

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

№ 7 (631)  
Июль 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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 05.09.11. Формат 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 545.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Шляхин Д.А. Осесимметричная задача теории упругости для круглой жестко закрепленной пластины ... 3

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшина Л.И., Седова А.А., Нуугаева Г.Р., Козлов П.С. Влияние концентрации фторид-ионов на свойства цементного бетона и арматурной стали ..... 10

- Завадская Л.В., Ильина Л.В., Бердов Г.И. Газогипсовые материалы, армированные волокнистыми добавками ..... 16

- Ковков И.В., Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З., Куликов В.А. Использование жидкостекольной композиции в производстве зернистого теплоизоляционного материала ..... 21

### САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

- Посохин В.Н., Кареева Ю.Р. Характеристики турбулентной плоской струи в тупике при разном расположении приточного и вытяжного отверстий ... 27

- Костин В.И., Русских Е.Ю. Анализ схем работы воздухонагревателей с помощью обобщающей формулы регулирования ..... 34

- Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Софарова О.В. Кинетика осаждения ак-

тивного ила на синтетических водорослях в аэротенке .....	40
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ</b>	
<b>Веник В.Н., Недавний О.И., Осипов С.П., Ковалев А.А.</b> Совершенствование расчетного метода оценки удельной поверхности кубовидного щебня .....	46
<b>Чан Н.Х., Мардиросова И.В., Балабанов О.А.</b> Комплексно-модифицированный асфальтобетон повышенной стойкости к воздействиям жаркого и влажного климата	54
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Чубаров П.В., Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А.</b> Дроссельный пневмоударный механизм с эластичными дросселями впуска .....	62
<b>Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Лаптева И.В., Сургин В.В.</b> Научные аспекты выбора ремонтно-восстановительного состава для строительных машин и их узлов .....	68
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Адищев В.В., Березина Э.В., Н.В. Ершова.</b> Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов .....	73
<b>Кургузов В.Д., Немировский Ю.В.</b> Моделирование динамических процессов забивки или извлечения свай из грунта .....	82
<b>Симанкина Т.Л., Ширко Н.В.</b> Оценка физического износа зданий с применением визуального моделирования дефектов .....	91
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Енджеевский Л.В., Тарасов А.В.</b> Экспериментальные и численные исследования болтовых соединений стальных пластин при разных соотношениях их толщин ..	98
<b>Лавров С.Н., Нуждин Л.В.</b> Сравнительный анализ результатов исследований дилатометром РД-100 с традиционными способами определения модуля деформации грунтов .....	108

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Д.А. ШЛЯХИН

## ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ КРУГЛОЙ ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ

Построено новое замкнутое решение осесимметричной задачи теории упругости для круглой толстой пластины с жестким закреплением ее внешней радиальной поверхности. Используются смешанные краевые условия для криволинейной плоскости, позволяющие получить достаточно простые расчетные соотношения. Новое замкнутое решение построено методом разложения по собственным вектор-функциям в форме структурного алгоритма конечных преобразований. Полученные соотношения позволяют определять напряженно-деформированное состояние исследуемого элемента.

Ключевые слова: осесимметричная нагрузка, толстая анизотропная пластина.

**Введение.** Элементы конструкций в виде круглых пластин широко применяются в различных областях промышленности. В строительстве они используются в резервуаростроении, а также в качестве перекрытий и защитных сооружений зданий специального назначения, используемых на АЭС и ГЭС. Кроме того, они являются активными элементами при конструировании пьезокерамических преобразователей.

Исследование напряженно-деформированного состояния круглых толстых анизотропных пластин в рамках теории упругости связано с проблемой интегрирования сложной системы дифференциальных уравнений и удовлетворения краевых условий. Наиболее эффективным математическим аппаратом, позволяющим преодолеть данные трудности, является метод разложения по собственным вектор-функциям. В работе [1] при анализе изотропного цилиндра на основании принципа суперпозиций используется набор частных решений, который с заданной точностью удовлетворяет краевым условиям с помощью бесконечной системы линейных алгебраических уравнений.

В настоящей работе рассматривается круглая толстая пластина с жестким закреплением ее внешней радиальной поверхности при действии осесимметричной нагрузки. В отличие от традиционно используемых условий в заделке, записываемых в перемещениях, рассматриваются смешанные краевые условия, что позволяет получить более простые по сравнению с построенными решениями [1] расчетные соотношения.

Данное исследование проведено для элемента с гексагональной кристаллической структурой, имеющей ось симметрии в аксиальной плоскости, которой соответствует большое количество материалов и сплавов [2].

**1. Постановка задачи.** Пусть круглая сплошная пластина, занимающая в цилиндрической системе координат  $(r_*, \theta, z_*)$  область  $\Omega: \{0 \leq r_* \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq z_* \leq h\}$ , представляет линейно-упругое анизотропное тело. Рассматривается случай, когда внешние радиальные

$(r_* = b)$  плоскости элемента жестко закреплены, а на его торцевую поверхность ( $z_* = h$ ) действует осесимметрическая нагрузка (нормальные напряжения)  $q^*(r_*)$ .

Система дифференциальных уравнений, граничные условия рассматриваемой задачи теории упругости в цилиндрической системе координат и безразмерной форме имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} C_{11}\nabla_1^2 U + C_{55}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + (C_{13} + C_{55})\frac{\partial^2 W}{\partial r \partial z} &= 0, \\ C_{55}\nabla_2^2 W + C_{33}\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + (C_{13} + C_{55})\nabla \frac{\partial U}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$r = 0, 1, \quad U(0, z) < \infty, \quad W(0, z) < \infty, \quad U(1, z) = 0, \quad W(1, z) = 0; \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} z = 0, L, \quad \sigma_{zz|z=L} &= \frac{C_{13}}{C_{11}}\nabla U + \frac{C_{33}}{C_{11}}\frac{\partial W}{\partial z} = q(r), \\ \sigma_{zz|z=0} &= \frac{C_{13}}{C_{11}}\nabla U + \frac{C_{33}}{C_{11}}\frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad \sigma_{rz|r=0,L} = \frac{C_{55}}{C_{11}}\left(\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z}\right) = 0, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\sigma_{j,k}(r_*, z_*)$ ,  $U^*(r_*, z_*)$ ,  $W^*(r_*, z_*)$  — соответственно компоненты тензора механических напряжений и вектора перемещений ( $j, k = r, z$ );

$\rho$ ,  $C_{ms}$  — объемная плотность и модули упругости ( $m, s = 1, 5$ ),

$\{U, W, r, z, L\} = \{U^*, W^*, r_*, z_*, h\}/b$ ;

$$q(r) = q^*(r)/C_{11}, \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}, \quad \nabla_1^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2}, \quad \nabla_2^2 = \nabla_1^2 + \frac{1}{r^2}.$$

Соотношения (1.1)–(1.3) и представляют математическую формулировку рассматриваемой краевой задачи теории упругости.

**2. Построение общего решения.** Для построения решения данной задачи методом конечных интегральных преобразований Фурье–Бесселя [4] по координате  $r$  равенства (1.1)–(1.3) приводятся к стандартной форме, позволяющей провести процедуру разделения переменных. Для этой цели функции  $U$ ,  $W$  представляются в виде следующих разложений:

$$U(r, z) = (r - r^3)q(r) + u(r, z), \quad (2.1)$$

$$W(r, z) = A_0 + \frac{C_{11}}{C_{55}}\frac{r^2}{2}K(z) + w(r, z),$$

а последнее краевое условие (1.2) заменяется на равенство

$$\sigma_{rz|r=1} = \frac{C_{55}}{C_{11}}\left(\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z}\right) = K(z), \quad (2.2)$$

где  $K(z) = K^*(z)/C_{11}$ ,  $K^*(z)$ ,  $A_0$  — соответственно касательные напряжения, приложенные к боковой поверхности пластины, и постоянная величина, определяемые в процессе решения задачи из условия отсутствия вертикальных перемещений при  $r = 1$ .

Функция  $K(z)$  должна удовлетворять следующим зависимостям:

$$\int_0^L K(z) dz = - \int_0^1 q(r) r dr, \quad K(0) = K(L) = 0. \quad (2.3)$$

Первое равенство является условием уравновешенности пластины при действии осесимметрической нагрузки, а последующие удовлетворяют закону парности касательных напряжений при  $r = 1$ ,  $z = 0, L$ .

