{\text{пом}}$ и $T_{\text{пом}}$ достаточно для построения модели. При этом требуемое значение $K_{\text{пер}}$ оказывается тем больше, чем выше величина $K_{\text{пом}}$. Это несложно объяснить, поскольку 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. Следовательно, рост $K_{\text{пом}}$ означает снижение собственной теплоустойчивости помещения, а значит, и увеличение потребности во внешнем регулирующем воздействии. Таким же образом влияет на $K_{\text{пер}}$ и расширение расчетного интервала времени τ , поскольку поддержание необходимых метеорологических параметров в течение все более длительного срока также заставляет усиливать работу регулятора. Одновременно повышение $T_{\text{пом}}$ приводит к обратному эффекту, а именно к снижению $K_{\text{пер}}$, опять-таки из-за того, что $T_{\text{пом}}$ тоже определяет собственную теплоустойчивость, но в отношении не интенсивности, а скорости изменения $t_{\text{в}}$. Поэтому чем больше $T_{\text{пом}}$, тем медленнее реагирует помещение на скачок теплопоступлений, так что потребность в искусственном регулировании температуры ослабевает.

Заметим, что при некоторых значениях используемых параметров формула (6) может дать отрицательное значение $K_{\text{пер}}$. Физически это означает, что собственной теплоустойчивости помещения достаточно для

поддержания $t_{\text{в}}$ за время τ в требуемом диапазоне и тогда можно принять $K_{\text{пер}} = 0$.

О достоверности получаемых соотношений можно судить на основании следующего примера. На рис. 1 показано сопоставление результатов вычисления величины $\Delta t_{\text{в}}$ зависимости от времени для некоторого характерного помещения. При этом для наглядности был принят



Зависимость $\Delta t_{\text{в}}$ от τ для помещения-представителя

простейший П-закон регулирования. Сплошная линия соответствует формуле (4), пунктирная — расчету по численной модели.

Легко видеть, что выражение (4) в целом достаточно точно отражает ожидаемый характер изменения температуры при скачкообразном тепловом воздействии для помещения, обслуживаемого регулируемой системой вентиляции или кондиционирования воздуха. Во всяком случае, при $\tau > 200$ с расхождение не превышает 10 % с тенденцией к постепенному снижению. Это заведомо лежит в пределах точности инженерных расчетов и погрешности аппроксимации численных методов. Фактическая величина параметров, используемых в (4), при этом подбирается исходя из наилучшего совпадения двух кривых и составляет в данном случае $K_{\text{пом}} = 0,1 \text{ К/Вт}$ и $T_{\text{пом}} = 10 \text{ с}$. Значительное рассогласование между двумя кривыми для малых τ объясняется особенностями применяемой конеч-

но-разностной схемы и в дальнейшем достаточно быстро устраняется, поэтому данное обстоятельство можно не принимать во внимание.

Поскольку значения $K_{\text{пом}}$ и $T_{\text{пом}}$ определяются фактически по данным эксперимента (численного или даже натурного), что компенсирует приближенность предположений, находящихся в основе вывода выражений (1) и (4), построенная модель носит идентификационный характер. Однако это не является препятствием для ее применения, поскольку получение указанных параметров можно представить как первый этап создания такой модели для конкретного помещения или здания с использованием соответствующих технических средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин, О.Д. О совершенствовании расчета процессов автоматического регулирования систем обеспечения микроклимата [Текст] / О.Д. Самарин, К.М. Мжачих // Вест. МГСУ. — 2009. — № 2. Спецвыпуск. — С. 493–500.
2. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / Под ред. В.Н. Богословского [Текст] — М. : Стройиздат, 1986. — 479 с.
3. Самарин, О.Д. О скорости остывания помещения при отключении теплоснабжения [Текст] / О.Д. Самарин // Кровля и изоляция. — 2011. — № 1. — С. 61–62.
4. Самарин, О.Д. Влияние регулирования систем обеспечения микроклимата на качество поддержания внутренних метеопараметров [Текст] / О.Д. Самарин, Ю.Д. Федорченко // Вест. МГСУ. — 2011. — № 7. — С. 124–128.

САМАРИН О.Д., канд. техн. наук, доц.

Московский государственный строительный университет

ФЕДОРЧЕНКО Ю.Д., асп.

Московский государственный строительный университет

Получено 05.12.11

Samarin O.D., candidate of technical sciences, assistant professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Fedorchenko Yu.D., post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ON DESIGN OF IDENTIFICATION MODEL OF CONTROL PROCESSES OF ROOM MICROCLIMATE

The processes of automatic control of room microclimate in view of features of non-steady heat transfer and heat accumulation in enclosures are considered. The parametric identification model of control processes using numerical experiment data is offered.

Key words: microclimate, transfer function, thermal stability, control algorithm, identification model.

REFERENCES

1. Samarin, O.D. On improvement of calculation of automatic control processes of HVAC systems [Text] / O.D. Samarin, K.M. Mzhachikh // News of MSUCE. — 2009. — N 2. Special Issue. — P. 493–500.
2. Automation and Automatic Equipment of Heat and Gas Supply and Ventilation Systems / Ed. V.N. Bogoslovsky [Text] — M. : Stroyizdat, 1986. — 479 p.
3. Самарин, О.Д. On rate of cooling down of a room during failure of heat supply system [Text] / О.Д. Самарин // Roof and Insulation. — 2011. — N 1. — P. 61–62.
4. Самарин, О.Д. The influence of HVAC systems control on the standard of maintenance of internal microclimate parameters [Text] / О.Д. Самарин, Ю.Д. Федорченко // News of MSUCE. — 2011. — N 7. — P. 124–128.

УДК 697.328.001.24

В.П. ШАЦКИЙ, В.А. ГУЛЕВСКИЙ

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Рассматривается моделирование процессов теплообмена в рекуперативных пластинчатых теплообменниках, основанное на итерационном алгоритме решения системы конечно-разностных линейных уравнений, учитывающих продольную и поперечную теплопроводность теплообменных пластин.

Ключевые слова: теплообменник, пластина, моделирование, система уравнений, коэффициент теплоотдачи.

Теплообменники применяются везде, где необходимо нагреть или охладить любую жидкую или газообразную среду. В промышленности, на производстве и в строительстве теплообменники применяются в системах отопления, горячего водоснабжения, в системах приточной вентиляции.

Широкое применение в промышленности и строительстве получили пластинчатые теплообменники. Пластинчатые теплообменные аппараты являются разновидностью поверхностных рекуперативных теплообменных аппаратов с поверхностью теплообмена, изготовленной из тонкого листа. Под пластинчатыми рекуперативными теплообменниками принято понимать установки с плоскими каналами, разделенными пластинами. По каналам проходят потоки жидкости или газа, имеющие разные температуры. Теплообмен происходит за счет конвекции и теплопередачи через пластины. Если потоки направлены в одну сторону, то теплообменник называется прямоточным, если в противоположные стороны — противоточным.

Уже на основании общего принципа работы пластинчатого теплообменника можно сделать заключение о некоторых его особенностях, весьма важных для практики. Малая толщина пластин и параллельная установка с малыми промежутками между пластинами позволяет разместить в пространстве рабочую поверхность теплообменника наиболее компактно с такой «плотностью», которая недостижима в других типах теплообменников. Это, в конечном счете, приводит к тому, что пластинчатые теплообменные аппараты обладают при равной тепловой нагрузке значительно меньшими габаритными размерами и металлоемкостью, чем аппараты типа «труба в трубе», кожухотрубчатые и другие, обладающие достаточно высокой эффективностью теплообмена.

Классический подход к расчету эффективности работы теплообменников базируется на уравнениях баланса тепла, в которые входят коэффициенты теплопередачи. Этот подход имеет свои слабые стороны. Во-первых, в выражения коэффициентов теплопередачи входят коэффициенты теплоотдачи, численные значения которых достаточно трудно определить. Как было показано в работе [1], коэффициенты теплоотдачи за-



Рис. 1. Горизонтальное сечение фрагмента теплообменника

висят от физических параметров жидкости или газа, характера их движения, форм и размеров каналов теплообменника. Кроме того, эти коэффициенты могут меняться по длине канала. Во-вторых, с целью более точных расчетов в ряде случаев следует учитывать продольную теплопроводность пластин теплообменника.

Рассмотрим горизонтальное сечение фрагмента теплообменника (рис. 1).

Математическая модель процесса теплопереноса включает следующие составляющие.

Уравнения конвективного переноса в каналах

$$\rho V_T(x, y) C \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), \quad y \in (hp, hT + hp),$$

$$\rho V_t(x, y) C \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), \quad y \in (-ht - hp, -hp).$$

Уравнения распределения температуры в пластине

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} + \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0, \quad x \in (0, L), \quad y \in (-hp, hp),$$

входных условий:

$$t \Big|_{x=0} = t_{bx}, \quad y \in (-hp, -ht - hp),$$

$T \Big|_{x=0} = T_{bx}$, $y \in (hp, hp + hT)$ — в случае прямотока,

$T \Big|_{x=L} = T_{bx}$, $y \in (hp, hp + hT)$ — в случае противотока.

Уравнения условий четности на осях симметрии каналов

$$\frac{dT}{dy} \Big|_{y=hT+hp} = 0, \quad x \in (0, L), \quad \frac{dT}{dy} \Big|_{y=-ht-hp} = 0, \quad x \in (0, L),$$

условий непроницаемости на торцах пластины

$$\frac{dT_p}{dx} \Big|_{x=0} = 0, \quad y \in (-hp, hp), \quad \frac{dT_p}{dx} \Big|_{x=L} = 0, \quad y \in (-hp, hp).$$

Уравнения условий сопряжения

$$\begin{aligned} T|_{y=hp} &= Tp|_{y=hp}, \quad x \in (0, L), \quad t|_{y=-hp} = Tp|_{y=-hp}, \quad x \in (0, L), \\ \lambda(T) \frac{dT}{dy} &= \lambda_{\text{пл}}(Tp) \frac{dTp}{dy}, \quad y = hp, \quad x \in (0, L), \\ \lambda(t) \frac{dt}{dy} &= \lambda_{\text{пл}}(Tp) \frac{dTp}{dy}, \quad y = -hp, \quad x \in (0, L). \end{aligned}$$

Здесь $\lambda_{\text{пл}}$, ρ , C — соответственно теплопроводность, Вт/(м · град), плотность, кг/м³ и удельная теплоемкость, Дж/(кг · град). Коэффициент теплопроводности воздуха определялся по известной линейной зависимости: $\lambda(t) = 0,023577 + 0,00007t$.

Скорость в каналах определялась по формуле, учитывающей начальный участок:

$$V(x, y) = V_{\text{вх}} \left[1,5 - \frac{1,5y^2}{h^2} - 2 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 - \frac{\cos\left(\frac{g_n y}{h}\right)}{\cos(g_n)} \right) e^{\left(-\frac{g_n^2 v x}{V_{\text{вх}} h^2}\right)}}{g_n^2} \right] \right],$$

где g_n — положительные корни уравнения $\operatorname{tg}x = x$;
 v — кинематическая вязкость воздуха,
 h — половина сечения канала,
 $V_{\text{вх}}$ — входная скорость потока воздуха.

Попытки решения этой задачи с помощью метода прогонки для неявных схем конечно-разностных уравнений возможны только в случае прямотока при предположении о пренебрежимо малой толщине теплообменных пластин без учета их продольной теплопроводности [2]. Попытки решения этой системы путем осреднения по координате [3] приводят к появлению коэффициентов теплоотдачи, определение численных значений которых весьма затруднительно.

Нами был построен разностный аналог представленной выше модели на сетке с N_x шагами по длине каналов, N_y шагами по сечению каналов, $N_y/2 + 1$ шагами по сечению пластины. На первом шаге коэффициент теплопроводности вычислялся по приведенной выше формуле при среднеарифметическом значении входных температур. При $N_x = 40$ и $N_y = 10$ было получено 1168 конечно-разностных алгебраических линейных уравнений. После первого шага решения этой системы в каждой точке сетки уточнялся коэффициент теплопроводности, и система решалась заново. Данный итерационный процесс завершался, когда относительная погрешность по температурам на выходе из теплообменника в настоящей и предыдущих итерациях становилась менее 0,5 %.

На рис. 2 и 3 показаны поле и графики среднерасходных температур в прямоточном теплообменнике длиной 0,2 м, сечениями каналов 2 мм, сечением пластины 1 мм и температурами на входе соответственно 100 и 0 °C. Канал, по которому движется воздух, имеющий более высокую температуру, назван на графиках «горячим», а другой канал — «холодным».

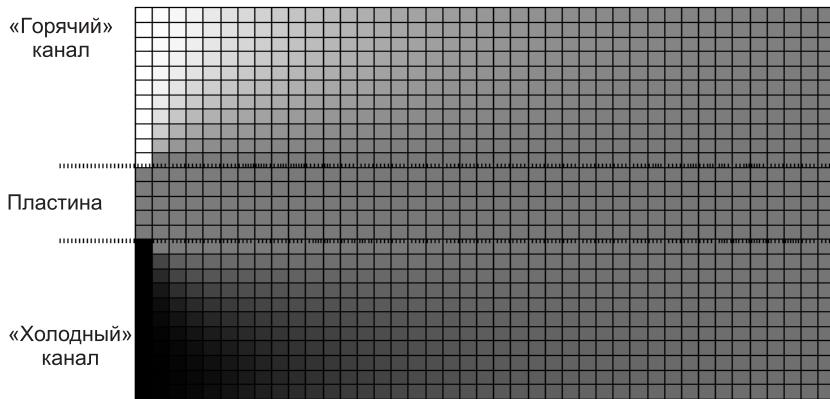


Рис. 2. Поле температур (прямоток)

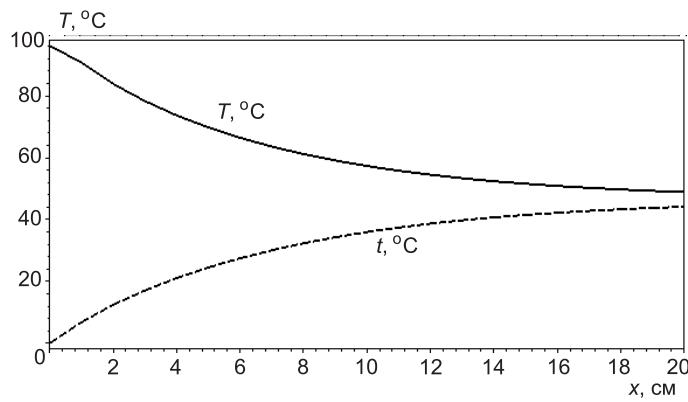


Рис. 3. Графики температур (прямоток)

Скорости воздушных потоков принимались равными 3 м/с. Более светлым тонам соответствует более высокая температура. Глубина охлаждения «горячего» воздуха составила 51,1 °С.

На рис. 4 и 5 показаны поле и графики среднерасходных температур в противоточном теплообменнике с теми же параметрами. Глубина охлаждения «горячего» воздуха составила 66,9 °С. Результаты вычислений подтверждают хорошо известный факт о более эффективном теплообмене в случае противоточного режима течения.

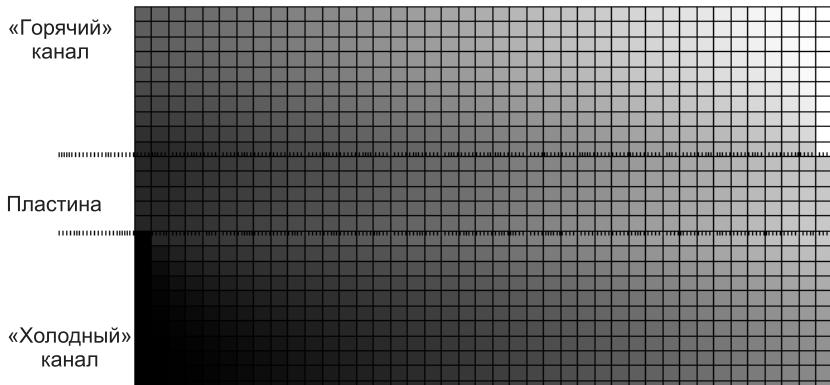


Рис. 4. Поле температур (противоток)

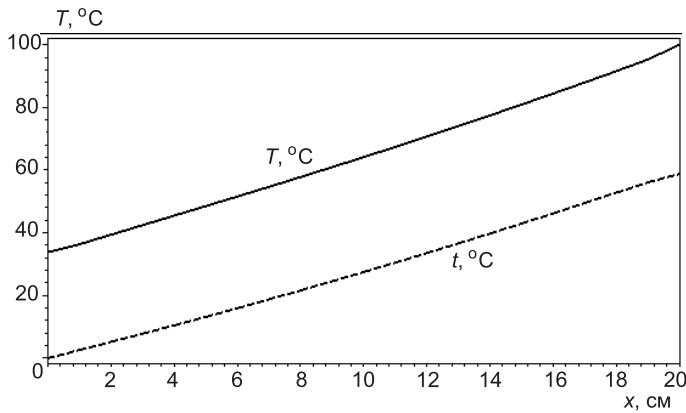


Рис. 5. Графики температур (противоток)

Учет продольной теплопроводности в рассматриваемой модели показал также, что при достаточно высоких продольных градиентах температур пластин увеличение коэффициента теплопроводности приводит к снижению эффективности работы теплообменника. Такая ситуация складывается в случае противоточной конструкции, а также при разных скоростях потоков в прямоточном теплообменнике.

При рассмотренных выше параметрах противоточного теплообменника наибольшая глубина охлаждения составила $66,9 {}^\circ\text{C}$ при $\lambda_{\text{пл}} = 5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$, а, к примеру, при $\lambda_{\text{пл}} = 200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ — всего $61,3 {}^\circ\text{C}$. Кроме того, реализация модели теплообмена показала, что в случае разных скоростей потоков температура пластин по длине теплообменника изменяется, что не дает возможность определения коэффициента теплоотдачи из известных критериальных зависимостей. По результатам решения были вычислены локальные значения указанных коэффициентов, анализ которых показал их зависимость не только от продольной координаты, но и от кинематики сопряженного потока.

Таким образом, для описания реальных значений температур в теплообменниках целесообразно применять реализацию систем конечно-разностных уравнений, описывающих процессы теплопереноса как в потоках теплоносителей, так и в теплопередающей пластине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шацкий, В.П. О коэффициентах теплоотдачи в теплообменниках [Текст] / В.П. Шацкий, Л.И. Федулова, О.И. Грицких // Сб. науч. и науч.-метод. докл. междунар. науч.-практ. конф. преподавателей, сотрудников и аспирантов. — Старый Оскол : СТИ НИТУ МИСиС, 2009. — Т. 2. — С. 273–275.
- Шацкий, В.П. К вопросу о работе водоиспарительных охладителей [Текст] / В.П. Шацкий, Ж.В. Высоцкая, В.А. Гулевский // Науч. вест. ВГАСУ. — № 3(11). — Воронеж, 2008. — С. 95–100.
- Горяйнов, В.В. Анализ математической модели теплообменных систем с учетом поперечной и продольной теплопроводности: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук [Текст] / В.В. Горяйнов. — Воронеж : ВГТА, 2004. — 24 с.

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

Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I

ГУЛЕВСКИЙ Вячеслав Анатольевич, канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I

Получено 10.11.11

Shatsky Vladimir Pavlovich, doctor of technical sciences, professor, Voronezh State Agricultural University after Emperor Peter I, Russia
Gulevsky Vechaslav Anatolievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State Agricultural University after Emperor Peter I, Russia

SOME ASPECTS OF MODELLING PLATE HEAT EXCHANGER

We consider the simulation of heat transfer processes in regenerative heat exchangers plans, based on an iterative algorithm for solving systems of linear finite difference equations that take into account the longitudinal and transverse thermal conductivity of the heat exchanger plates.

Key words: heat exchanger, plate, modeling, system of equations, heat transfer coefficient.

REFERENCES

1. Shatsky, V.P. On the coefficients of heat transfer in heat exchangers [Text] / V.P. Shatsky, L.I. Fedulova, O.I. Gritskikh // Collection of Scientific and Methodological Reports of the Intern. Scientific-practical Conf. Faculty, Staff and Graduate Students. — Old Oskol : STI NITU MISIS, 2009. — Vol. 2. — P. 273–275.
 2. Shatsky, V.P. To a question on vodoisparitelnyh coolers [Text] / V.P. Shatsky, J.V. Vysotskaya, V.A. Gulevsky // Scientific Bulletin VGASU. — N 3 (11). — Voronezh, 2008. — P. 95–100.
 3. Goryainov, V.V. Analysis of Mathematical Models of Heat Exchange Systems With Allowance for the Transverse and Longitudinal Thermal Conductivity: Abstract dissertation of candidate of physical and mathematical sciences [Text] / V.V. Goryainov. — Voronezh : VSTA, 2004. — 24 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 69.05

Г.М. БАДЬИН, Б.С. МОСАКОВ

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Излагаются принципы формирования и проектирования энергосберегающих строительно-технологических систем. Даётся концепция комплексного построения научно-практической дисциплины «Технология строительного производства» с учетом динамики развивающихся систем, изложены принципы технологии строительства.

Ключевые слова: технология строительного производства, функциональная система, технологический принцип строительства.

Начало XXI века ознаменовано интенсивным развитием строительно-технологических систем и внедрением эффективных нанотехнологий в инженерные решения при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Под строительной технологической системой следует, по нашему мнению, понимать совокупность взаимосвязанных элементов системы, объединенных единым конструктивно-технологическим решением, направленным на повышение качества, надежности, долговечности и эффективности строительства.

В современных условиях технология (*techno* — искусство, мастерство + *logos* — мысль, слово) есть способ взаимодействия функционирующих систем, образующих простые и комплексные процессы, определяющим моментом которых является степень потенциала интеллекта, интеллектуального развития, наличие нанотехнологий. По сути дела технологические науки объединяют в единую систему знаний все существующие в мире науки.

Отсюда следует, что концепция технологии строительного производства состоит в комплексном единстве составляющих элементов системы: строительные материалы, строительные конструкции, методы и способы производства работ, организация, планирование и управление производством, контроль качества СМР и т.д. Причем при возведении здания или другого сооружения реализуются те или другие технологии, образуя саморегулирующиеся (эрратические) системы [1, 2]. Наиболее точное и сжатое определение дано в [1]: «Технология строительного производства — функциональная система, включающая ресурсы (временные, трудовые, материальные и финансовые), а также ограничения и правила их взаимодействия для достижения заданного проектом результата — выполнения отдельных видов работ, процессов и элементов строительно-технологической системы».

Таким образом, функциональная система состоит из факторов (n), таких как: строительные материалы, конструкции, машины и оборудование, методы организации в количестве $\sum_{i=1}^n i$. В свою очередь она определя-

ет строительно-технологическую систему (СТС) определенного уровня (СТС-I, II, III и т.д.), означающую инновационный прорыв в одном или в нескольких факторах. Тогда появляется новая, более развитая СТС 1-, 2-, 3-го ... уровня. Динамичное развитие и трансформация СТС ориентирует на совершенствование качества во всех звеньях технологической цепи.

Схематическое изображение «концептуального моста» между системным уровнем технологии строительного производства и элементами строительно-технологических систем по методике академика А.П. Анохина представлено на рисунке, из которого видно, что при динамическом развитии строительного производства оно из одного состояния качества переходит на новый более высокий уровень качества.

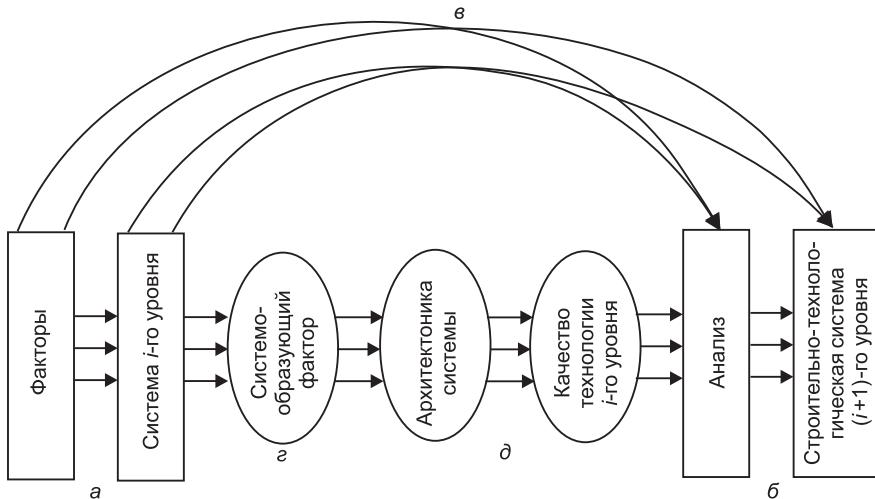


Схема «концептуального моста» между системными уровнями технологии строительного производства и элементами строительно-технологических систем

а — уровень целостной системной деятельности; *б* — уровень результата взаимодействия факторов; *в* — путь обычных корреляционных отношений; *г* — включение системообразующих факторов; *д* — операционная архитектоника системы (условия производства работ)

Логистическое развитие функциональной системы предполагает соответствующую систему качества на каждом этапе жизненного цикла и дифференциальный критерий оценки качества строительно-монтажных работ:

$$K_{об} = \sum_{i=1}^n K_i \alpha_{ni},$$

где K_i — значение фактора;

n — количество факторов;

α — весомость критериального показателя в физических, стоимостных или относительных единицах.

О качестве технологии можно судить по критериям и значениям различных групп показателей: экологических, экономических, социальных. Каждому уровню технологии соответствуют определенные значения этих показателей.

Можно, например, улучшать экономические показатели в системе, а она будет продолжать деградировать, а не развиваться. В чем дело? Система развивается, если обеспечивает приращение потенциала интеллекта, который вкладывается рационально в систему, в развитие техники, технологии, механизированную и автоматизированную системы управления.

Инвестиции — реализация дополнительного потенциала интеллекта в технологию функционирования системы. Это необходимое условие для развития системы. Но система постоянно изменяется, она может деградировать при определенных условиях и стремительно развиваться высокими темпами. При этом необходима диагностика качества технологии. Оценка «цена=качество» помогает выявить, где этот потенциал, и прогнозировать, в каком объеме он необходим для дальнейшего развития системы [3].

Ввод в 1986 году в Японии строительного завода-автомата доказал, что не интенсивный труд рабочих, а потенциал интеллекта специалистов, реализованный в инновационные технологии, является главным источником научно-технического прогресса. Именно с этого этапа начинается в мире технологический бум, а научно-практические науки востребованы сейчас, как никогда. Особое внимание привлекают нанотехнологии, совершенствующие качество современных технологий и технологий будущего.

Более 40 лет в нашей стране идут экономические преобразования. Однако экономисты пока не решили ни одной серьезной задачи в строительстве и тем самым нанесли неизмеримый ущерб России. Например, в начале 1990-х годов необходимо было изменить технологию функционирования строительного комплекса как системы: переведя технологию функционирования с плановым регулированием на технологию функционирования с внутренним регулированием по рыночным отношениям. Технологическую задачу в строительстве взялись решать представители экономической науки, которым она оказалась не по плечу, они даже не смогли понять объемность, многофункциональность и многогранность этой задачи. В сознание нации внедрялись понятия «экономика страны», «экономическое развитие» и др., не подкрепленные и не обоснованные социально-техническими преобразованиями. Экономисты не понимали, что эта стратегия и тактика не только безответственна, но иносит существенный вред строительному потенциалу страны. Весь строительный комплекс был не реорганизован, а разрушен до основания. Непонимание профессионалами своего места в новой формации привели к деградации и упадку развитой индустрии строительства.

После длительного периода перестройки и реформирования строительной отрасли в условиях новой экономической формации стали намечаться направления и пути дальнейшего развития технологии строительного производства. Новые технологические идеи, воплощенные в прогрессивные строительные системы, уже качественно отличаются от прежних тем, что они ориентированы, наконец, на человека-технолога, создание нанотехнологий и на нововведения нового поколения, на создание комфортных условий работы и проживания в новостройках. Обозначился свет в туннеле, появились признаки оздоровления строительной отрасли после введения системы саморегулирования.