В результате подстановки (2.1) в (1.1)–(1.3), (2.2) получаем новую краевую задачу относительно функций  $u(r, z)$ ,  $w(r, z)$ . Дифференциальные уравнения (1.1) и первые два граничные условия (1.3) становятся неоднородными с правыми частями  $F_1$ ,  $F_2$  и  $N_1$ ,  $N_2$ , а условия (1.2) с учетом (2.2) при  $r = 1$  принимают вид

$$u(1, z) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0. \quad (2.4)$$

В преобразованных равенствах

$$\begin{aligned} F_1 &= -\nabla^2[(r - r^3)q(r)] - \frac{C_{13} + C_{55}}{C_{55}}r \frac{\partial K(z)}{\partial z}, \\ F_2 &= -2K(z) - \frac{C_{33}}{C_{55}} \frac{r^2}{2} \frac{d^2 K(z)}{\partial z^2}, \\ N_1(r, L) &= q(r) - \frac{C_{13}}{C_{11}} \nabla[(r - r^3)q(r)] - \frac{C_{13}}{C_{11}} \frac{r^2}{2} \frac{dK(z)}{dz} \Big|_{z=L}, \\ N_2(r, 0) &= -\frac{C_{13}}{C_{11}} \nabla[(r - r^3)q(r)] - \frac{C_{33}}{C_{11}} \frac{r^2}{2} \frac{dK(z)}{dz} \Big|_{z=0}. \end{aligned}$$

К краевой задаче относительно  $u(r, z)$ ,  $w(r, z)$  применяем преобразование Фурье–Бесселя с конечными пределами по переменной  $r$ , используя трансформанты

$$u_H(j_n, z) = \int_0^1 u(r, z) r J_1(j_n r) dr, \quad w_H(j_n, z) = \int_0^1 w(r, z) r J_0(j_n r) dr \quad (2.5)$$

и формулы обращения

$$u(r, z) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_H(j_n, z)}{J_0(j_n)^2} J_1(j_n r), \quad w(r, z) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{w_H(j_n, z)}{J_0(j_n)^2} J_0(j_n r). \quad (2.6)$$

В равенствах (2.5), (2.6)  $j_n$  — корни такого трансцендентного уравнения

$$J_1(j_n) = 0 \quad (n = \overline{1, \infty}; \quad j_0 = 0), \quad (2.7)$$

$J_k(\dots)$  — обыкновенные функции Бесселя 1-го рода порядка  $k$ .

В пространстве изображений получаем следующую краевую задачу:

$$\begin{aligned} -j_n^2 u_H + \frac{C_{55}}{C_{11}} \frac{d^2 u_H}{dz^2} - \frac{C_{13} + C_{55}}{C_{11}} j_n \frac{dw_H}{dz} &= F_{1H}, \\ -\frac{C_{55}}{C_{11}} j_n^2 w_H + \frac{C_{33}}{C_{11}} \frac{d^2 w_H}{dz^2} + \frac{C_{13} + C_{55}}{C_{11}} j_n \frac{du_H}{dz} &= F_{2H}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} z = 0, L, \quad \frac{C_{13}}{C_{11}} j_n u_H + \frac{C_{33}}{C_{11}} \frac{dw_H}{dz} &= \{N_{1H}(j_n, L), N_{2H}(j_n, 0)\}, \\ \frac{du_H}{dz} - j_n w_H &= 0, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где

$$F_{1H} = \int_0^1 F_1 r J_1(j_n r) dr, \quad \{F_{2H}, N_{1H}, N_{2H}\} = \int_0^1 \{F_2, N_1, N_2\} r J_0(j_n r) dr.$$

В случае, когда  $n = 0$ , трансформанта  $w_H$  определяется равенством

$$w_H(j_0, z) = \frac{C_{11}}{8C_{55}} K(z) - \frac{C_{11}}{C_{33}} \int_0^z K(\xi)(z-\xi)d\xi. \quad (2.10)$$

При  $n \neq 0$  система уравнений (2.8) приводится к следующему разрешающему уравнению относительно  $w_H$ :

$$\frac{d^4 w_H}{dz^4} + a_{1n} \frac{d^2 w_H}{dz^2} + a_{2n} w_H = F_H, \quad (2.11)$$

где

$$a_{1n} = \frac{C_{13}(C_{13} + 2C_{55}) - C_{11}C_{33}}{C_{33}C_{55}} j_n^2, \quad a_{2n} = \frac{C_{11}}{C_{33}} j_n^4,$$

$$F_H = \frac{C_{11}}{C_{33}} \frac{d^2 F_{2H}}{dz^2} - \frac{C_{11}^2}{C_{33}C_{55}} j_n^2 F_{2H} - \frac{C_{11}(C_{13} + C_{55})}{C_{33}C_{55}} j_n \frac{d^2 F_{1H}}{dz},$$

Для металлических сплавов и керамических материалов, как правило, выполняется соотношение коэффициентов  $a_{1n}^2 < 4a_{2n}$ . В этом случае общий интеграл дифференциального уравнения (2.11) имеет вид

$$w_H(j_n, z) = \exp(\chi_n z) [D_{1n} \cos(\beta_n z) + D_{2n} \sin(\beta_n z)] + \exp(-\chi_n z) [D_{3n} \cos(\beta_n z) + D_{4n} \sin(\beta_n z)] + [2\chi_n \beta_n (\chi_n^2 + \beta_n^2)]^{-1} \int_0^z F_H(\xi) \{\chi_n \operatorname{ch}[\chi_n(z-\xi)] \times$$

$$\times \sin[\beta_n(z-\xi)] - \beta_n \operatorname{sh}[\chi_n(z-\xi)] \cos[\beta_n(z-\xi)]\} d\xi. \quad (2.12)$$

Здесь

$$\chi_n = \frac{1}{2} \left[ 2(a_{2n})^{\frac{1}{2}} - a_{1n} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \beta_n = \left[ \frac{a_{1n}}{2} + \chi_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Выражение для  $u_H$ , полученное в результате приведения (2.8) к (2.11), имеет вид

$$u_H(j_n, z) = b_{1n} \frac{d^3 w_H}{dz^3} + b_{2n} \frac{d w_H}{dz} + b_{3n} F_{1H} + b_{4n} \frac{d F_{2H}}{dz}, \quad (2.13)$$

где

$$b_{1n} = \frac{C_{33}C_{55}}{C_{11}(C_{13} + C_{55})j_n^3}, \quad b_{2n} = \frac{C_{13}(C_{13} + 2C_{55})}{C_{11}(C_{13} + C_{55})j_n},$$

$$b_{3n} = -j_n^{-2}, \quad b_{4n} = \frac{C_{55}}{(C_{13} + C_{55})j_n^3}.$$

Подстановка (2.12), (2.13) в краевые условия (2.9) позволяет определить постоянные интегрирования  $D_{1n}...D_{4n}$ .

**3. Расчетные соотношения.** Применяя к трансформантам (2.10), (2.12), (2.13) формулы обращения (2.6), получаем с учетом (2.1) следующие разложения для  $U(r, z)$ ,  $W(r, z)$ :

$$U(r, z) = (r - r^3) q(r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_H(j_n, z)}{J_0(j_n)^2} J_1(j_n r), \quad (3.1)$$

$$W(r, z) = A_0 + \frac{C_{11}}{C_{55}} \frac{r^2}{2} K(z) + 2w_H(j_0, z) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{w_H(j_n, z)}{J_0(j_n)^2} J_0(j_n r).$$

Заключительным этапом данного исследования является определение постоянной  $A_0$  и функции  $K(z)$ , которую для упрощения расчета можно представить в виде многочлена

$$K(z) = \sum_{k=1}^m A_k z^{m-k}. \quad (3.2)$$

Следует обратить внимание, что в работе [1] при исследовании напряженно-деформированного состояния круглых пластин для лучшего схождения бесконечных рядов нарушалось условие парности касательных напряжений в угловых точках ( $r = 1, z = 0, h$ ), справедливое для симметричной теории упругости. В настоящем исследовании данный недостаток удается преодолеть.

Равенство вертикальных перемещений  $W(1, z)$  в  $m - 2$  точках по высоте сечения

$$W(1, z_1) = W(1, z_2) = \dots = W(1, z_{m-2}),$$

а также условия (2.3) позволяют сформировать с учетом (3.1), (3.2) систему неоднородных алгебраических уравнений относительно постоянных  $A_1 \dots A_m$ . Величина  $A_0$  определяется из условия равенства нулю  $W(1, z)$  в одной из рассматриваемых точек.

Разложения (3.1) удовлетворяют исходным дифференциальным уравнениям (1.1), краевым условиям (1.2), (1.3) (последнему условию (1.2) с заданной точностью) и являются замкнутым решением рассматриваемой краевой задачи.