Приоритетными направлениями в строительстве остаются: снижение доли тяжелых трудоемких операций, механизация, комплексная механизация и автоматизация строительного производства, контроль качества СМР, жизнеобеспечение, экологические вопросы. На наш взгляд, ресурсосбережение есть основополагающая идея формирования новых технологий. Но эта экономия ресурсов не должна идти в ущерб надежности, качеству, долговечности конструкций.

Анализ современных технологических задач позволил сформулировать 7 принципов функционирования технологических систем [4]. Однако принципы, сформулированные совместно с В.И. Несновым, на наш взгляд, требуют определенной корректировки и доказательств. К этому

есть серьезные причины, связанные с современным развитием производства и системой управления.

В настоящее время во многих управленческих процессах отсутствует четкая технологическая взаимосвязь промежуточных результатов и достижений конечной цели. Существующие методы выделения этих результатов и оценки качества их достижения субъективны. Вследствие этого в реализуемых логистических маршрутах часто не просматривается конечный результат либо маршруты приводят к целям, отличным от декларированных. Часто процедуры решения задач излишне зарегламентированы, избыточны и противоречивы. Кроме того, дублирование отмечается в разных уровнях системы. Если взять строительство, то не всегда однозначно определена ответственность участников строительства за сбои в достижении конечных результатов. Это приводит к тому, что вся оценка за получение конечной цели концентрируется на участниках, завершающих технологический маршрут. Истинные источники сбоев в управлении зачастую не выявляются. Поэтому одним из способов реализации технологических задач в строительстве является проектирование технологических нормалей, определяющих последовательность реализации законов технологии.

Отсюда следует **первый технологический принцип**, который можно сформулировать так: *всякое взаимодействие факторов имеет свою технологию, которая удовлетворяет соответствующим требованиям системы и должна изучаться как совокупность однородных или декомпозиционных элементов системы, связанных между собой определенными (материальными, организационными, экономическими и др.) связями*. Под понятием «фактор» (factor — делающий, производящий) в современных условиях подразумевают движущую силу, причину какого-либо процесса, явления или существенное обстоятельство в каком-либо процессе, явлении. В свою очередь система есть совокупность элементов и факторов различного происхождения, направленных на решение одной или нескольких задач, которые могут быть в зависимости от набора факторов однородными или неоднородными (декомпозиционными).

Примером может служить сама сущность технологии как совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабрикатов в процессе производства работ, как набор способов воздействия на сырье, материалы или полуфабрикаты соответствующими орудиями производства. Отсюда следует понятие **второго принципа технологии**: *любая технология есть материализуемый или уже материализованный потенциал интеллекта*.

И в самом деле, реализация любого производственного процесса требует от исполнителя определенных навыков, умений и общей подготовленности к производственной деятельности. От общего уровня его подготовленности зависит время выполнения процесса, качество выполняемой работы. На всех этапах передела исполнитель должен проявить свои способности, свой интеллект, чтобы получить конечную продукцию. Отсюда следует, что объем интеллекта можно оценить по качеству полученной продукции, эффективности реализации процесса. В современной практике такая методика оценки существует. Это могут быть удельная величина трудозатрат, прямые затраты и себестоимость полученной продукции и т.д.

Третий принцип технологии можно сформулировать следующим образом: каждая технология имеет свое качество, диапазон его улучшения, диапазон емкости потенциала интеллекта. Однако при этом было не совсем ясно, может ли технология иметь качество. Видимо, этот принцип может иметь и другое определение, учитывающее образ, содержание, свойство, способ взаимодействия функционирующих систем. Поэтому

данный принцип может быть сформулирован таким образом: *для каждой технологии характерен свой способ взаимодействия функционирующих систем, определяющий соответствующий интеллектуальный потенциал, переходящий в новое качество технологии.*

В качестве примера можно принять способы уплотнения бетонной смеси. Если на ранних стадиях применения бетона уплотнение бетонных смесей осуществлялось вручную, применялись литые бетонные смеси. В дальнейшем с целью повышения технологических свойств бетона и по мере развития реологии появились механические трамбовки, а затем стали использовать вибромеханический способ укладки бетонной смеси. При совершенствовании способов подбора бетонной смеси удалось повысить также ее технологические свойства.

Подобные обстоятельства проявились и в монтажных работах. Между тем неизменным остается процесс каменной кладки. Составы и рецептуры кирпича и кладочных растворов совершенствуются, а технологический процесс кладки остается столетиями неизменным. В настоящее время с целью повышения производительности кладочного процесса стараются повысить действенность сопутствующих процессов, таких как транспортировка материалов к месту работ, организация рабочего места каменщика, подбор рационального состава звена каменщиков и т.д.

Таким образом, если технология уплотнения бетонных смесей, монтажных работ определяется прямым набором технологических и механизированных процессов, т.е. функционирующих систем в том или ином виде, то технология каменных работ включает в себя большую часть организационной составляющей.

Четвертый принцип технологии может быть сформулирован следующим образом: *каждая технология имеет свой жизненный цикл, определяемый не только величиной диапазона емкости потенциала интеллекта, но и скоростью его реализации.*

Примером может служить история открытий, динамика научно-технического прогресса. Научно-технический прогресс проявляется во всех областях человеческой деятельности с определенным ускорением. Между открытием фотоэффекта и появлением фотографии прошло 102 года. Для изобретения телефона потребовалось 50 лет, радио — 35 лет, телевидения и радарных установок — 14 лет. Для создания атомных электростанций потребовалось 15, а атомной бомбы — 6 лет. Атомный реактор был освоен за 4 года. Всего 5 лет потребовалось для освоения транзистора и лазера. В настоящее время такую динамику развития общества принято называть научно-техническим прогрессом.

Значителен прогресс и в строительной сфере. Если при строительстве пирамиды Хеопса было затрачено примерно 160 млн чел.-ч, то при сооружении Братской ГЭС, превосходящей по строительному объему пирамиду Хеопса в 5–6 раз, было затрачено менее 50 млн чел.-ч. Однако известны и другие факты. Так, например, процесс изготовления керамического кирпича был описан Геродотом еще 5 тыс. лет назад. Почти одновременно он был известен и в Древнем Египте, Вавилоне, древнем Риме. С распадом Римской империи о существовании кирпича забыли и вспомнили о нем только в X–XII веках нашей эры, когда началось бурное строительство городов в Западной Европе. Эти факты говорят не только о том, что научно-технический прогресс дискретен, но и характеризуют технологию, величину ее жизненного цикла.

Логично с четвертым принципом связан **пятый принцип технологии**, который согласовывает соответствие качества технологии и ее жизнеспособность, т.е. чем выше качество технологии, тем большую при-

быть создают процессы, в которых она реализуется, тем ниже скорость ее старения. А как оценить качество технологии? По каким приемлемым параметрам? Видимо, возможна следующая трактовка пятого принципа: *чем больше интеллектуальный потенциал задействован в функционирующих системах, тем выше качество технологии и ниже скорость ее старения.*

Следовательно, можно сформулировать **шестой принцип**, который отражает соответствие интеллектуального потенциала технологическим методам и способам производства работ: *чем выше потенциал интеллекта задействован в технологии функционирующей системы, тем большим интеллектуальным потенциалом должна обладать система управления.*

Отсюда следует, что при определенных значениях этого потенциала система управления может быть недостаточно эффективной или убыточной. При этом работающий человек, особенно в системе управления, может быть излишним и убыточным для системы, например, в силу своей низкой профессиональной пригодности. Чем выше потенциал интеллекта в системе управления, тем больше вероятность ее приближения к единственной оптимальной технологии управления системой. Чем выше должность в системе управления, тем большим потенциалом интеллекта должен обладать человек, ее занимающий.

Наконец, **седьмой (заключительный) принцип** должен отражать влияние инвестиций на систему в целом: *уровень инвестиций должен соответствовать качеству технологии.* Уровень развития всегда соответствует уровню качества. В свою очередь, объем инвестиций в развитие новых технологий в функционирующей системе должен соответствовать качеству технологического обеспечения и качеству конечного продукта, готовых объектов строительства. Применительно к жилищному строительству качеством продукции обычно называют совокупность свойств, определяющих степень пригодности сооружения или его части для использования по назначению. Иными словами, качество продукции многогранно и может характеризоваться следующими показателями: технологическим, художественно-эстетическим, социологическим, экономическим, правовым.

Таким образом, теоретические основы технологии строительного производства требуют дальнейших исследований. Необходимо доказать или опровергнуть изложенные выше принципы. В противном случае современный строительный комплекс не удастся в полной мере индустриализировать, тем более что современная трактовка оценки качества строительства изменилась.

От многостадийной и поэтапной системы многоуровневого контроля качества мы переходим на одностадийную оценку по конечному результату готовой продукции. Однако этот вопрос еще достаточно глубоко не проработан и требуются дальнейшие исследования в этом направлении.

Известно, что российское госрегулирование уничтожило ряд институтов технического нормирования (Госстрой, ВНИИПИ труда и др.), отменило лицензирование и СНиПы (главную нормативную базу) в связи с переходом на европейские стандарты. Однако введение технических регламентов не было доведено до конца и оценка качества по конечному результату в том виде, как это сейчас происходит, не решает проблему повышения качества строительства. Отказ от многоступенчатой системы контроля значительно снизил качество строительства. Многочисленные федеральные законы и постановления не смогли в полной мере заменить СНиПы, о чем свидетельствует возросшее количество аварий и нарушений в строительстве, затруднен государственный контроль на объектах

капитального строительства. Саморегулирование размыло четкие границы отношений между участниками строительства, снова пришлось вернуться к Градостроительному кодексу РФ, Кодексу РФ об административных нарушениях (2009 г.) и договорам Строительного подряда Гражданского кодекса РФ. Ряд основных СНиПов снова обрели правовую силу. Эти документы легли в основу твердой правовой базы при разрешении конфликтных ситуаций и претензий между участниками строительства. По нашему мнению, одной из ключевых задач на данном этапе продолжжающейся перестройки в строительстве является целенаправленная подготовка не бакалавров, а профессиональных инженеров-строителей, владеющих новыми технологиями, а также правовой и нормативной базами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курбатов, В.Л. Технология строительства [Текст] / В.Л. Курбатов, Б.С. Мосаков, И.М. Кондраков. — М. : Изд-во ассоциации строит. вузов, 2007. — 750 с.
2. Бадьин, Г.М. Строительное производство: основные термины и определения [Текст] / Г.М. Бадьин, В.В. Верстов, В.Д. Лихачев, А.Ф. Юдина. — М. : Изд-во АСВ ; СПб. : СПбГАСУ, 2006. — 297 с.
3. Бадьин, Г.М. Справочник технолога-строителя [Текст] / Г.М. Бадьин. — СПб. : БХВ-Петербург, 2008. — 512 с.
4. Неснов, В.И. Проблемы развития строительных эргатических систем [Текст] / В.И. Неснов, Б.С. Мосаков // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 1–2.

БАДЬИН Г.М., д-р техн. наук, проф.

Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет

МОСАКОВ Б.С., д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 22.09.11

Bad'in G.M., doctor of technical sciences, professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Mosakov B.S., doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

GENERATING PRINCIPLES OF ENERGY-SAVING MANUFACTURING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Generating and engineering principles of energy-saving manufacturing systems are developed in the article. A concept of integrated modeling of research-to-practice discipline «Construction technology» with regards to the dynamics of the evolutionary systems is provided; engineering philosophy in construction is expounded.

Key words: construction technology, functional system, engineering philosophy in construction.

REFERENCES

1. Kyrbatov, V.L. Construction Technology [Text] / V.L. Kyrbatov, B.S. Mosakov, I.M. Kondrakov. — M. : Association of Construction Institutions, 2007. — 750 p.
2. Bad'in, G.M. Construction Procedure : Basic Terms and Definitions [Text] / G.M. Bad'in, V.V. Verstov, V.D. Likhachev, A.F. Udina. — M. : ASV ; SPb. : SPSUACE, 2006. — 297 p.
3. Bad'in, G.M. Constructability Manager Manual [Text] / G.M. Bad'in. — SPb. : BXV-Petersburg, 2008. — 512 p.
4. Nesnov, V.I. Development Issues of Building Ergatic [Text] / V.I. Nesnov, B.S. Mosakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 1–2.

УДК 624.012.41

Д.А. ФЕДОРОВ, К.Г. МОКЛЯК

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ
СОВМЕСТНОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ
С ОСНОВАНИЯМИ ПО РЕАЛИЗАЦИЯМ
В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ SCAD И «ЛИРА»**

Рассматривается проблема совместного расчета конструкций с основаниями в современных вычислительных комплексах. Приведены результаты численного эксперимента по сравнительной оценке предлагаемых методов расчета.

Ключевые слова: деформируемое основание, модель Винклера, модель Пастернака, коэффициенты жесткости оснований.

Отсутствие единой методики расчета конструкций на деформируемом основании приводит на практике к многовариантному подходу. В настоящей работе сделан численный анализ вариантов, предлагаемых в средах вычислительных комплексов (ВК) SCAD и «Лира» для моделирования совместной работы конструкций и оснований. В рамках реализаций в средах данных ВК рассмотрены два подхода:

1) деформируемое основание представляется коэффициентами жесткости (постели). Используются вариации двух моделей: Винклера и Пастернака;

2) непосредственное моделирование грунтового основания конечными элементами (КЭ). В составе ВК «Лира» имеются специальные «нелинейные» КЭ — элементы «грунтового массива».

В среде ВК SCAD были рассмотрены следующие варианты расчета.

1. Использование вариаций однопараметрической модели основания (определяется жесткость оснований на сжатие C_1 — коэффициент Винклера):

- с помощью сателлиты «Кросс» последовательными приближениями вычисляются значения C_{1i} для всех контактных элементов (далее — вариант «Кросс»). Основания рассматриваются по модели Федоровского—Безволева [3];

- при вычислении значений коэффициента C_{1i} используется программа Osadki [2], не входящая в состав ВК (далее — вариант Osadki). В расчетную схему включаются участки грунтов вокруг фундаментной плиты с вычисляемыми параметрами C_{1i} для учета их работы.

Другие варианты определения коэффициента C_1 (например, «claveщий», «усредненные») не рассматривались как явно недостаточные по точности для решения пространственных задач.

2. Использование двухпараметрической модели основания с коэффициентами жесткости C_1 (сжатие) и C_2 (сдвиг) и законтурными элементами для учета работы грунтов за пределами подошв фундамента.

Рассмотрены следующие подварианты вычисления значений коэффициентов C_1 , C_2 :

- расчет коэффициентов осуществляется по методике, предложенной Г.К. Шашкиным [4] и реализованной в сателлите «Пастернак» BK SCAD (далее — вариант «Пастернак»);
- расчет коэффициентов осуществляется по формулам, предложенными Ю.М. Федоренко [1] и включенными в состав ВК как коэффициенты деформируемого основания (далее — вариант SCAD).

В ВК «Лира» предлагаются три основных варианта задания модели основания с использованием коэффициентов C_{1i} , C_{2i} , но без законтурных элементов (назаны в ВК «метод1», «метод2», «метод3»; ниже названы вариант «Лира 1», вариант «Лира 2», вариант «Лира 3» соответственно). Дополнительно рассматривался вариант непосредственного моделирования основания с помощью специальных конечных элементов грунтового массива с использованием нелинейного процессора (вариант «Лира 4»). Напряженное состояние грунтов оценивалось по теории прочности Кулона–Мора (версия ВК «Лира-9.6 R3»).

Для проведения численного эксперимента рассматривались две характерные несущие системы:

— здание рамно-связевой схемы на плитном фундаменте, перекрытия — ребристые монолитные с плитами, опретыми по контуру (рис. 1, а). Основания — естественные деформируемые грунты (см. таблицу, все слои горизонтальные). Данный тип несущей системы далее рассматривается как здание с условно гибкой схемой. Для совместного расчета с использованием программы Osadki использовалась вариация модели, представленная на рис. 1, б;

— здание с частым расположением в продольном и поперечном направлениях несущих кирпичных стен с дисками перекрытий в виде пло-

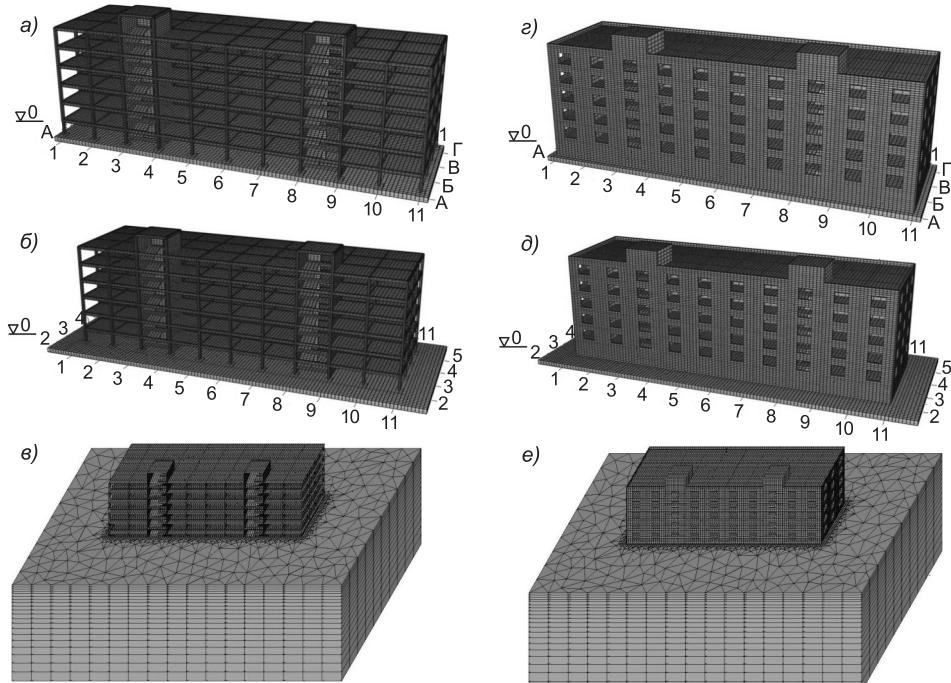


Рис. 1. Варианты моделей зданий, принятых для численного эксперимента с непосредственным моделированием оснований: а–в — вариации условно гибкой схемы; г–е — вариации условно жесткой схемы

Характеристики грунтов, принятые для расчета

Наименование грунтов	Удельный вес, т / м ³	Модуль деформации, т / м ²	Отметка верхней границы, м
Суглинок	1,9	850	102,4
Супесь	1,95	900	98
Суглинок	2	1000	95

ской монолитной плиты (рис. 1, *г*). Фундаменты плитные на естественном основании (см. таблицу). Данный тип несущей системы далее рассматривается как здание с условно жесткой схемой. Для совместного расчета с использованием программы Osadki использовалась вариация модели здания, представленная на рис. 1, *д*.

Варианты расчетных схем этих же зданий с непосредственным моделированием оснований объемными элементами грунтового массива представлены на рис. 1, *в*, *е*.

Контролировались следующие параметры из результатов расчета:

- осадки фундаментной плиты S по участкам (рис. 2, *б*);
- отпор грунтов Rz по участкам (рис. 2, *б*);
- расчетные усилия в колоннах нижнего этажа по периметру здания;
- проценты армирования в колоннах нижнего этажа по периметру здания;
- изгибающие моменты в фундаментной плите (рис. 2, *а*);
- проценты армирования в фундаментной плите (рис. 2, *а*).

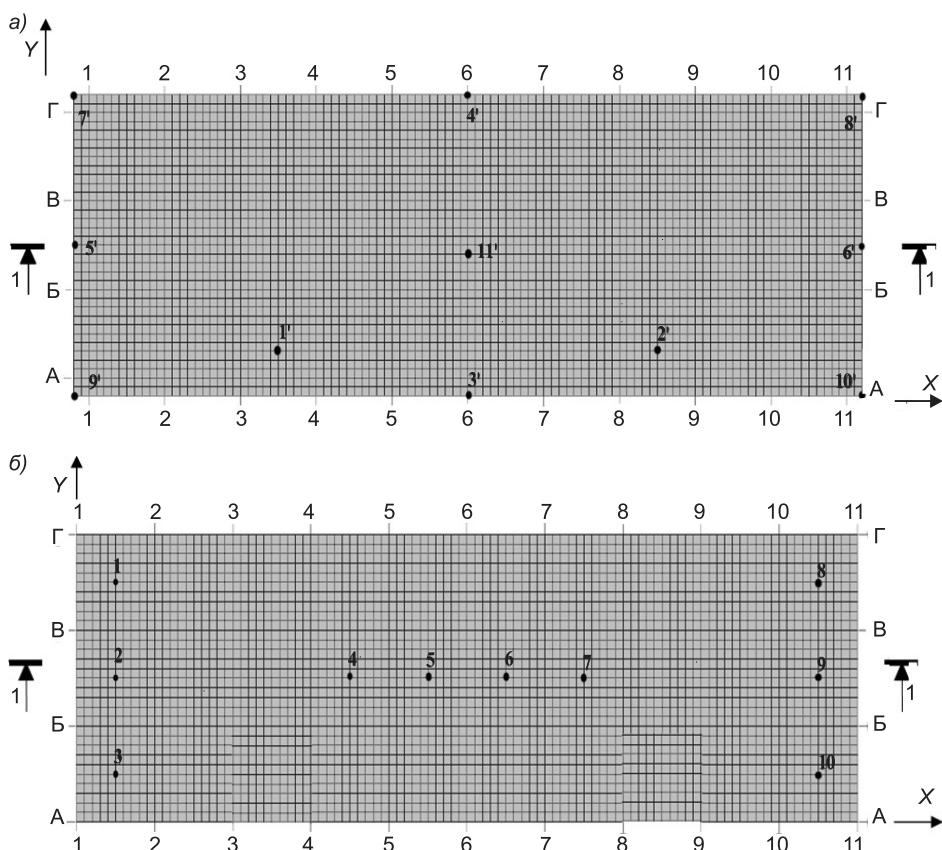


Рис. 2. Характерные точки для определения контролируемых параметров: Mx , My и процента армирования в фундаментной плите (*а*); S и Rz в фундаментной плите (*б*)

В расчетах вариантов с применением коэффициентов постелей сходимость совместного расчета контролировалась по изменениям значений Rz в характерных точках, указанных на рис. 2, б, кроме расчета по варианту Osadki, где сходимость контролируется и обеспечивается автоматически в процессе итераций для всех контактных элементов. Как показывают эти расчеты и опыт применения ВК в других расчетах, метод простых итераций, предлагаемый разработчиками рассматриваемых ВК, обеспечивает достаточно быструю сходимость (3–4 итерации) для внутренних зон контактной площадки, а для угловых зон и часто для зон вдоль периметра фундаментов итерации оказываются расходящимися (рис. 3). Сходимость

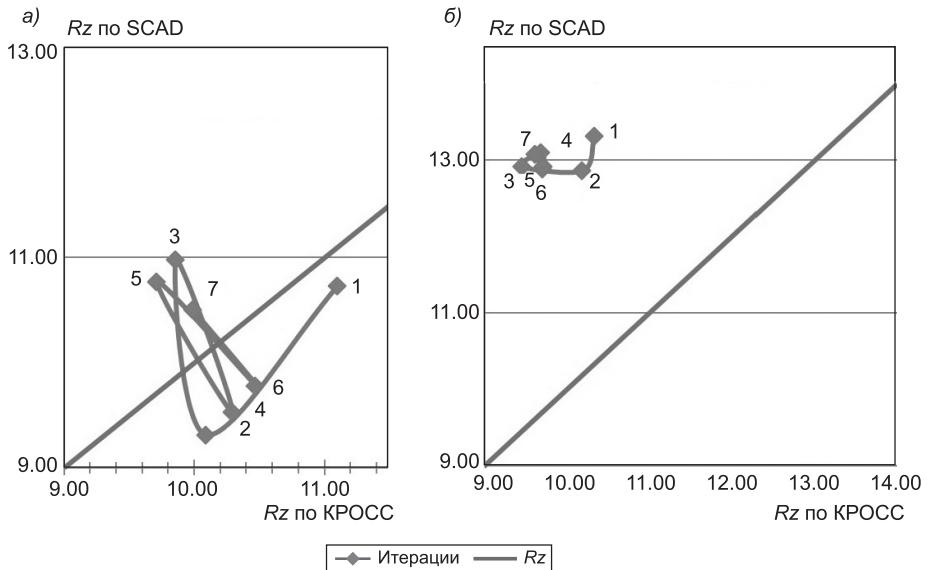


Рис. 3. Графики контроля сходимости Rz

а — для внутренних зон контактной площадки; б — для угловых зон и зон вдоль периметра
1–7 — порядковые номера итераций

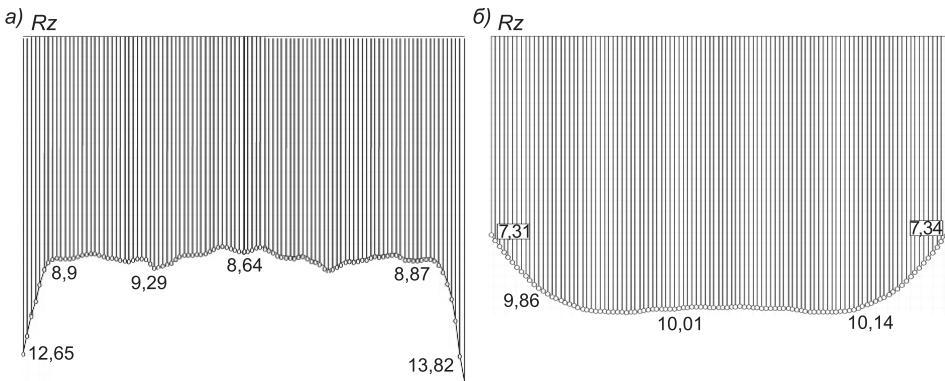


Рис. 4. Эпюра отпора грунтов по сечению 1–1 (см. рис. 2)

а — однопараметрические модели в вычислительных комплексах SCAD и «Лира»; б — двухпараметрические модели в ВК SCAD

резко ухудшается также для гибких плит в зонах перепада вертикальных давлений, и рекомендуемая при этом «ручная» корректировка значений C_{1i} не всегда очевидна.

На рис. 4 представлены характерные очертания эпюр отпора грунтов (Rz) под фундаментной плитой. Можно отметить следующее.

1. Для всех вариантов, рассчитанных с однопараметрическими моделями оснований, а также с двухпараметрическими моделями без контурных элементов наблюдается явно выраженный краевой эффект — зоны повышенного давления отпора грунтов под контактными элементами (рис. 4, *a*). Коэффициенты C_2 при этом никакого значимого влияния не оказывают.

2. При расчете рассматриваемых несущих систем по двухпараметрическим моделям с контурными элементами краевой эффект отсутствует (рис. 4, *b*), что объясняется «уходом» части давлений вдоль периметра фундаментов на контурные элементы. Получение численных значений сдвигающих усилий, перешедших на эти элементы, в обоих ВК не предусмотрено. Судя по сравнительному анализу площадей эпюров Rz , они несколько переоцениваются.

3. При нелинейном расчете рассматриваемых несущих систем в ВК «Лира» характер распределения давлений под подошвой фундаментов проявляется с явно выраженным краевым эффектом (рис. 4, *a*).

Анализ эпюр изгибающих моментов (Mx и My) по разрезу в продольном направлении показывает следующее.

1. Для несущих систем с условно гибкой и условно жесткой схемами качественный характер эпюр изгибающих моментов, полученный при расчете по рассматриваемым вариантам, одинаковый (рис. 5, *a*, *b*), за исключением эпюр, полученных при расчете по варианту SCAD (рис. 5, *в*, *г*).