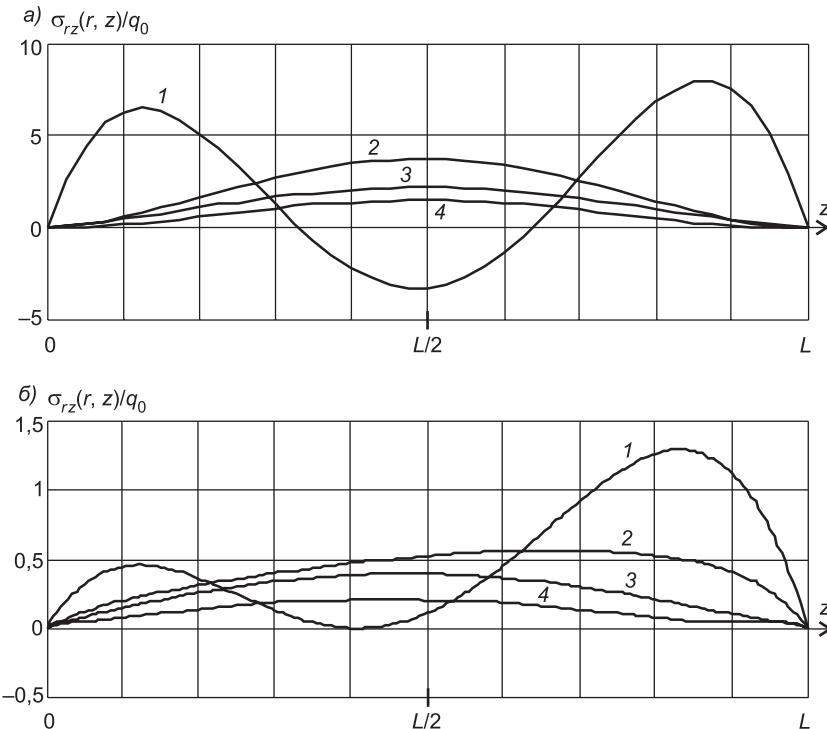


Рис. 1. Изменение касательных напряжений  $\sigma_{rz}$  по высоте пластины при  $L = 0,2$  (a) и  $L = 1$  (б)  
1 —  $r = 1$ ; 2 —  $r = 0,75$ ; 3 —  $r = 0,5$ ; 4 —  $r = 0,25$

**5. Численный анализ результатов.** В качестве примера рассматривается пластина, выполненная из керамики состава  $\text{PbTiO}_3$  ( $\rho = 7,73 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), при следующих значениях упругих постоянных:  $\{C_{11}, C_{13}, C_{33}, C_{55}\} = \{10,9; 5,4; 9,3; 2,4\} \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .

На рис. 1 приведены графики изменения касательных напряжений  $\sigma_{rz}$  по высоте пластины для случаев  $L = 0,2; 1$ . Расчеты выполнялись при действии равномерно распределенной нагрузки интенсивностью  $q_0$ . Цифрами 1–4 обозначены результаты при  $r = 1; 0,75; 0,5; 0,25$ . Так, в областях, удаленных от защемленного края, касательные напряжения имеют вид квадратной параболы. В тонких пластинах ( $L = 0,2$ ) только непосредственно в заделке данный закон меняется со смещением максимальных величин к торцевым поверхностям и значительным увеличением численных значений. В толстых элементах ( $L = 1$ ) эта особенность наблюдается и при  $r = 0,75$ .

Графики изменения вертикальной компоненты вектора перемещений « $W(r, z) \dots r$ » приведены на рис. 2 ( $L = 1$ ) соответственно для случаев  $z = L, L/2, 0$  (кривые 1–3). Разница в численных значениях характеризует сжатие пластины по высоте сечения.

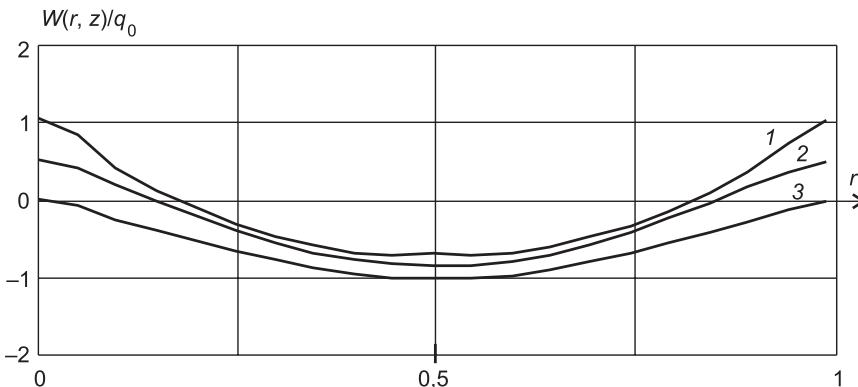


Рис. 2. Зависимость вертикальной компоненты вектора перемещений пьезокерамической пластины от радиальной координаты при  $L = 1$   
 1 —  $z = L$ ; 2 —  $z = \frac{L}{2}$ ; 3 —  $z = 0$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пространственные задачи теории упругости и пластичности [Текст] / под ред. А.Н. Гузя. — Киев : Наук. думка, 1985. — Т. 3. — 280 с.
2. Баранов, М.А. Атомно-дискретное описание влияния анизотропных взаимодействий на упругие свойства ГПУ металлов [Текст] / М.А. Баранов, Е.А. Дубов, И.В. Дятлов, Е.В. Черных // Физика твердого тела. — 2004. — Т. 46, вып. 2. — С. 212–217.
3. Снеддон, И.Н. Классическая теория упругости [Текст] / И.Н. Снеддон, Д.С. Берри. — М. : Наука, 1961. — 219 с.
4. Снеддон, И.Н. Преобразования Фурье [Текст] / И.Н. Снеддон. — М. : Изд-во иностр. лит., 1955. — 668 с.

ШЛЯХИН Д.А., канд. техн. наук, доц.; E-mail: sgasu@sgasu.smr.ru  
 Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 11.07.11

**Shljakin D.A.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: sgasu@sgasu.smr.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

### **AXISYMMETRIC PROBLEM OF THE ELASTICITY THEORY FOR THE ROUND RIGID FIXED PLATE**

The new closed solution of axially symmetric problem of the theory of elasticity for thick round plate with rigid of its external radial surface is constructed. Mixed boundary conditions are used for cammed plane, allowing to get quite simple design ratios. The new closed solution is constructed by method of expansion in eigen vector-functions in the form of structural algorithm of finite transformations. The received parities allow to define the stress-strain state of the testing element.

**Key words:** axially symmetric stress, thick anisotropic plate.

#### REFERENCES

1. Spatial problems of the theory of elasticity and plasticity [Text] / Ed. by A.N. Guz. — Kiev : Scien. of Dumka, 1985. — V. 3. — 280 p.
  2. Baranov, M.A. Atomic-discrete description of influence of anisotropic interactions on elastic properties of HCP metals [Text] / M.A. Baranov, E.A. Dubov, I.V. Djatlov, E.V. Chernych // FTT. — 2004. — V. 46, N 2. — P. 212–217.
  3. Sneddon, I.N. The Classical Theory of Elasticity [Text] / I.N. Sneddon, D.S. Berry. — M. : Science, 1961. — 219 p.
  4. Sneddon, I.N. Fourier Transformations [Text] / I.N. Sneddon. — M. : Publ. house the foreign lit., 1955. — 668 p.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.32:620.197

В.П. СЕЛЯЕВ, А.К. ОСИПОВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА,  
А.А. СЕДОВА, Г.Р. НУГАЕВА, П.С. КОЗЛОВ

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФТОРИД-ИОНОВ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА И АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

Исследовано влияние фторид-ионов на повышение прочности цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой, и коррозионную стойкость арматурной стали, рассмотрены два метода обработки фторид-ионами цементных композитов.

**Ключевые слова:** наполнитель, концентрация, пропитка, прочность, коррозионная стойкость.

Содержание ионов фтора в питьевой и технической воде ряда регионов превышает предельно допустимую концентрацию в несколько раз. Избыточное содержание фтора в питьевой воде приводит к развитию у людей фтороза и изменениям в костях скелета. К сожалению, влияние ионов фтора на железобетонные конструкции практически не изучено. Но по аналогии можно предположить, что ионы фтора, воздействуя на гидрат окиси кальция, будут ухудшать свойства цементного камня. Эта гипотеза была подтверждена экспериментально в работах ученых Мордовского государственного университета [1, 2].

Учитывая, что ионы фтора могут образовывать прочные катионные комплексы с алюминием, было предложено для повышения химического сопротивления цементных композиций к фторсодержащим средам добавлять алюмосиликаты в виде тонкодисперсных наполнителей из цеолитсодержащих пород (клиноптиолита) [3]. Установлено, что введение цеолитсодержащих пород в качестве наполнителя позволяет повышать прочность цементных композитов, а дополнительная обработка этого наполнителя фтором усиливает эффект наполнения [4].

Природные цеолитсодержащие породы (ЦСП) являются сырьем для многоцелевого использования. Широкое применение ЦСП обусловлено их уникальными свойствами. В строительстве ЦСП можно применять при изготовлении бетона в качестве минеральной добавки, позволяющей сократить расход цемента и повысить прочность и водостойкость бетона.