Столь резкое расхождение характера эпюр моментов и отпоров при расчете по варианту SCAD объясняется слишком большой разницей в оценке коэффициентов постелей (в данном варианте — единых для всех контактных и контурных элементов). Значе-

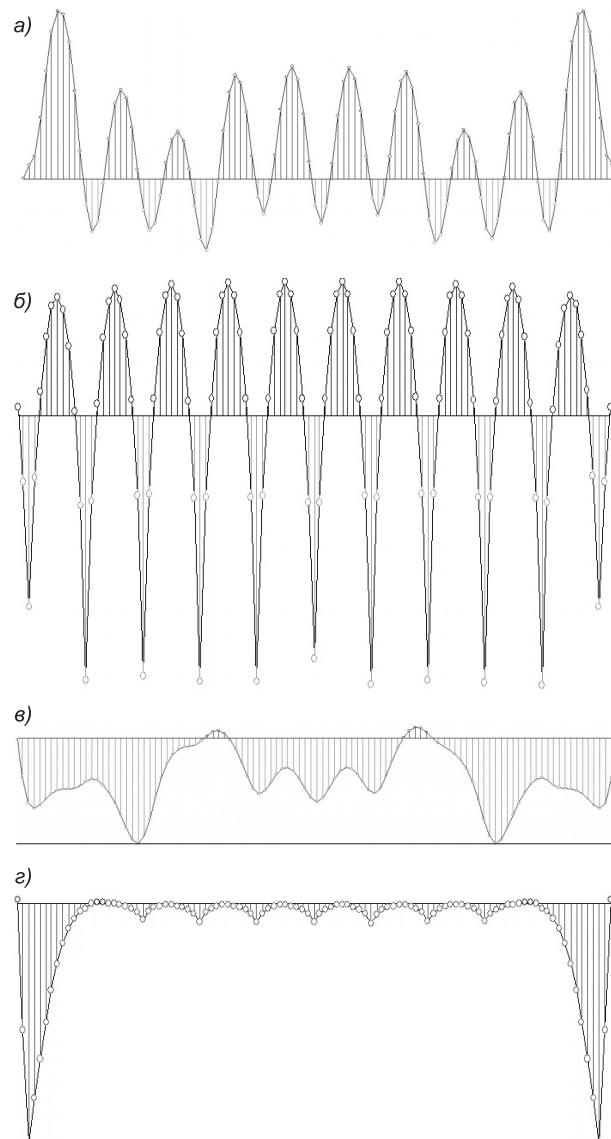


Рис. 5. Характер эпюр изгибающих моментов в фундаментной плите по сечению 1-1 (см. рис. 2)

a, б — здания с условно гибкой и условно жесткой схемами соответственно, рассчитанные по рассматриваемым вариантам, кроме варианта SCAD; *в, г* — здания с условно гибкой и условно жесткой схемами соответственно, рассчитанные по варианту SCAD

ние C_1 оказывается в 40–50 раз ниже, чем, например, подсчитанное среднее значение C_1 по программе «Кросс». Значение C_2 , наоборот, оказывается до 2,5 раз больше, чем значение C_2 , подсчитанное по программе «Кросс» или сателлите «Пастернак». При таких соотношениях значений коэффициентов C_1 и C_2 ($C_1 = 16,72 \text{ т} / \text{м}^3$, $C_2 = 1746,43 \text{ т} / \text{м}^3$) до 60 % вертикальных давлений на грунт «уходит» на законтурные элементы. Очевидна явная переоценка перераспределительной способности грунтов.

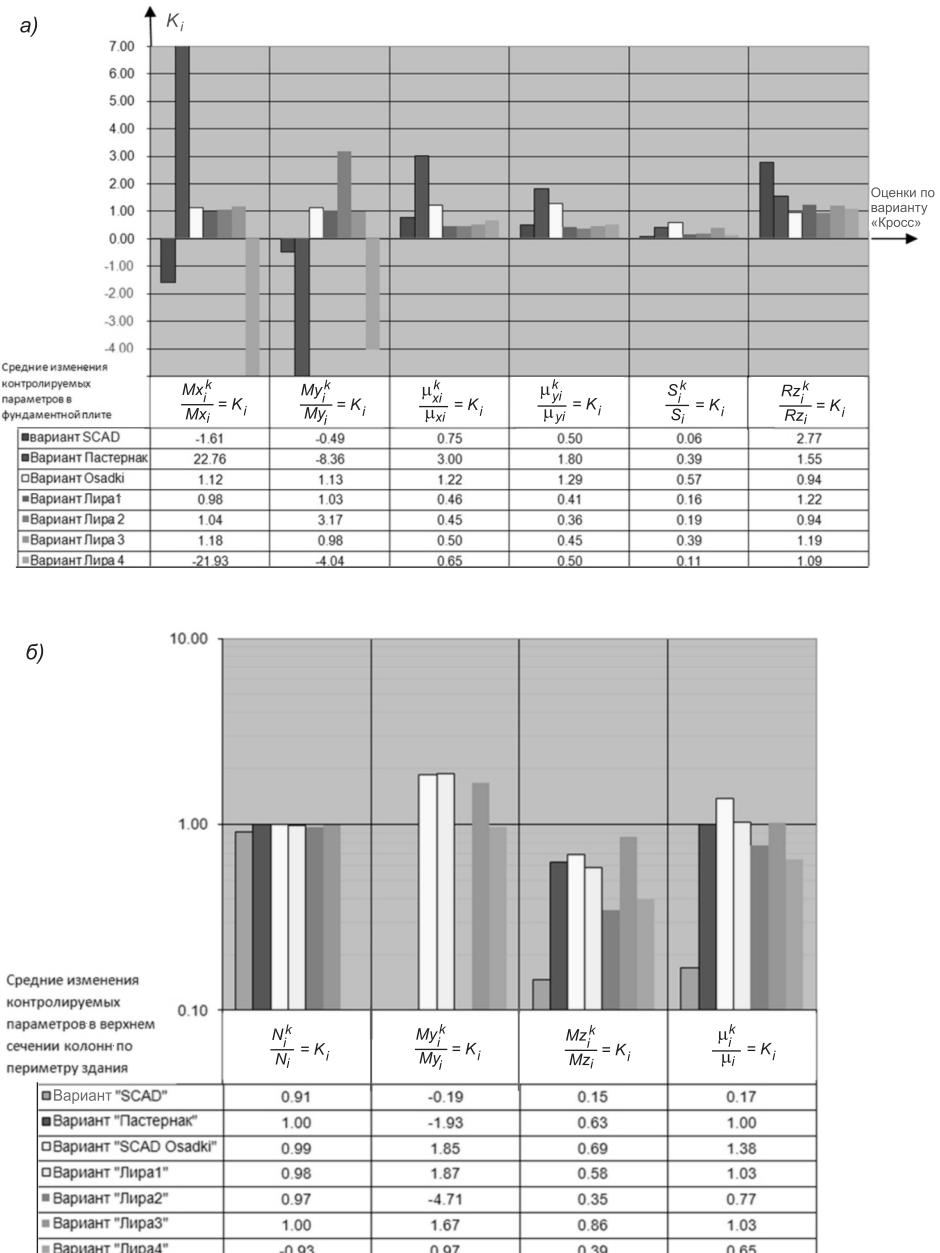


Рис. 6. Гистограммы оценок контролируемых параметров
а — в фундаментной плите; б — в колоннах нижнего этажа

Mx — изгибающий момент в плоскости XOZ ; My — изгибающий момент в плоскости YOZ ; Mz — изгибающий момент в плоскости XOY ; μ_x — процент армирования в направлении оси x ; μ_y — процент армирования в направлении оси y ; μ — процент армирования в колоннах; S — осадка фундаментной плиты; Rz — отпор грунтов под фундаментной плитой; N — продольная сила

Сопоставительные количественные оценки контролируемых параметров произведены относительно их значений, полученных по варианту «Кросс» по формуле

$$\frac{\beta_i^k}{\beta_i} = K_i, \quad (1)$$

где β_i^k — значения контролируемых параметров по варианту «Кросс»; β_i — значения контролируемых параметров по остальным вариантам.

По полученным значениям K_i построены гистограммы по оценке контролируемых параметров в колоннах и в фундаментной плите, примеры представлены на рис. 6, а, б. Как видно из приведенных гистограмм, влияние принятых вариантов моделей основания на НДС системы конструкции здания — фундамент—основания может оказаться весьма значительным. Например:

- разница оценок изгибающих моментов в фундаментной плите достигает 20 раз;
- оценки значений процентов армирования в ряде рассматриваемых зон фундаментной плиты отличаются в 1,5–3 раза;
- оценки осадок фундаментной плиты отличаются в 1,4–10 раз;
- разница оценок отпора грунтов под фундаментной плитой достигает трех раз;
- оценки изгибающих моментов в колоннах отличаются в 2–5 раз;
- оценки значений процентов армирования в колоннах отличаются в 1,3–5,9 раз.

Выводы. 1. Методы совместного расчета конструкций с основаниями в BK SCAD и «Лира», предлагаемые как варианты на выбор без четких критериев, могут привести к оценке напряженного и деформированного состояния конструкций, отличающихся в разы.

2. В связи с отсутствием в настоящее время общепризнанной единой методики совместного моделирования пространственных несущих систем зданий и сооружений с основаниями актуальным остается вариативный метод расчета с последующим выбором наиболее невыгодных сочетаний контролируемых параметров как наиболее надежный способ решения практических задач.

3. Расчетные сочетания усилий в сечениях конструкций рекомендуется получать как комбинации применения по крайней мере двух вариаций моделей:

— с однопараметрическими моделями оснований с вычислением коэффициентов сжатия C_i , дифференцированных для всех контактных элементов или их групп (можно использовать сателлиты «Кросс» (BK SCAD) и «Грунт» (BK «Лира», «метод 3»));

— с двухпараметрическими моделями оснований с обязательным применением законтурных элементов, например, можно использовать сателлиту «Пастернак» (BK SCAD).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пискунов, В.Г. Динамический метод контроля состояния слоистых плит на упругом основании [Текст] / В.Г. Пискунов, Ю.М. Федоренко // Архитектура и строительство Беларуси. — 1994. — № 5–6. — С. 19–22.
2. Федоров, Д.А. Решение контактной задачи для конечно-элементных моделей конструкций на деформируемом основании [Текст] / Д.А. Федоров // Науч. тр. общества железобетонщиков Сибири и Урала / Новосиб. гос. акад. стр-ва, Сиб. гос. акад.

путей сообщ. ; под ред. В.В. Габрусенко. — Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2002. — Вып. 7.

3. Федоровский, В.Г. Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит [Текст] / В.Г. Федоровский, С.Г. Безволов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2000. — № 4. — С. 10–18.
4. Шашкин, К.Г. Использование упрощенных моделей основания для решения задач совместного расчета основания и конструкций сооружений [электронный ресурс] / К.Г. Шашкин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. Интернет-журнал. — 1999. — № 1. — www.georec.spb.ru/journal/s/01/9.h/tm

ФЕДОРОВ Дмитрий Аполлонович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: dmfed@ngs.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

МОКЛЯК Константин Григорьевич, асп.; E-mail: korrshun@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено 28.10.11

Fedorov D.A., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: dmfed@ngs.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Moklyak K.G., post-graduate student; E-mail: korrshun@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

NUMERICAL RESEARCH OF PROBLEM UNITED CALCULATION CONSTRUCTIONS WITH FOUNDATION BY REALIZATIONS IN COMPUTING SYSTEMS SCAD AND LIRA

Consider the problem of united calculation constructions with foundation in modern computer systems. Present results of numerical experiment on the comparative evaluation of the proposed methods of calculation.

Key words: deformable foundation, model of Winkler, Pasternak model, modules of subgrade reaction.

REFERENCES

1. Пискунов, В.Г. Dynamic method of condition inspection of laminated plates on elastic foundation [Text] / V.G. Piskunov, Yu.M. Fedorenko // Architecture and Building of Belorussia. — 1994. — N 5–6. — P. 19–22.
2. Fedorov, D.A. The solution of the contact problem for finite-element models of structures in deformable foundation [Text] / D.A. Fedorov // Scientific Work of Society Constructing Engineers the Urals and Siberia / Novosibirsk State Academy of Civil Engineering, Siberian State Academy of Railway and Host ; Ed. V.V. Gabrusenko. — Novosibirsk : Publ. House NGASU, 2002. — N 7.
3. Fedorovskiy, V.G. Forecast sediment shallow foundation and the choice of foundation model for the calculation of the slabs [Text] / V.G. Fedorovskiy, S.G. Bezvolev // Foundations, Understructure and Soil Mechanics. — 2000. — N 4. — P. 10–18.
4. Shashkin, K.G. The use of simplified models of the foundations for solving the united calculation of the foundations and building structure / K.G. Shashkin // Reconstruction of Cities and Geotechnical Construction. Interent-journal. — 1999. — N 1.

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.А. ЖИЛКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕРЕВЯННОГО НАГЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА МОСТА МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

На основе метода голографической интерферометрии исследовано деформирование kleеного деревянного нагельного соединения.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, анизотропные материалы, концентрация деформаций, нагельное соединение.

Введение. При создании современных конструкций все более широкое применение находят анизотропные материалы: стеклопластики, армированные металлы, древеснослоистые плиты и т.д. Так, kleеные деревянные конструкции широко используются в мостостроении. Конкурентоспособность таких конструкций перед стальными и железобетонными объясняется рядом преимуществ: сравнительно малая масса, высокая коррозионная стойкость, долговечность, низкая эксплуатационная стоимость. В ряде случаев численный анализ деформированного состояния таких конструкций с учетом реальных граничных условий проводить либо трудно, либо невозможно. В связи с этим актуальной становится задача разработки экспериментальных методик, позволяющих с высокой точностью производить измерения деформаций вблизи геометрических концентраторов высоконагруженных элементов.

Для решения такого класса задач можно с успехом использовать контактные интерферометры, обладающие плавной регулировкой чувствительности, что позволяет проводить равноточные измерения перемещений вдоль главных осей упругости материалов с резко выраженной анизотропией, например древесины [1]. В данной работе приводятся результаты статических испытаний. Распространение полученных результатов на случай динамического (циклического) приложения нагрузки возможно с использованием динамических коэффициентов.

Контактный голографический интерферометр представляет собой совокупность исследуемой поверхности 6 и прикрепленной к ней с помощью оптически прозрачного слоя 5 высокоразрешающей регистрирующей среды 3, 4 (рис. 1, а) [5].

Крепление голографической пластинки 3, 4 с помощью промежуточной оптически прозрачной среды 5 (ПОС) обеспечивает: минимальный вес прижимного устройства (расход материала ПОС 0,1 г на 1 см² фотопластинки при толщине слоя около 1 мм); высокую виброзащищенность фоторегистрирующей среды (шумовые интерференционные полосы отсутствуют даже при записи голограмм размерами 30×40 см) [2].

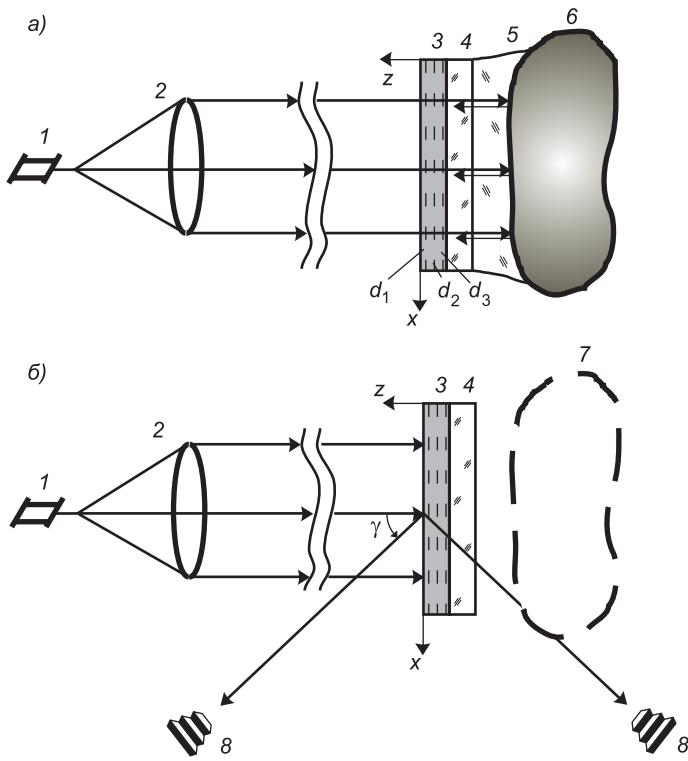


Рис. 1. Экспериментальные схемы записи (а) и восстановления (б) голограммических интерферограмм

1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — голограммическая фотоэмulsionия; 4 — стеклянная подложка; 5 — ПОС; 6 — объект; 7 — виртуальное изображение объекта; 8 — фотокамера

ПОС должна удовлетворять следующим требованиям: быть прозрачной в диапазоне длин волн используемого когерентного источника излучения; обладать малой пьезооптической чувствительностью; иметь модуль упругости на несколько порядков меньше, чем соответствующий параметр подложки регистрирующей среды и материала изделия; обладать изотропными оптико-механическими свойствами, постоянными во времени; обладать хорошей адгезией к стеклу и к образцу.

В контактном интерферометре трехмерная голограмма в отличие от двумерной однозначно воспроизводит фазу объектной волны, и как следствие этого отсутствует второе сопряженное изображение. Трехмерная голограмма воспроизводит также спектральный состав объектной волны, и по этой причине оказывается возможным восстановление изображения источником света со сплошным спектром (что особенно выгодно по энергетическим параметрам). Информация о фазе излучения содержится в форме пучностей стоячей волны d_1, d_2, \dots , а информация о спектре — в расстоянии между этими поверхностями (пучностями) (рис. 1, а). Важной особенностью трехмерной голограммы является ее полная обратимость, т.е. при восстановлении голограммы волной, обращенной по отношению к волне источника, голограмма восстановит единственную волну, обращенную по отношению к объектной волне.

В настоящей работе сделана попытка распространить использование контактных голограммических интерферометров [3] для анализа деформированного состояния плоских поверхностей оптически непрозрачных изделий, обладающих существенной анизотропией механических свойств.

1. Экспериментальная схема для записи и восстановления голограмм. Пусть плоская монохроматическая волна освещает исследуемую поверхность так, как показано на рис. 1. Направление наблюдения определяется углом γ , лежащим в плоскости xoz (рассмотрим плоский случай). Регистрируются только параллельные этому направлению отраженные от поверхности световые лучи. Если предварительно на поверхность образца нанести дифракционную решетку, то угол γ будет зависеть от ее частоты. В наших экспериментах применялся Не–Не лазер мощностью 50 мВт, излучающий свет TEM_{00} моды. В качестве регистрирующей среды применяли голограммические пластинки ПФГ-03, имеющие толщину более 15 мкм, что обеспечило высокую дифракционную эффективность голограммической интерферограммы.

На стадии восстановления (рис. 1, б) голограмма размещалась по нормали по отношению к освещающему пучку света. Так как объемная голограмма действует как интерференционный фильтр, источником света может быть как лазер, так и обычный источник белого света.

Для случая нормального освещения поверхности изделия связь между разностью хода интерферирующих лучей света и проекциями U и W вектора смещения Δr на оси координат x , z имеет вид

$$U \sin \gamma + W(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}) = (N_k + 1/2)\lambda, \quad (1)$$

где n — показатель преломления ПОС;

$N_k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots (k = 1, 2, 3, 4)$ — порядковый номер интерференционной полосы в рассматриваемой точке при различных направлениях наблюдения;

λ — длина волны источника света.

Комбинируя уравнения для интерференционных картин, наблюдаемых с двух симметричных относительно оси z направлений, получаем выражения для определения U и W :

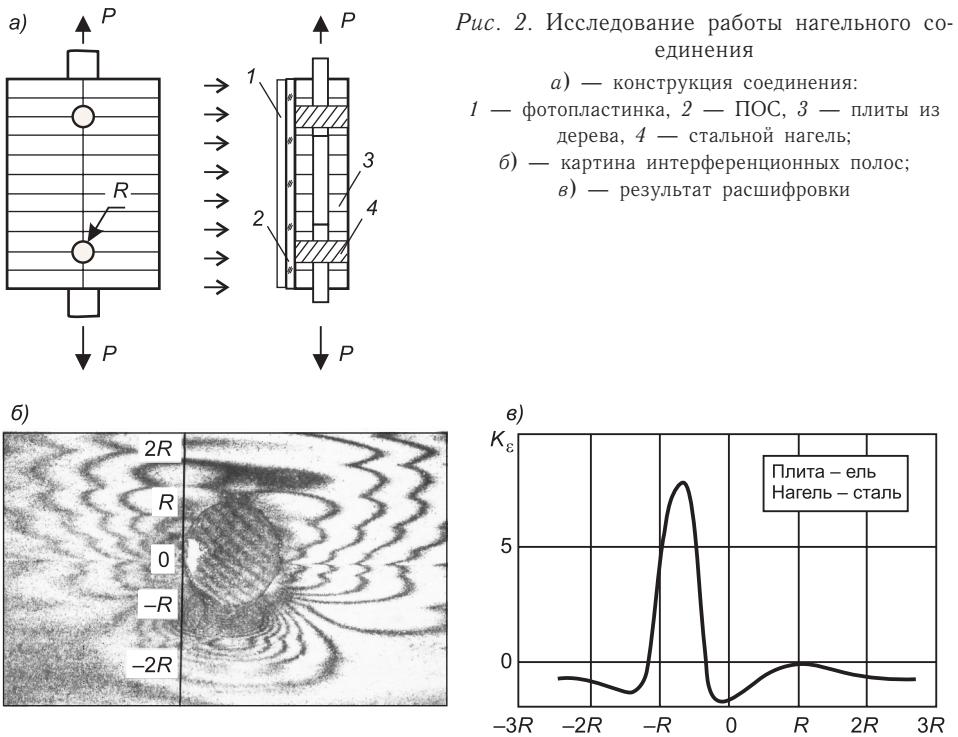
$$U = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2 \sin \gamma}, \quad (2)$$

$$W = \frac{(N_1 + N_2)\lambda}{2(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma})}. \quad (3)$$

Переход к компонентам тензора деформаций возможен либо с использованием соотношений Коши, либо путем решения краевой задачи с граничными условиями в виде перемещений.

2. Экспериментальные результаты. Проведено исследование распределения коэффициентов концентрации деформаций в различных сечениях соединения, состоящего из двух деревянных плит и металлического нагеля, представленного на рис. 2, а.

Плиты склеивались из брусков ели с квадратным поперечным сечением. Волокна древесины ориентированы вдоль клеевого слоя, а нагрузка прикладывалась перпендикулярно волокнам. Голограммы записывали методом двух экспозиций (рис. 2, б). Полученные данные о концентрации деформаций в сечении, касательном к нагелю, сопоставлялись с результатами работы [4]. Соответствие хорошее. Коэффициент концентрации K_ϵ деформаций вычисляли как отношение деформаций в сечении к деформации на удалении от нагеля.



Исследовалась также кинетика деформирования древесины вблизи нагеля. Было установлено, что клеевой слой вызывает примерно такое же искривление интерференционных полос, как и слои поздней (зимней) древесины. Если при малых нагрузках ($P_1 = 50$ Н, $P_2 = 70$ Н) анизотропия материала изделия проявляется слабо (рис. 3, б, в), то при $P_3 = 250$ Н существенными становятся сдвиговые деформации вдоль волокон (точнее — вдоль зимних слоев) (рис. 3, г). При этом зона интенсивного смятия древесины увеличивается вдоль поверхности нагеля и остается примерно постоянной в направлении приложения нагрузки.

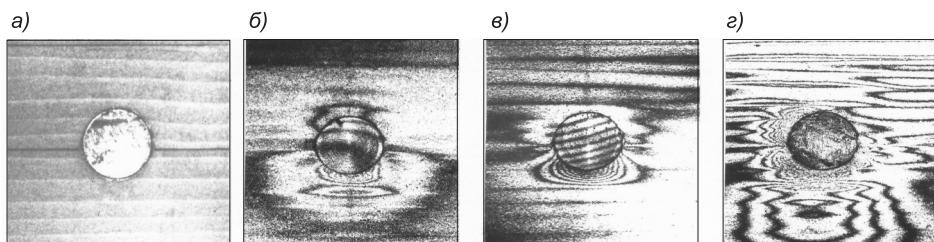


Рис. 3. Изучение кинетики деформирования нагельного соединения
а) — расположение годовых слоев; б) — нагрузка $P_1 = 50$ Н; в) — нагрузка $P_2 = 70$ Н; г) — нагрузка $P_3 = 250$ Н

Выводы. Впервые экспериментально подтверждена возможность проведения внестендовых испытаний образцов, обладающих существенной анизотропией механических свойств, с использованием голограммической интерферометрии. Разработаны методики приготовления ПОС, обеспечивающие стабильность оптико-механических свойств интерферометра во всем диапазоне регистрируемых смещений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жилкин, В.А. Способ исследования неоднородно деформированных зон изделий в реальном времени с использованием голограмм Ю.Н. Денисюка [Текст] / В.А. Жилкин, С.И. Герасимов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1983. — № 1. — С. 139–141.
2. Герасимов, С.И. Исследование процесса полимеризации прозрачного эластомера методом голографической интерферометрии [Текст] // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 6. — С. 101–104.
3. Zhilkin, V.A. Application of the superposed holographic interferometers to deformation measurement problems [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov, V.B. Zinovjev // Proc. SPIE. — 1989. — Vol. 1121. — P. 228–233.
4. Жилкин, В.А. Исследование смятия древесины в отверстии методом спекл-интерферометрии / [Текст] / В.А. Жилкин, А.Н. Бондаренко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1979. — № 10. — С. 44–48.

ГЕРАСИМОВ С.И., д-р техн. наук, проф.; E-mail: Gerasimov@stu.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
ЖИЛКИН В.А., д-р техн. наук, проф.
Челябинская государственная агротехническая академия

Получено 10.12.11

Gerasimov S.I., doctor of technical sciences, professor; E-mail: Gerasimov@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Zhilkin V.A., doctor of technical sciences, professor; Chelyabinsk State Agroengineering Academy, Russia

INVESTIGATION OF WOOD PLATES NAILED CONNECTION DEFORMED STATE OF BRIDGE ELEMENT BY THE CONTACT HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Anisotropic materials, such as fibreglasses, reinforced metals etc., are widely used in modern structures. In a number of cases numerical analysis of deformed state of this structures, taking into account the real bound conditions, is difficult or impossible. As a result the development of experimental methods for precise strain measurements near the geometric concentrators of specimens is becoming the actual task.

Key words: holographic interferometry, anisotropic materials, concentration of strains, nailed connection.

REFERENCES

1. Zhilkin, V.A. Investigation in real time the heterogeneous strain's zones in solids by the Denisuk holograms [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1983. — N 1. — P. 139–141.
2. Gerasimov, S.I. Investigation of cyclic stability of transparent elastomer by holographic interferometry [Text] / News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2006. — N 6. — P. 101–104.
3. Zhilkin, V.A. Application of the superposed holographic interferometers to deformation measurement problems [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov, V.B. Zinovjev // Proc. SPIE. — 1989. — Vol. 1121. — P. 228–233.
4. Zhilkin, V.A. Investigation of wood distortion in a hole by the speckle interferometry [Text] / V.A. Zhilkin, A.N. Bondarenko // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1979. — N 10. — P. 44–48.