В настоящей работе исследовано влияние фторид-ионов на повышение прочности цементного камня, наполненного ЦСП, и коррозионную стойкость арматурной стали. Рассмотрено два метода обработки фторид-ионами цементных композитов, в которых степень наполнения ЦСП варьировалась от 10 до 30 % от массы цемента. По первому методу фторидом натрия пропитывали цементные образцы с ЦСП. По второму методу ЦСП насыщали рабочим раствором фторида натрия различной концен-

© Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Нугаева Г.Р., Козлов П.С., 2011

трации (от 0,1 до 1,5 мг / мл). После обработки и высушивания при температуре не выше 90 °С ЦСП использовали для изготовления цементных композитов.

Исследования влияния степени наполнения, крупности наполнителя, концентрации фторид-ионов (от 0,1 до 1,5 мг / мл) на прочность цементных композитов проводились на образцах—призмах размерами 20×20×70 мм. Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, показал, что концентрация фторид-ионов в фильтрате понижается по мере увеличения продолжительности контакта с образцами из цементного камня и через 6–7 дней становится минимальной. Вероятно, в процессе контакта цементного камня с водным раствором NaF за счет химического взаимодействия между ионами  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и фторид-ионами образуются малорастворимые соли, заполняющие капилляры, микро- и макропоры бетона:

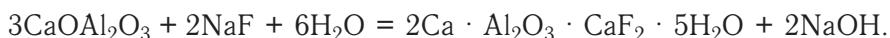


Рис. 1. Влияние времени контакта на концентрацию фторид-ионов в системе цементный композит — фторид натрия  
—◆— 10 %; —■— 20 %; —▲— 30 % наполнения  
a)  $C_{\text{NaF}} = 0,1 \text{ мг/мл};$  б)  $C_{\text{NaF}} = 0,5 \text{ мг/мл}$

В результате повышаются плотность и прочность, понижаются пористость и водопроницаемость цементного камня. Особая роль в этом процессе отводится наполнителю на основе ЦСП, который имеет обменные катионы, позволяющие направленно влиять на химическое взаимодействие фторид-ионов с цементным камнем. Экспериментальными исследованиями, проведенными с применением двухфакторного плана эксперимента, установлено, что без обработки композита фторидом натрия на прочность цементного камня влияют степень наполнения композита и крупность гранул ЦСП. Наибольшие показатели прочности (37,6 МПа) соответствуют 10%-ному содержанию ЦСП в композите с максимальной крупностью гранул 1,25. При увеличении степени наполнения ЦСП до 30 % прочность снижается до 18,51 МПа (рис. 2, а). При обработке фторидом натрия невысокой концентрации (0,5 мг / мл) образцов цементных композитов, наполненных ЦСП (10 % от массы цемента по первому методу), происходит увеличение прочности до 52,76 МПа (рис. 2, б). По мере увеличения концентрации фторида натрия до 1,0 и 1,5 мг / мл наблюдается снижение прочности цементного камня с 50 до 31,6 МПа.

Применение второго метода обработки цементной композиции ионами фтора независимо от степени наполнения, размера гранул ЦСП, концентрации фторида натрия приводит к снижению прочности до 15...28 МПа (рис. 3). Это явление можно объяснить тем, что при выдерживании ЦСП в водном растворе фторида натрия (6–7 дней) происходит замещение

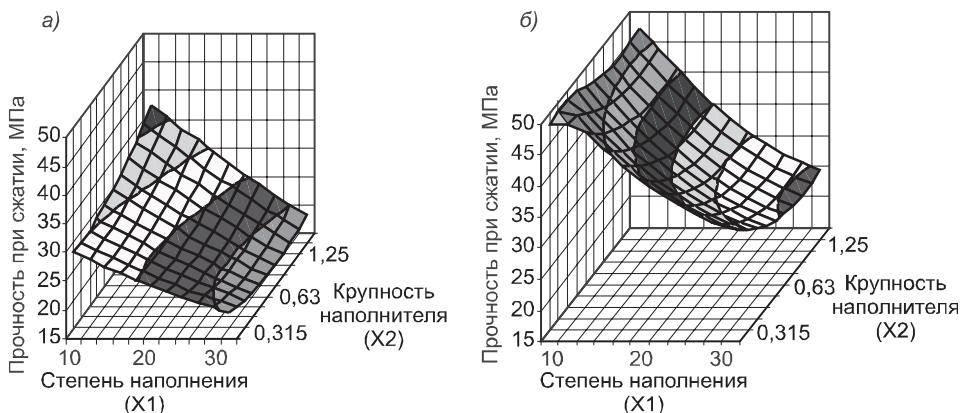


Рис. 2. Влияние степени наполнения и крупности наполнителя ЦСП на прочность цементных композитов, полученных разными методами  
а) цементные композиты с ЦСП, не обработанные NaF, б) цементные композиты с ЦСП, обработанные NaF (0,5 мг/мл)

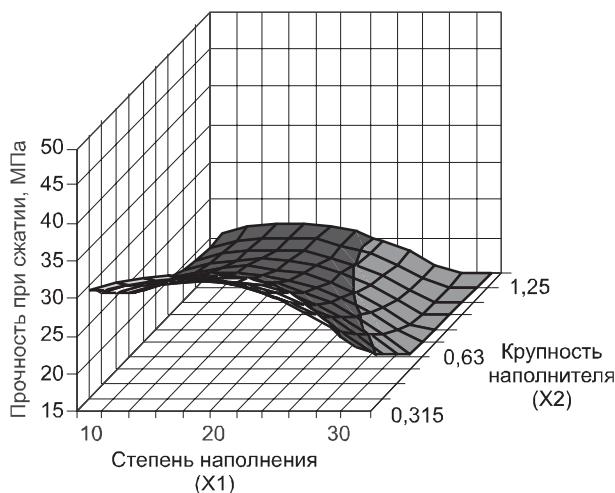


Рис. 3. Прочность цементных композитов, наполненных ЦСП, полученных вторым методом

стандартной стеклянной трехэлектродной ячейке в анодным и катодным пространством. Рабочим электродом служила сталь Ст-85, вспомогательным — платиновый электрод, электродом сравнения — хлорсеребряный.

На рис. 4 представлены анодные поляризационные кривые стали в воде, в растворе NaF с концентрацией 0,01; 0,5; 1 мг/мл. Анализ анодных поляризационных кривых (АПК) показывает, что электрод в растворе NaF находится в активном состоянии. Увеличение концентрации NaF от 0,01 до 1,0 мг/мл приводит к росту токов анодного растворения на два порядка. Потенциал свободной коррозии стали смещается в более отрицательную область. На анодных поляризационных кривых наблюдаются тафелевские участки кривых с углами наклона ( $\text{tg } \alpha$ ): 1 — 0,29; 2 — 0,24; 3 — 0,24; 4 — 0,38. Ход АПК при концентрации NaF, равной 0,01 мг/мл (кривая 1), аналогичен ходу АПК стали в воде (кривая 4). Для потенциала свободной коррозии в интервале  $\phi$  от  $-0,18$  до  $-0,06$  В токи растворения АПК для воды и раствора NaF с концентрацией 0,01 мг/мл примерно

ионно-обменных катионов в цеолите и частичное разложение структуры цеолита с образованием глинистых частиц, которые отрицательно влияют на процессы гидратации, приводят к снижению прочности.

Коррозионную стойкость арматурной стали Ст-85 в фильтрате, содержащем F-ионы, проверяли потенциодинамическим методом на потенциостате П-5827М с регистрацией сигналов «потенциал — ток». Электрохимические измерения проводились в

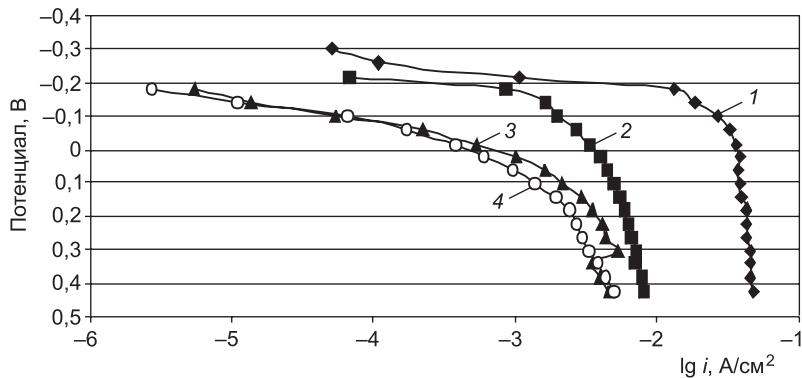


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые стали Ст-85 в воде (кривая 4),  
в растворе NaF с концентрацией:  
0,01 мг/мл (кривая 3); 0,5 мг/мл (кривая 2); 1 мг/мл (кривая 1)

совпадают. При смещении потенциала в положительном направлении фторид-ионы активируют анодный процесс, о чем свидетельствуют токи анодного растворения.