УКАЗАТЕЛЬ

статьей, опубликованных в 2011 г. (с № 1 по № 12)

Теличенко В.И. Национальный исследовательский университет МГСУ

№ 10

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- Захаров А.В., Пономарев А.Б. Исследования работы энергетических фундаментов № 11
Коротких А.В., Гербер А.А., Крылов И.И. Особенности работы фермы с перекрестной решеткой из тонкостенных оцинкованных профилей № 10
Коротких А.В., Крылов И.И., Черкасов В.Г. Особенности работы двух- и трехболтовых фрикционных сдвигустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей № 2
Платонова С.В. Напряженно-деформированное состояние ленточного щелевидного фундамента № 1

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Дукарт А.В., Тхань Бинь Фам. О переходных режимах колебаний одномассовой системы с ударным гасителем при заданных начальных условиях № 6
Клочков Ю.В., Николаев А.П., Марченко С.С., Шубович А.А. Анализ оболочки вращения с ветвящимся меридианом на основе четырехугольного конечного элемента при различных вариантах интерполяции полей перемещений № 5
Крысько В.А., Жигалов М.В., Крылова Е.Ю. Исследование нелинейной динамики балок Бернулли – Эйлера под действием локальной нагрузки № 2
Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А. Идентификация свойств, геометрии ослаблений и граничных условий кусочно-однородных пластин № 1
Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Несущая способность слоистых стержней и рам при многопараметрическом динамическом воздействии. Сообщение 1 № 3
Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Несущая способность слоистых стержней и рам при многопараметрическом динамическом воздействии. Сообщение 2 № 4
Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Динамика слоистых рам из разносопротивляющихся материалов № 11
Немировский Ю.В., Янковский А.П. Анализ результатов расчетов поперечного деформирования сплошной несущей колонны высотного здания с учетом работы компенсаторов при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождении поверхностных волн № 1
Немировский Ю.В., Янковский А.П. Исследование особенностей динамического поведения разрезной несущей колонны высотного здания с учетом вязкоупругой работы комбинированных компенсаторов при горизонтальных сейсмических воздействиях № 6
Сеницкий Ю.Э. К решению динамической задачи для неоднородной конической оболочки с конечной сдвиговой жесткостью № 12
Шляхин Д.А. Осесимметричная задача теории упругости для круглой жестко закрепленной пластины № 7
Шутов В.А., Полуэктов В.А., Миренков В.Е. Восстановление физических характеристик кусочно-однородных пластин № 12

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Исследование фазовых превращений на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой глины № 10
Афанасьев С.В., Кузьмин И.В. Композиционные огнезащитные материалы для металлоконструкций № 1
Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Сеньков С.А. Наномодификации керамики из террикоников угольных шахт введением добавки коллоидного раствора олигопептидов № 8–9
Бердов Г.И., Ильина Л.В., Сухаренко В.А. Влияние совместного введения электролитов и минеральных добавок на прочность цементного камня на основе клинкера, хранившегося длительное время во влажных условиях № 4
Бердов Г.И., Никоненко Н.И., Ильина Л.В. Влияние высокодисперсных минеральных добавок на механическую прочность цементного камня № 12
Береговой В.А., Костин Д.С., Береговой А.М. Теплоизоляционная газостеклокерамика на основе кремнистых горных пород № 10

- Веселов А.В., Косач А.Ф., Берёзкина Ю.В., Антонова А.В., Кузнецов О.А.** Производство газогипса с использованием серной кислоты в качестве газообразователя № 5
- Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З.** Исследование фазового состава керамического кирпича на основе полиминеральной легкоплавкой глины и обожженных алюминиевых солевых шлаков № 5
- Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З.** К вопросу использования жидкостекольных композиций в производстве теплоизоляционных материалов № 11
- Завадская Л.В., Ильина Л.В., Бердов Г.И.** Газогипсовые материалы, армированные волокнистыми добавками № 7
- Игнатова А.М., Попов В.Л., Антонов Ю.Б., Вагин В.В., Игнатов М.Н., Чернов В.П., Ханов А.М.** Рациональные направления использования камнелитых изделий из синтетических минеральных сплавов в строительстве № 8-9
- Калашников В.И., Валиев Д.М., Гуляева Е.В., Володин В.М.** Высокопрочные порошково-активированные пропариваемые песчаные бетоны нового поколения № 5
- Калашников В.И., Гуляева Е.В., Валиев Д.М.** Влияние вида супер- и гиперпластификаторов на реотехнологические свойства цементно-минеральных суспензий, порошковых бетонных смесей и прочностные свойства бетонов № 12
- Клименко В.Г.** Активаторы твердения ангидрита на основе продуктов термообработки гипса № 4
- Ковков И.В., Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З., Куликов В.А.** Использование жидкостекольной композиции в производстве зернистого теплоизоляционного материала № 7
- Котляр В.Д.** Неравномерность керамического черепка компрессионного прессования на основе опоковидных пород № 1
- Куликов В.А., Абдрахимов В.З., Ковков И.В.** Исследование пористой структуры керамзита на основе отходов флотации углеобогащения № 1
- Кучерова Э.А., Сат Д.Х., Кара-Сал Б.К.** Цеолитсодержащая порода — полифункциональная добавка для производства керамических стеновых материалов № 8-9
- Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е.** Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций № 3
- Мардиросова И.В., Чан Н.Х., Балабанов О.А.** Модифицированное асфальтовое вяжущее повышенной стойкости к старению № 4
- Машкин Н.А., Себелев И.М., Каткова Т.Ф., Шаравин Ю.А.** Дисперсно-армированый керамический кирпич из пылеватых суглинков № 11
- Мирюк О.А.** Влияние вещественного состава на свойства сульфомагнезиальных композиций № 2
- Наумов А.А., Юндин А.Н.** Увеличение морозостойкости кирпича полусухого прессования минеральной модифицирующей добавкой № 8-9
- Низина Т.А., Кисляков П.А., Зимин А.Н., Низин Д.Р.** «Критическая» микротвердость как критерий структурной неоднородности строительных материалов № 4
- Перфилов В.А., Зубова М.О., Неизвестный Д.Л.** Применение базальтовых волокон и модифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик тяжелых бетонов № 12
- Раков М.А., Бердов Г.И., Ильина Л.В., Никоненко Н.И.** Влияние механической активации минеральных добавок на прочность цементного камня № 11
- Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М.** О влиянии знака поверхностного заряда заполнителя на разжижающую способность суперпластификаторов № 2
- Резанов А.А., Бедарев А.А.** Вопросы управления процессом порообразования в технологии газосиликата № 10
- Себелев И.М., Машкин Н.А., Шаравин Ю.А.** Обеспечение долговечности декоративных порошковых полимерных покрытий по фасадной керамике № 12
- Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Логинова Е.В., Селиванов В.М.** Теплоизоляционная керамика на основе малоэнергоемкого процесса вспенивания масс № 3
- Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Нукусова Г.Р., Козлов П.С.** Влияние концентрации фторид-ионов на свойства цементного бетона и арматурной стали № 7
- Столбоушкин А.Ю., Бердов Г.И.** Ресурсосберегающая комплексная переработка минерального техногенного сырья в производстве строительных материалов № 1
- Токарева С.А., Петров В.П.** Кинетика горения углерода в гранулах при обжиге глиноzemного керамзита во вращающихся печах № 5
- Файзиев Х., Шарипов Р.Р., Сайфиддинов С.С.** Результаты исследования динамических свойств фосфогипса № 6
- Федоров В.М., Питерский А.М.** Тонкодисперсные промышленные отходы в гидротехническом бетоне № 2

Фокин Г.А., Фолимагина О.В. Исследование влияния вихрехидинамического поля на свойства воды затворения и гипсового теста	№ 4
Хархардин А.Н. Расчет структурообразующих элементов и состава портландцементного пенобетона. Часть 1	№ 12
Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В., Черкасов Д.В. Активная минеральная добавка на основе химически модифицированного диатомита	№ 12
Черкасов В.Д., Дудынов С.В., Бузулуков В.И. Биомодификаторы строительного назначения	№ 6
Шахов С.А., Рудая Т.Л., Ключникова Н.С. Выбор параметров ультразвуковой активации вяжущего при приготовлении бетонов и растворов	№ 10
Юндин А.Н., Кучуев Е.В. О взаимодействии некоторых пенообразователей с насыщенным раствором гидроксида кальция	№ 3

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Авдеев В.П., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Техническая реализация поляризационного измерителя некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта для системы автоматического управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин	№ 11
Дедов А.С., Мельникова А.С., Попов Н.А., Ткаченко О.В., Абраменков Д.Э. Технология бестраншейной замены трубопроводов водоотведения	№ 12
Иванчура В.И., Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Поляков Т.Н. Модель системы автоматического управления дорожного катка на основе нечеткой логики	№ 11
Калугин Ю.Б. Прогнозирование сроков реализации проекта с помощью модели квазипараллельных работ	№ 3
Калугин Ю.Б. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами	№ 10
Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Климов А.С., Шилкин С.В. Реализация устройства с тензодатчиками асфальтоукладчика для управления процессом уплотнения	№ 6
Толочная Е.Б. Обоснование физической и разработка математической моделей динамики температурного и прочностного полей в бетоне при зимнем бетонировании конструктивных элементов сборно-монолитных каркасов зданий	№ 3
Чикирева Е.Ю. Расчетное обоснование технологии зимнего бетонирования одиночных колонн и плит перекрытий монолитных каркасов зданий с прогревным и беспрогревным выдерживанием бетона	№ 2

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Бомкин С.В., Сухно А.М. Классификация механизмов развития ненштатных ситуаций на грунтовых гидротехнических сооружениях в криолитозоне	№ 3
Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Оценка напряженного состояния турбинных водоводов методом граничных интегральных уравнений	№ 8-9
Дегтярев В.В., Плетнев А.С., Остапенко В.В., Бунтина М.В. Сравнение теории и эксперимента в задаче о разрушении плотины в прямоугольном русле с боковым сужением	№ 5
Дегтярев В.В., Тарасевич В.В., Кушнерова О.Н. Математическое моделирование условий формирования заторов льда на реках	№ 6
Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В., Канаш Н.С. Многоярусный гидроотвал в суровых климатических условиях	№ 5
Шабанов В.А., Логинов В.А. Исследование влияния сработки уровня воды в водохранилище на положение кривой депрессии	№ 5

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Батоева А.А., Асеев Д.Г., Сизых М.Р., Хандархаева М.С., Рязанцев А.А., Иващенко А.Т. Применение реакторов гидродинамической кавитации в технологиях очистки сточных вод	№ 5
Береговой А.М., Береговой В.А., Мальцев А.В., Петрянина М.А. Энергосбережение в жилых зданиях с большим сроком эксплуатации	№ 5
Береговой А.М., Береговой В.А., Мальцев А.В., Петрянина М.А. Тепловая эффективность наружных ограждений зданий при фазовых превращениях влаги	№ 12
Бодров М.В. Системы круглогодичной естественной вентиляции неотапливаемых животноводческих помещений	№ 3
Бочкарев Г.Р., Пушкирева Г.И., Коваленко К.А. Сорбционная очистка водных сред от мышьяка с использованием природного и модифицированного бруссита	№ 6

Войтов Е.Л., Сколубович Ю.Л. Технологии подготовки питьевой воды из источников с высоким содержанием органических соединений	№ 8-9
Казаков В.Д., Пельменёва Н.Д. Исследование влияния схемы размещения аэраторов на основные параметры и эффективность работы действующего аэротенка-вытеснителя	№ 6
Костин В.И., Русских Е.Ю. Анализ схем работы воздухонагревателей с помощью обобщающей формулы регулирования	№ 7
Костин В.И., Федоров Б.А. Проблемы расчета воздухообмена в помещениях с избыtkами теплоты в теплый период	№ 6
Кривошеин А.Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха	№ 4
Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Софарова О.В. Кинетика осаждения активного ила на синтетических водорослях в аэротенке	№ 7
Маклаков Д.В., Александров А.Ю., Посохин В.Н. К расчету течения над протяженным теплоисточником, снабженным двусторонним щелевым нижним отсосом	№ 2
Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Математическое моделирование конвективного теплообмена около стены здания в приближении пограничного слоя	№ 5
Машенков А.Н., Филимонов А.В. Практические аспекты надежности системы оперативного дистанционного контроля тепловых сетей	№ 2
Посохин В.Н., Кареева Ю.Р. Осесимметричная турбулентная струя в тупике	№ 3
Посохин В.Н., Кареева Ю.Р. Характеристики турбулентной плоской струи в тупике при разном расположении приточного и вытяжного отверстий	№ 7
Рафальская Т.А. Особенности совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения при высоких температурах наружного воздуха	№ 11
Самарин О.Д. Об аналитическом определении температурной эффективности пластинчатых перекрестноточных теплоутилизаторов	№ 2
Самарин О.Д., Азизская С.С. Принципы расчета нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными системами обеспечения микроклимата	№ 1
Самарин О.Д., Федорченко Ю.Д. Построение идентификационной модели процессов управления микроклиматом помещения	№ 12
Тарасевич В.В., Ли А.К. Эффективность обратных клапанов при аварийных режимах канализационного коллектора	№ 10
Уляшева В.М. Приближенное и численное моделирование тепловоздушных процессов в помещениях с источниками тепловыделения	№ 3
Уляшева В.М. К вопросу организации воздухообмена в помещениях с источниками тепловыделений	№ 8-9
Халтурина Т.И., Курилина Т.А., Чурбакова О.В. Исследование влияния вида гальванопары на эффективность процесса гальванокоагуляции сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов	№ 5
Халтурина Т.И., Курилина Т.А., Чурбакова О.В. Изучение структуры и химического состава осадка сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, с использованием растровой (сканирующей) электронной микроскопии	№ 6
Хромова Е.М. Сравнение модели и инженерной методики расчета оросительных камер кондиционеров воздуха	№ 5
Шацкий В.П., Гулевский В.А. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников	№ 12

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

Боровик В.С., Казачкова Л.О. Оценка влияния параметров улично-дорожной сети на энергозатраты транспорта	№ 10
Веник В.Н., Недавний О.И., Осипов С.П., Ковалев А.А. Совершенствование расчетного метода оценки удельной поверхности кубовидного щебня	№ 7
Волкова Е.А., Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Углова Е.В. О решении обратных задач строительной механики на основе данных натурного эксперимента	№ 2
Скоробогатченко Д.А. Методика прогнозирования эксплуатационного состояния автомобильных дорог на основе представления нечетких множеств нейронными сетями	№ 2
Сонг Ен Ун, Карапулов А.М. Расчет безопасного режима возведения дорожной насыпи на консолидирующемся основании	№ 3
Столбов Ю.В., Нагаев Д.О., Столбова С.Ю. Исследование точности высотного положения поверхности верхнего слоя покрытия автомобильных дорог	№ 4
Чан Н.Х., Мардиросова И.В., Балабанов О.А. Комплексно-модифицированный асфальтобетон повышенной стойкости к воздействиям жаркого и влажного климата	№ 7

Щербаков В.В., Барсук М.Н. Технология и приборы для определения ровности автомобильных дорог № 11