Увеличение концентрации раствора NaF повышает токи растворения на всем протяжении со сдвигом потенциала в положительную область. С  $\varphi = -0,14$  В наблюдается более крутой спад АПК при концентрациях 0,5 мг/мл и еще более — при концентрации 1 мг/мл NaF с соответствующим уменьшением интенсивности токов растворения. Электрод покрывается черным слоем продуктов растворения стали (рис. 4).

Анодные поляризационные кривые снимали также с электрода стали Ст-85 в фильтрате, полученном после выдержки в течение 6–7 дней цементных композитов с содержанием ЦСП (10, 20, 30 %) в качестве наполнителя в растворе NaF различной концентрации (от 0,1 до 1,5 мг/мл). На рис. 5 представлена АПК стали Ст-85 в фильтрате после выдерживания композитов в растворе NaF с концентрацией 0,1 мг/мл. Из анализа АПК следует, что при экспонировании арматурной стали в фильтрате, полученном после выдерживания цементного камня в водном растворе фторида натрия с содержанием ЦСП 20 и 30 %, наблюдается аномальный участок на анодной поляризационной кривой. Со смещением потенциала в положительном направлении происходит активация анодного процесса ( $\varphi > 0,6$  В). Токи достигают значительных величин.

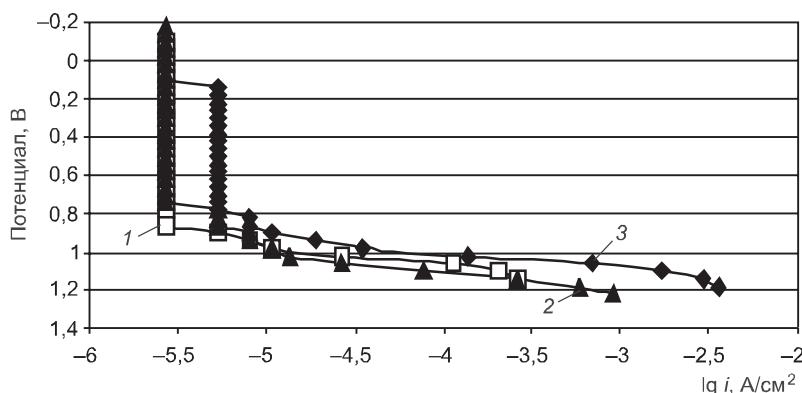


Рис. 5. Анодные поляризационные кривые стали Ст-85 в фильтрате после выдерживания в растворе NaF с концентрацией 0,1 мг/мл цементных композитов, содержащих ЦСП в качестве наполнителя  
1 — 30 %; 2 — 20 %; 3 — 10 %

В целом АПК показывают, что увеличение содержания ЦСП в композите улучшает электрохимические характеристики стали Ст-85. Свидетельством является сдвиг потенциала свободной коррозии в положительную область. Наблюдается уменьшение токов растворения. Вероятно, ЦСП сорбирует фторид-ионы, с уменьшением концентрации которых в фильтрате ослабевает их агрессивное действие на сталь.

**Выводы.** 1. Использование цеолитсодержащих пород в качестве наполнителя позволяет экономить до 20 % цемента, не ухудшая прочностных показателей композита.

2. Пропитка образцов цементных композитов, наполненных ЦСП, водным раствором с концентрацией фторид-ионов 0,01 мг/мл позволяет увеличить прочность цементного камня с 30 до 50 МПа.

3. Обработка фторидом натрия бетонов, в состав которых входит ЦСП, позволяет увеличить коррозионную стойкость арматурной стали.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селяев, В.П. Влияние модификации на изменение свойств наполненных цементных композиций [Текст] / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов, Н.А. Епифанова // Современные технологии строительных материалов и конструкций : Матер. Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения В.Г. Шухова. — Саранск : Изд-во Морд. гос. ун-та, 2003. — С. 125–128.
2. Куприяшина, Л.И. Влияние воды, содержащей ионы фтора, на свойства цементных композиций [Текст] / Л.И. Куприяшкина // Долговечность строительных материалов и конструкций : Матер. научн.-практ. конф. — Саранск : Изд-во Морд. гос. ун-та, 2001. — С. 42–47.
3. Селяев, В.П. Свойства цементных композиций, наполненных цеолитсодержащими породами [Текст] / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, А.А. Болдырев // Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков : Матер. докл. Междунар. интернет-конф. — Белгород : Изд-во БелГТАСМ, 2002. — С. 177–180.
4. Осипов, А.К. Сорбционные свойства цеолитсодержащих пород [Текст] / А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина, Н.А. Епифанова // Долговечность строительных материалов и конструкций: Матер. науч.-практ. конф. — Саранск : Изд-во Морд. гос. ун-та, 2000. — С. 96–98.

*СЕЛЯЕВ В.П., д-р техн. наук, проф.*

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
ОСИПОВ А.К., канд. техн. наук, доц.*

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
КУПРИЯШКИНА Л.И., канд. техн. наук, проф.*

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

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
НУГАЕВА Г.Р., асп.*

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
КОЗЛОВ П.С., асп.*

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

Получено 11.07.11

**Selyaev V.P.**, doctor of technical sciences, professor, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Osipov A.K.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kupriyashkina L.I.**, candidate of technical sciences, professor, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Sedova A.A.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Nugayeva G.R.**, post-graduate student, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kozlov P.S.**, post-graduate student, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

## **INFLUENCE OF CONCENTRATION FLUORIDE-IONS TO THE PROPERTIES OF CEMENT CONCRETE AND REINFORCING-BAR STEEL**

The influence of fluoride-ions on the increase of strength cement stone make-up filled with zeolite rock and corrosion stability of reinforcing-bar steel is considered in article. There is disclosed two methods of treatment cement systems with fluoride-ions.

**Key words:** filler, concentration, impregnation, strength, corrosion stability.

### REFERENCES

1. Selyaev, V.P. The influence of modification on the change of properties of make-up filled cement systems [Text] / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipov, N.A. Epifanova // Actual technologies of building materials and constructions : Materials of All-Russian science-tech. conf., initiated to 150-years burning V.G. Shuhov. — Saransk : Izdat-vo Mordov. un-ta, 2003. — P. 125–128.
2. Kupriyashkina, L.I. The influence of water, containing the fluoride-ions to the properties of cement systems [Text] / L.I. Kupriyashkina // Durability of building materials and constructions: Materials of science-pract. conf. — Saransk : Izdat-vo Mordov. un-ta, 2001. — P. 42–47.
3. Selyaev, V.P. The properties of cement systems, make-up filled with zeolite rock [Text] / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, A.A. Boldirev // Architectural and building material authority at the turn of the century : Report materials of Internet-conf. — Belgorod : Izd-vo BelGTASM, 2002. — P. 177–180.
4. Osipov, A.K. Sorption properties of zeolite rocks [Text] / A.K. Osipov, L.I. Kupriyashkina, N.A. Epifanova // Durability of building materials and constructions : Materials of science-pract. conf. — Saransk : Izdat-vo Mordov. un-ta, 2000. — P. 96–98.

УДК 691.311–405.8

Л.В. ЗАВАДСКАЯ, Л.В. ИЛЬИНА, Г.И. БЕРДОВ

## ГАЗОГИПСОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АРМИРОВАННЫЕ ВОЛОКНИСТЫМИ ДОБАВКАМИ

Газогипсовые изделия могут быть получены при использовании в качестве газообразующих компонентов карбоната кальция и сульфата алюминия. Замедлителем схватывания является лимонная кислота (0,09 % от массы гипса). Введение добавки дисперсного стекловолокна (0,4 %) позволяет получать газогипсовые изделия с плотностью 890 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сжатии 3,7 МПа, теплопроводностью 0,258 Вт/(м · °C).

Ключевые слова: газогипс, реакция, средняя плотность, теплопроводность, карбонат кальция, сернокислый алюминий, сроки схватывания, замедлитель схватывания.

Потребность строительного комплекса в теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных материалах можно частично обеспечить за счет разработки составов и технологии производства изделий из газогипса. Расширение объемов производства изделий и конструкций на основе гипсовых вяжущих — резерв экономии топливно-энергетических ресурсов. Это обусловлено тем, что производство гипсовых вяжущих в 5–10 раз менее энергоемко по сравнению с производством цемента и извести, в 2,4 раза дешевле, не требует больших затрат на тепловую обработку изделий [1, 2]. Гипсовые материалы и изделия в соответствии с их свойствами целесообразно использовать внутри помещений в зданиях различного назначения.

С учетом повышенных требований к теплозащите зданий (СНиП 23-02-03) актуальной является задача снижения величины средней плотности и повышения термического сопротивления теплозащитных (теплоизоляционных и стеновых) изделий в структуре зданий.

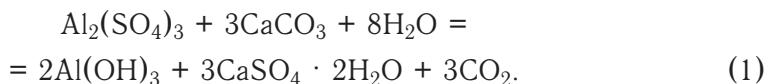
Традиционно при изготовлении ячеистых изделий на основе минеральных вяжущих (газобетон, газосиликат, газогипс) используют кремнеземистый компонент (кварцевый песок, золу и т.д.) и алюминиевую пудру в качестве газообразователя. Вспучивающим агентом является водород.

Поризация формовочной массы при получении пористых материалов на минеральной основе возможна и при наличии карбонатов и растворов кислот или солей с образованием поризующего агента в виде CO<sub>2</sub>. Создание высокопористой структуры гипсового изделия возможно за счет поризации гипсовой массы с применением комплексных видов газообразующих компонентов. Для получения гипса в качестве газообразующих компонентов могут быть использованы сульфат алюминия и глина с высоким содержанием CaCO<sub>3</sub> (до 25 %). Однако глины с таким высоким содержанием карбоната встречаются редко, а глинистый компонент не позволяет получать газогипс низкой средней плотности и требуемой прочности [3].

В данной работе для поризации гипсовой литой смеси предложено использовать дисперсный карбонат кальция и сульфат алюминия, взаимодействие между которыми происходит с выделением CO<sub>2</sub>:

---

© Завадская Л.В., Ильина Л.В., Бердов Г.И., 2011



Формовочная гипсовая смесь готовилась в такой последовательности. Строительный гипс и измельченный карбонат кальция с удельной поверхностью 250...280 м<sup>2</sup>/кг в соотношении 25:1 перемешивались в сухом состоянии. Параллельно готовился раствор сульфата алюминия в соотношении Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 2 : 75. При этом водогипсовое отношение изменялось от 0,6 до 0,8. Затем смесь сухих компонентов (гипс + карбонат кальция) засыпалась в солевой раствор и интенсивно перемешивалась. Приготовленная литая гипсовая масса разливалась в формы-кубы. В табл. 1 представлены значения средней плотности и прочности при сжатии газогипса в зависимости от водогипсового отношения. При поризации массы образуется однородная структура с размером пор 0,5...1 мм, общая пористость газогипса достигает 70 %. В экспериментах использовался строительный гипс марки Г-4.

Необходимо отметить, что возможность всучивания при взаимодействии компонентов в этом случае не полностью реализуется вследствие быстрого схватывания гипсовой массы. Поэтому возникает необходимость введения замедлителя схватывания, в качестве которого использовалась лимонная кислота. При введении лимонной кислоты в формовочную смесь в количестве 0,09 % от массы гипса начало схватывания составило 19 мин, а конец схватывания — 24 мин.

Для улучшения структуры и физико-механических свойств газогипса вводились совместно со строительным гипсом и тонкомолотым карбонатом кальция в сухом состоянии волокнистые добавки трех видов: полимерные, базальтовые и стеклянные волокна при соотношении гипс : волокна, равном 250:1, измельченные до удельной поверхности 200...230 м<sup>2</sup>/кг. В качестве исходных материалов использовались полипропиленовые волокна производства ООО «Си-Айлайд» (г. Челябинск) диаметром 20...50 мкм, длиной 3...18 мм; базальтовые волокна производства ООО «Батиз» (г. Омск) диаметром до 3 мкм, длиной 50...70 мм; стеклянные волокна производства URSA GLASSWOOL (г. Чудово Новгородской области) диаметром 4...5 мкм, длиной 150...300 мм.

Был проведен дифференциальный термический анализ образцов из природного гипса, гидратированного гипса, а также газогипса без добавок волокон и содержащего добавки волокон: полимерных, базальтовых и стеклянных.

Анализ полученных результатов показал, что четко проявляются три эндоэффекта (табл. 2).

Первый эндоэффект обусловлен удалением из гипса 3/4 связанной воды с образованием полуводного гипса. Второй эндоэффект, как следует из термодинамических расчетов [4], значительно меньше по интенсивности и связан с удалением из гипса оставшейся воды. Эндоэффект при температуре 774...789 °C обусловлен частичным разложением CaSO<sub>4</sub>, а также присутствующего в системе карбоната кальция.

Температура первого эндоэффекта в этих случаях у образцов газогипса различна и заметно ниже, чем у гидратированного гипса (155,1 °C).

Таблица 1  
Свойства газогипсовых изделий  
при различных соотношениях  
вода : гипс

Водогипсовое отношение	Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа
0,6	1150	2,1
0,65	1054	3,0
0,7	1026	3,7
0,75	866	1,9
0,8	1030	1,2

Таблица 2

**Результаты комплексного термического анализа образцов газогипса с микроармирующими волокнистыми добавками**

Номер эндоэффекта	Показатель	Природный гипс	Гидратированный строительный гипс	Газогипс с добавками волокон (вид волокон)			
				без добавок	полимерное волокно	базальтовое волокно	стеклянное волокно
1	Температура, °C	138,9	155,1	154,7	153,7	152,3	150,9
	Потеря массы, %	2,2	8,7	8,8	8,5	8,4	6,4
2	Температура, °C	149,0	186,8	184,6	182,6	182,7	182
	Потеря массы, %	1,6	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5
3	Температура, °C	763,0	785,9	785,4	773,5	783,7	789,0
	Потеря массы, %	1,2	1,5	1,3	1,4	1,2	1,4
Общая потеря массы (20...1000 °C), %		5,3	15,6	15,2	15,0	15,0	12,4

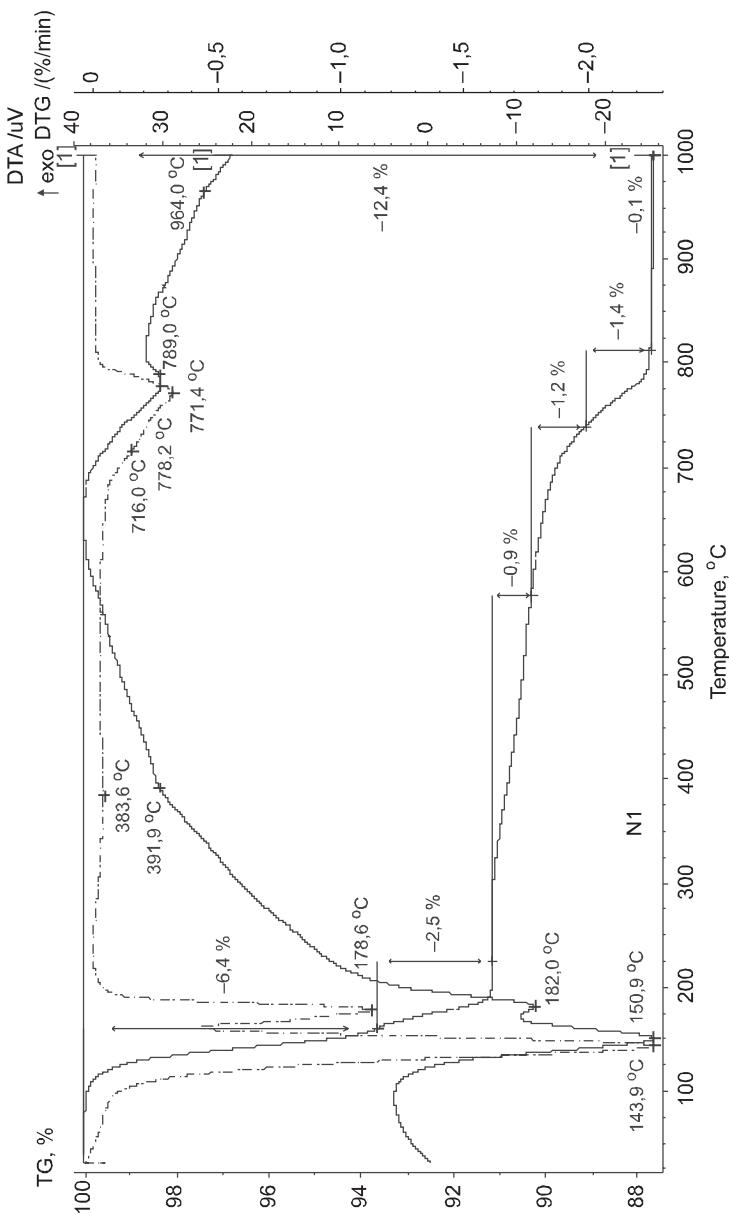
При этом наиболее низкая температура в случае добавки стекловолокон (150,9 °C), затем следуют добавки базальта (152,3 °C) и полимера (153,7 °C). Это может быть обусловлено взаимодействием между частицами добавки и полярными молекулами гидратной воды. Такое взаимодействие более интенсивно в случае большей полярности добавки. Следует отметить, что потери массы в области первого эндоэффекта значительно меньше в случае добавки стекловолокна (6,4 %), чем базальта и полимера (8,5; 8,4 %).