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

- Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Важенин С.В., Дроздов Н.М., Дюкарев А.И., Чичканов Р.В.** Физико-математическая модель дроссельно-клапанного пневмоударного механизма № 1
- Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Важенин С.В., Зверева А.С., Чичканов Р.В.** Физико-математическая модель пневмоударного механизма с управлением впуском воздуха в камеры рабочего и холостого хода № 3
- Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А.** Устройство цифровой обработки выходных сигналов координаторной системы для дистанционного управления землеройно-транспортными машинами № 10
- Дедов А.С., Зверева А.С., Абраменков Д.Э.** Влияние положения канала форсажа на рабочие характеристики дроссельного пневмоударного механизма с форсажем холостого хода № 6
- Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Лаптева И.В., Сургин В.В.** Научные аспекты выбора ремонтно-восстановительного состава для строительных машин и составляющих их узлов № 7
- Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Лаптева И.В., Сургин В.В.** Ремонтно-восстановительные составы и возможность их классификации № 8–9
- Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Лаптева И.В., Сургин В.В.** Гипотеза о механизме действия ремонтно-восстановительных составов на строительные машины и составляющих их узлы № 11
- Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Сургин В.В., Лаптева И.В.** Расчет количества ремонтно-восстановительного состава для двигателей строительной техники на примере коленчатого вала № 10
- Мельникова А.С., Дедов А.С., Грузин А.В., Абраменков Д.Э.** Развитие конструкций молотов для погружения свай в грунтовые среды: исторический аспект № 11
- Пермяков В.Б., Семенов А.С.** Аналитическое обоснование оптимальных параметров и формы вырезаемой стружки грунта самоходными скреперами № 4
- Чубаров Н.В., Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А.** Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением № 2
- Чубаров П.В., Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А.** Дроссельный пневмоударный механизм с эластичными дросселями впуска № 7

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

- Багрова Н.В.** Хронотопические фреймы архитектурно-критической мысли № 8–9
- Изнаирская Е.М., Долнаков А.П.** Структурно-функциональный потенциал главных городских магистралей как ресурс развития градостроительных систем № 6
- Кетова Е.В.** Основные принципы, механизмы и закономерности эволюции исторических городов Сибири (конец XVI — начало XX столетия) № 3
- Корзун А.В.** Региональное своеобразие культового зодчества Иркутска XVIII века № 10
- Кукина И.В.** «Искусство выживания»: некоторые аспекты концепции «идеального города» в XXI в. в зарубежных странах № 2
- Масленникова Д.С.** Возрождение монастырского строительства на Дальнем Востоке России № 6
- Петров Д.Г., Царёв В.И.** Прогнозы развития городов Центральной Сибири в конце XIX в. № 11
- Пуляевская Е.В.** Архитектурно-градостроительное наследие сельских поселений и принципы формирования исторических ландшафтов Предбайкалья № 8–9
- Пустоветов Г.И., Лихачев Е.Н.** Современные тенденции экологизации объектов сельской среды № 4
- Резун Д.Я., Каменецкий И.П.** Фортifikационные сооружения Кузнецка и его административной территории в XVII–XVIII вв. № 2
- Черных О.И.** «Историзм» как основа выбора архитектурного решения в культовой архитектуре Иркутска последней четверти XIX в. № 8–9
- Ямалетдинов С.Ф.** Параллельное градостроительство: организация проектирования закрытых городов атомной промышленности № 11

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Зверева А.С., Малышева Ю.Э.** Классификация признаков свайных молотов с пневмоприводом № 5

Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов	№ 7
Алешков Д.А., Кривошеин А.Д. Оценка звукоизоляции светопрозрачных конструкций с учетом приточных вентиляционных устройств	№ 3
Бадын Г.М., Мосаков Б.С. Принципы формирования энергосберегающих технологических систем в строительстве	№ 12
Виноградов А.Б., Виноградов С.А. Определение скорости перемещения контакта при линейном касании взаимоизгибающихся поверхностей	№ 4
Горшков Н.И., Краснов М.А. Сравнительная оценка устойчивости и несущей способности системы «штамп – основание» на основе расчетов МКЭ	№ 1
Готман Н.З., Каюмов М.З. Численное моделирование роста карстовой полости в карстующихся грунтах	№ 5
Грузин А.В., Абраменков Э.А. Обоснование и выбор оборудования для исследований взаимодействия штампов с грунтом	№ 4
Данилов А.М., Гарькина И.А. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения	№ 1
Дегтярев В.В., Плетнев А.С., Зыков В.В. Лабораторная установка и измерительный комплекс для исследования нестационарных водных потоков	№ 4
Дегтярев-мл. В.В., Чеботников А.В. Поле скорости при обтекании цилиндра, расположенного вблизи дна потока со свободной поверхностью	№ 10
Демешкин А.Г., Роллов Р.А., Шваб А.А. Исследование прочностных свойств базальтовых нитей применительно к производству неметаллической арматуры	№ 4
Добрачев В.М., Вольф Я.В. Распределение напряжений в сталежелезобетонных перфорированных балках	№ 1
Дукарт А.В., Вьет Нгок Фам, Тхань Бинь Фам. К определению свободных колебаний двухмассовой системы с демпфированием	№ 5
Ильдияров Е.В., Холопов И.С. Напряженно-деформированное состояние трехслойной кровельной панели с ортотропным средним слоем	№ 6
Кикоть А.А., Мурзин Е.В. Определение прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей	№ 2
Кользеев А.А. Сравнительная оценка коэффициентов продольного изгиба сжатых стальных стержней из труб	№ 3
Кононова М.С. Оценка снижения теплопотребления на отопление зданий при повышении сопротивления теплопередаче наружных ограждений	№ 8–9
Королев Д.Ю., Тертычный О.В., Семенов В.Н., Щукина Т.В. Фасадные краски нового поколения и температурный режим наружных ограждений при их применении	№ 1
Королев К.В. Начальная несущая способность медленно уплотняющегося водонасыщенного основания ленточного фундамента	№ 5
Криворотов А.П., Лубягин А.В., Бабелло В.А., Гришин Д.В. К вопросу об использовании сложных нелинейных моделей грунта	№ 4
Кургузов В.Д., Немировский Ю.В. Моделирование динамических процессов забивки или извлечения свай из грунта	№ 7
Локтионов А.П. Полиномиальная аппроксимация в экспериментально-расчетном методе оценки состояния конструктивного элемента	№ 11
Макаров В.Г., Синельникова Р.М., Косилова Д.В., Кучеренко А.Г. Расчет нестационарных температурных полей в стеклопластиковых футеровках	№ 4
Мойсейчик Е.А. Предельные состояния растянутых болтов и их учет в соединениях	№ 8–9
Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Критерии прочности, применяемые в зарубежной практике расчета и проектирования каменных конструкций	№ 6
Пантелеев Н.Н. Компенсационное устройство в каркасах многоэтажных зданий с применением вязкоупругой модели в стыках при строительстве в сейсмических районах	№ 8–9
Пантелеев Н.Н., Безгеммер Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических зданий при температурных воздействиях	№ 11
Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Балес А.А. Обоснование оптимальных условий ускоренных испытаний на внутреннюю коррозию	№ 11
Савков П.А., Лубягин А.В., Криворотов А.П. Оценка сжимаемости геокомпозитной среды	№ 8–9
Сапожников А.И., Григорьев С.М., Купчикова Н.В. Особенности работы балок на упругом основании	№ 10

- Себешев В.Г.** Комплексная оценка надежности конструкций с регулируемыми параметрами напряженно-деформированного состояния № 11
- Симанкина Т.Л., Ширко Н.В.** Оценка физического износа зданий с применением визуального моделирования дефектов № 7
- Столповский Г.А., Жаданов В.И., Гарипов В.С.** Применение методов планирования эксперимента при поиске оптимальных параметров винтового стержня, влияющих на усилие его выдергивания из массива древесины № 2
- Тарасевич В.В., Мороз А.А., Ли А.К.** Квазистационарный подход к описанию течения через местное сопротивление № 8-9
- Федоров Д.А., Мокляк К.Г.** Численное исследование задачи совместного расчета конструкций с основаниями по реализациям в вычислительных комплексах SCAD и «Лира» № 12
- Хархардин А.Н.** Модели потенциалов и сил парного взаимодействия микро- и наночастиц в дисперсных системах № 2
- Хархардин А.Н.** Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц № 5
- Хархардин А.Н.** Структурная топология дисперсных материалов сухого и мокрого способов измельчения. Часть 1. Размерный интервал критического размера наночастиц № 8-9
- Черных А.В., Черных В.В.** К оценке угловой скорости вращения жидкого металла при дуговой сварке в постоянном продольном магнитном поле № 10
- Швецов Г.И., Халтурина Л.В.** Структурно-фазовая деформируемость лесовых грунтов в природных условиях и в основаниях зданий и сооружений № 1
- Юзиков В.П., Завьялова О.Б.** Расчет тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности № 1

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

- Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В.** Экспериментальная апробация метода трансформаций эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе № 8-9
- Байджанов Д.О., Сихимбаев С.Р., Сихимбаев М.Р.** Мельница для получения тонкого и сверхтонкого помола № 6
- Герасимов С.И., Жилкин В.А.** Исследование деформирования деревянного нагельного соединения элемента моста методом контактной голограммической интерферометрии № 12
- Гришин Д.В.** Осадки штампа при изменении размеров области армирования песчаного основания № 11
- Енджиевский Л.В., Тарасов А.В.** Экспериментальные и численные исследования болтовых соединений стальных пластин при разных соотношениях их толщин № 7
- Лавров С.Н., Нуждин Л.В.** Сравнительный анализ результатов исследований дилатометром РД-100 с традиционными способами определения модуля деформации грунтов № 7
- Логунова М.А., Пешков А.С.** Экспериментальные исследования бетонных балок без организованных трещин и с заранее организованными трещинами № 1
- Носков И.В., Халтурин А.Ю.** Методика и результаты полевых испытаний винтовых свай № 1
- Украинченко Д.А., Жаданов В.И.** Особенности напряженно-деформированного состояния изгибаемых панелей с kleedощатой обшивкой № 3

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

- Косач А.Ф., Берёзкина Ю.В., Гутарева Н.А., Ванькова М.Н.** Технологические особенности применения интенсивной раздельной технологии керамзитобетона на комбинате строительных конструкций № 3
- Сухно А.М.** Разработка и внедрение автоматизированной системы дистанционного мониторинга на гидротехнических сооружениях в условиях Крайнего Севера № 4
- Талантова К.В., Михеев Н.М., Трошкин А.Н.** Практика создания конструкций на основе сталефибробетона с заданными эксплуатационными характеристиками № 10

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Головин Н.Г.** Новый учебник для студентов строительных вузов № 10

Российская академия архитектуры и строительных наук
Международная ассоциация строительных высших учебных заведений
Учебно-методическое объединение ВУЗов РФ по образованию в области строительства
ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
НИУ ГОУ ВПО Московский государственный строительный университет



IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Россия, Челябинск

19–22 июня 2012 года

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СИМПОЗИУМА

1. Моделирование жизненных циклов конструкций и сооружений на стадиях их возведения, нагружений, сопротивляемости прогрессирующему разрушению.
2. Нелинейные модели материалов, конструкций зданий и сооружений при проектировании, оптимизации и реконструкции.
3. Материалы и конструкции в нестационарных физических условиях при сложных воздействиях.
4. Моделирование повреждаемости и разрушения конструкций. Математические модели в системах мониторинга зданий и сооружений.
5. Возможности современных программных средств при анализе и проектировании строительных объектов. Решатели в задачах строительной механики. Проблемы и перспективы.
6. Дискуссия. Применение современных программных комплексов в учебном процессе: место классических методов прикладной механики (строительной механики) в образовательном процессе будущих инженеров-строителей; постановка задачи — анализ результатов.

Программа симпозиума.

Программа симпозиума включает в себя устные и стеновые доклады. Стеновые доклады могут быть размещены в первый день работы симпозиума. В рамках симпозиума предполагается организация «круглых столов» для обсуждения актуальных проблем и достижений в области компьютерного моделирования конструкций и сооружений.

Публикация материалов.

По рекомендации Программного комитета развернутые доклады будут изданы в журнале «Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». Англоязычные версии докладов могут быть опубликованы в международном рецензируемом журнале *«International Journal for Computation Civil and Structural Engineering»*.

Условия регистрации, оплаты участия и правила оформления тезисов докладов — на WEB-сайтах ЮУрГУ и МГСУ,

WEB-сайт ЮУрГУ: www.susu.ac.ru/ru/f/as/APCSCE, **WEB-сайт МГСУ:** www.mgsu.ru

Контакты: Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» и «Строительная механика».

Телефоны: +7 (351) 267-90-00 (каф. строительной механики, заведующий кафедрой Потапов Александр Николаевич),
+7 (351) 267-92-94 (каф. СКИС, заведующий кафедрой Сабуров Валерий Федорович),
+7 (902) 867-11-95 (секретарь оргкомитета Гусева Наталья Владимировна)

ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ КАМНЕДРОБЛЕНИЯ

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

Разработаны составы ячеистого бетона на дисперсных отходах камнедробления альбитофировых и диабазовых горных пород, на основе которых получен газобетон по плотности марок D600, D700 и по прочности классов В1,5 В2 при использовании в качестве вяжущего портландцемента M400 D20. Также возможно изготовление теплоизоляционных газобетонных изделий марки D400.

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

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

Автор разработки Л.В. ЗАВАДСКАЯ, канд. техн. наук

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

E-mail:ntio-ngasu@yandex.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел.\факс: (8-383)-266-28-89

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

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 статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организациии. 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 Сыг 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 (ставлять 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. Иллюстрации, в том числе фотографии, 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 иллюстраций 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).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2012 г. — из расчета 650 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 и 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 2012 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 — 1440 р.

Цена отдельного номера — 240 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

*Редакция поздравляет
авторов и читателей нашего журнала
с Новым 2012 годом, желает им успехов,
а также выражает признательность организациям,
оказавшим в 2011 году поддержку журналу:
высшим учебным заведениям, входящим
в Международную Ассоциацию строительных вузов;
ООО «СМУ-4», г. Уфа (ген. директор И.Ш. Гамбури);
ООО «Инжиниринг Строй», г. Сургут (директор Н.Ф. Худяк);
ООО «ГСИ-Строитель», г. Тула (ген. директор А.Б. Титов).*

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 12 (636) 2011

Научно-теоретический журнал

Редакторы: С.М. Погудина, Т.П. Петроченко
Технический редактор Н.М. Макаренко
Компьютерная верстка Р.Г. Усова
Корректор Г.И. Шведкина