Температуры второго эндоэффекта, соответствующие удалению более прочно связанной в структуре гипса воды, при введении волокнистых добавок примерно одинаковые (182...182,7 °C), но заметно ниже, чем у газогипса без волокнистых добавок (184,6 °C) и тем более гидратированного гипса (188,8 °C). Потери массы в области второго эндоэффекта в случае газогипса одинаковы у всех четырех образцов (2,5 %), но заметно меньше, чем у гидратированного гипса (3,0 %).

При разложении гипса на первой стадии удаляется 3/4 воды, на второй — 1/4, т.е. отношение количества воды, удалившейся на 1-й и 2-й стадиях, составляет 3 : 1. Из результатов термического анализа следует, что это отношение составляет в случае гидратированного гипса 2,9, в случае газогипса без добавок 3,52, т.е. количество вовлечено в структуре воды увеличивается, в систему включается дополнительное количество воды. При введении добавки полимерных волокон и базальта это отношение уменьшается до 3,31, а при введении стекловолокон оно составляет 2,6, т.е. количество воды, связанной при гидратации гипса, значительно уменьшается, что должно положительно влиять на свойства газогипса (механическую прочность, плотность и т.д.). Общие потери массы у образцов, содержащих добавку стекловолокна, составляют 12,4 %. Они меньше, чем в случае добавок полимера и базальта. Различие обусловлено главным образом уменьшением количества менее прочно связанной воды, удаляемой в области первого эндоэффекта (см. рисунок).

Таким образом, введение добавки стекловолокна обусловливает формирование более плотной структуры, содержащей меньшее количество вовлечено в воду.

В табл. 3 представлены значения средней плотности, прочности при сжатии и теплопроводности газогипса в зависимости от вида армирующей добавки.



Результаты комплексного термического анализа газогипса с добавкой стекловолокна

Введение армирующей добавки в виде измельченного стеклянного волокна увеличивает прочность при сжатии газогипса на 48,6 % по сравнению с составом при введении полимерного волокна. По сравнению с составом на основе базальтового волокна прочность при сжатии увеличивается на 18,6 %, а теплопроводность снижается на 11,3 %.

Таблица 3  
Свойства газогипсовых изделий с различными армирующими добавками

Вид армирующей добавки	Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт / (м · °C)
Полимерные волокна	891	1,9	0,263
Базальтовые волокна	898	3,01	0,291
Стеклянные волокна	890	3,7	0,258

Получаемый таким образом газогипс может рассматриваться как стеновой материал, применяемый в межкомнатных перегородках в помещениях с относительной влажностью воздуха до 60 % или как звукоизоляционный материал при устройстве полов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирсаев, Р.Н. Опыт производства и эксплуатации гипсовых стеновых изделий [Текст] / Р.Н. Мирсаев, В.В. Бабков, И.В. Недосеко // Строит. материалы. — 2008. — № 3. — С. 78–80.
2. Гончаров, Ю.А. Российская гипсовая ассоциация : цели и задачи [Текст] / Ю.А. Гончаров, А.Ф. Бурьянов // Строит. материалы. — 2008. — № 1. — С. 54–56.
3. Завадский, В.Ф. Стеновые материалы и изделия : учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Завадский, А.Ф. Косач, П.П. Дерябин. — Омск : СибАДИ, 2005. — 254 с.
4. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. — М. : Высш. шк., 1989. — 384 с.

ЗАВАДСКАЯ Л.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ИЛЬИНА Л.В., канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

БЕРДОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 01.07.11

**Zavadskaya L.V.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Ilyina L.V.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Berdov G.I.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### THE PRODUCTS FROM POROUS PLASTER REINFORCED FIBROUS ADDITIVES

The products from porous plaster can be received at use as gas-forming components of a carbonate of calcium and aluminum sulfate. Slow down-telem the deceleration time setting is lemon acid (0,09 % from weight of plaster) is. Introduction of an additive of disperse fiber glass (0,4 %) allows to receive porous plaster with density 890 kg/m<sup>3</sup>, durability at compression 3,7 MPa, heat conductivity is 0,258 Wt / (m · °C).

**Key words:** porous plaster, reaction, average density, heat conductivity, a calcium carbonate, aluminum sulfate, terms of setting, retarder.

#### REFERENCES

1. Mirsaev, R.N. Experience in production and operation of gypsum walls of new products [Text] / R.N. Mirsaev, V.V. Babkov, I.V. Nedoseko / Builder insulating materials. — 2008. — N 3. — P. 78–80.
2. Goncharov, Yu.A. Russian Gypsum Association: aims and objectives [Text] / Yu.A. Goncharov, A.F. Burianov // Building Materials. — 2008. — N 1. — P. 54–56.
3. Zawadzky, V.F. Wall materials and products : A Textbook. Benefit [Text] / V.F. Zawadzky, A.F. Kosach, P.P. Deryabin. — Omsk : SibADI, 2005. — 254 p.
4. Kuznetsova, T.V. Physical chemistry of binders [Text] / T.V. Kuznetsova, I.V. Kudryashov, V.V. Timashev. — M. : Vyssh. shk., 1989. — 384 p.

УДК 66.76211.002.322

И.В. КОВКОВ, Д.Ю. ДЕНИСОВ, В.З. АБДРАХИМОВ, В.А. КУЛИКОВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОСТЕКОЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЗЕРНИСТОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Показаны результаты экспериментальных исследований по получению зернистого теплоизоляционного материала при относительно низкой температуре ( $300^{\circ}\text{C}$ ) на основе жидкого стекла, модифицированного хлоридом натрия.

Ключевые слова: теплоизоляционный зернистый материал, жидкое стекло, хлорид натрия, гидратная вода, жидкостекольные системы, силикатный модуль.

В связи с изменившимися нормативами по теплотехническим параметрам ограждающих конструкций на рынке строительных материалов наблюдается повышенный спрос на теплоизоляционные материалы. Применение теплоизоляционных материалов позволяет снизить толщину, массу стен и других ограждающих конструкций, что влечет за собой соответственно снижение общей стоимости строительства [1–3]. Кроме того, сокращение потерь тепла в отапливаемых зданиях значительно уменьшает расход топлива, что особенно актуально в настоящее время.

На основании диаграмм состояния  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  в работах [1–3] было установлено, что содержание гидратной воды отражается на температуре плавления щелочного силиката. При содержании в силикате 20 % гидратной воды он плавится при  $100^{\circ}\text{C}$  [1]. При быстром нагревании такого гидратированного силиката до  $200^{\circ}\text{C}$  он разжижается и гидратная вода быстро превращается в пар. Вследствие большой вязкости расплавленного силиката водные пары задерживаются в нем, образуя пузыри с тонкими стенками. Результаты исследования по получению пористого заполнителя на основе жидкостекольных систем показали, что вспучивание начинается уже при  $50^{\circ}\text{C}$ .

В работе [4] показано, что плавление тройной системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  начинается при температуре выше  $48^{\circ}\text{C}$ . Объясняется это тем, что катион и анион ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) связывают только электростатическое взаимодействие и слабые водородные связи между молекулами воды, поэтому при температуре  $48^{\circ}\text{C}$  кристаллическая структура разрушается и кристаллогидрат плавится в собственной воде.

Анализ работ [2, 3] показал, что жидкое стекло благодаря высокой адсорбционной способности и низкой температуре вспучивания может быть использовано для получения теплоизоляционных материалов<sup>1–3</sup>. Кроме

<sup>1</sup> Пат. РФ 2361831. С1 C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков, А.В. Абдрахимов; заяв. 13.11.2007. Опубл. 20.07.2009. Бюл. № 20.

<sup>2</sup> Пат. РФ 2362749. С1 C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Л.В. Журавель; заяв. 13.12.2007. Опубл. 27.07.2009. Бюл. № 21.

<sup>3</sup> Денисов Д.Ю. Использование отходов флотации углеобогащения в производстве керамзита / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов // Башк. хим. журн. 2008. Т. 15, № 2. С. 107–109.

того, сырьевая база жидкостекольных композиций позволяет применять не только природные традиционные сырьевые материалы, но и значительных количествах (более 50 % в составах по массе) техногенные отложения (отходы производства). Это будет способствовать сохранению и рациональному использованию имеющихся природных сырьевых ресурсов, утилизации промышленных отходов, снижению экологической напряженности в регионах.

Цель настоящей работы — получение зернистого теплоизоляционного материала с высокими физико-механическими показателями на основе жидкостекольных композиций при температуре не выше 300 °C.

При производстве теплоизоляционных материалов на основе жидкого стекла при структурировании в жидкостекольных композициях необходимых реологических параметров, как правило, возникают три проблемы:

а) на этапе перемешивания компонентов (придании сырьевой смеси гомогенности);

б) на этапе формования зернистого материала и его способности сохранить приданную форму;

в) на этапе получения готового теплоизоляционного материала, в котором целесообразно получить равномерную мелкопористую структуру.

Жидкое стекло представляет собой коллоидный водный раствор силиката натрия при содержании воды 50–70 %. Являясь гидратированным силикатом натрия, имея повышенную адсорбционную способность и высокую вязкость, жидкое стекло не способствует равномерному перемешиванию компонентов в композиции<sup>4</sup>.

Характер деформационных процессов в дисперсионных системах определяется их реологическими свойствами. Реология — наука о деформациях и течении различных вязких и пластичных материалов. Как правило, рассматриваются три типа систем, которые могут быть различными по своим реологическим свойствам: ньютоновские (истинные) жидкости; жидкости структурированные, не обладающие предельным напряжением сдвига; пластично-вязкие системы, обладающие предельным напряжением сдвига<sup>5, 6</sup>.

В свою очередь, реологические параметры определяются молекулярными силами сцепления между элементами структуры, взаимодействием элементов между собой и с молекулами дисперсионной среды, особенностями их теплового движения. Изменяя эти факторы путем подбора композиции жидкого стекла с добавками в системе, можно управлять реологическими свойствами дисперсионных структур и тем самым уменьшать процессы разрушения, протекающие при формировании гранулированного материала. Реологические свойства непосредственно связаны с кристаллическим строением и физико-химическими свойства-

<sup>4</sup> Абдрахимов В.З., Семенычев В.К., Ковков И.В. и др. Использование жидкого стекла и техногенного сырья в производстве огнеупорных водостойких теплоизоляционных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 3. С. 30–35.

<sup>5</sup> Абдрахимова Е.С., Абдрахимов А.В., Абдрахимов В.З. Структурно-реологические свойства глинистых материалов различного химико-минералогического состава // Материаловедение. 2004. № 3. С. 50–56.

<sup>6</sup> Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Ковков И.В. и др. Исследование упругопластично-вязких показателей, влагопроводности и усадочных свойств глинистых материалов // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 2. С. 74–81.

ми исходных компонентов. Они учитывают изменение толщины гидратных прослоек между частицами дисперсной фазы и количество последних в единице объема, т.е. определяют прочность и реологические особенности поведения подобного рода систем. Это иллюстрируют полные реологические кривые силикатных дисперсий различного минералогического состава<sup>5, 6</sup>.

В работе [1] показано, что жидкое стекло вступает во взаимодействие практически со всеми химическими соединениями, но не всегда эти массы обладают достаточной пластичностью для формования изделий.

Наши исследования [2, 3] показали, что для формования гранулированного материала на основе жидкого стекла жидкостекольные композиции должны обладать достаточной пластичностью.

Технологический процесс пластической обработки при формировании жидкостекольной массы имеет цель — образование такой коагуляционной структуры, которая может служить основой для получения теплоизоляционных материалов. Для снижения вязкости жидкостекольных композиций целесообразно вводить в них инертные порошки. Но чрезмерное введение в жидкостекольные композиции количества инертного порошка может перевести их из пластического в рыхлое состояние. Поэтому были проведены работы по исследованию различных веществ и соединений, вызывающих коагулирование жидкого стекла. Основным критерием при определении эффективности добавки являлась способность вызывать равномерную по объему коагуляцию, приводящую к получению массы, способной формоваться в сырьевые гранулы заданного размера и сохранять приданную форму. Исследования показали, что наиболее эффективной добавкой является хлорид натрия, который способствует коагуляции жидкого стекла. Кроме того, ионы натрия способствуют понижению силикатного модуля смеси, а ионы хлора — коагуляции жидкостекольной смеси. Снижение силикатного модуля приводит к понижению числа силикансовых связей, что существенно облегчает переход ионов щелочного металла в раствор и движение молекул воды в fazu стекла и дает возможность формовать гранулы любого размера [1–3].

Количество вводимого хлорида натрия влияет на свойства композиции. При добавлении хлорида натрия в количестве менее 10 % вязкость композиции изменяется незначительно, что затрудняет возможность сформовать гранулы [2–4]<sup>7</sup>. При добавлении в композицию хлорида натрия более 20 % в ней повышается вязкость и она становится малоформируемой. Исследования показали, что оптимальное количество вводимого хлорида натрия должно составлять 12–15 %.

В данной работе для получения теплоизоляционного материала использовалось жидкое стекло, модифицированное хлоридом натрия, соответствующее требованиям ГОСТ 13078–81. Физико-химические показатели жидкого стекла представлены в табл. 1.

Из модифицированной жидкостекольной композиции при температуре вспучивания 300 °C в печном грануляторе были получены шарообразные гранулы теплоизоляционного материала размером 20–25 мм, характеристики которых представлены в табл. 2.

Для раскрытия структурных особенностей керамических материалов все чаще стали обращаться к электронному микроскопу, используя метод

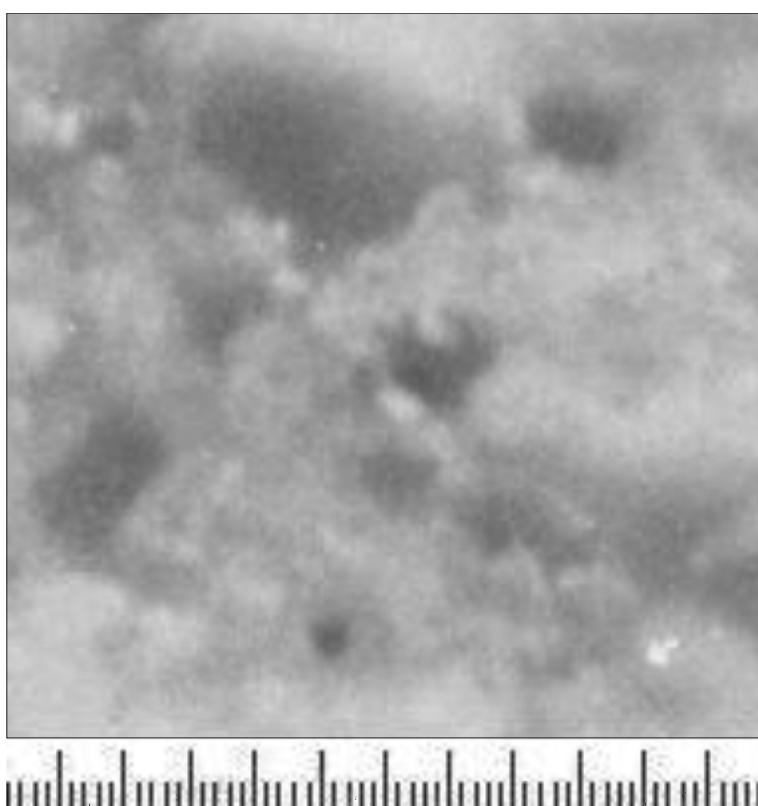
<sup>7</sup> Куликов В.А., Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование ИК-спектроскопическим методом фазового состава керамзита на основе отходов горно-обогатительной фабрики при обогащении угля // Башк. хим. журн. 2010. Т. 17, № 2. С. 63–65.

**Таблица 1**  
**Физико-химические показатели  
жидкого стекла**

Показатель	Значение
Содержание двуоксида кремния, %	36,9
Содержание оксида натрия, %	10,63
Кремнеземистый модуль	3,0
Силикатный модуль	2,9
Плотность, г / см <sup>3</sup>	1,45

**Таблица 2**  
**Физико-механические характеристики  
теплоизоляционного материала**

Показатель	Значение
Плотность, г / см <sup>3</sup>	0,23–0,25
Насыпная плотность, кг / м <sup>3</sup>	70–80
Прочность при раскалывании, МПа	0,075–0,085
Огнеупорность, °C	850–950



Поверхность скола теплоизоляционного материала

Увеличение ×1500

фрактографии (изучение сколов) и реплик<sup>8, 9</sup>. Метод скола основан на допущении, что в тонкозернистом материале раскол проходит по индукционной поверхности, а следовательно, наблюдаемый микрорельеф скола отражает структуру образующегося вещества. Опыт исследования тонких разностей аморфных и кристаллических пород показал правильность указанного допущения.

<sup>8</sup> Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З. Определение с помощью электронного микроскопа выцветов на керамическом кирпиче, полученном с применением отходов производств // Башк. хим. журн. 2009. Т. 16, № 2. С. 186–189.

<sup>9</sup> Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование электронно-микроскопическим методом фазового состава керамического кирпича, полученного из бейделлитовой глины, золошлака и фосфорного шлака при различных температурах обжига // Башк. хим. журн. 2009. Т. 15, № 2. С. 78–79.

Для исследования структуры пористости керамзита был использован метод растровой микроскопии. На рисунке представлена фотография поверхности скола исследуемого образца.

В исследуемом теплоизоляционном материале встречаются преимущественно изолированные изометрические поры размером 5–12 мкм. Кроме того, в корочке обнаружены крупные поры (до 50 мкм) овальной формы и изометрические поры типа «каналов». Именно эти поры, по всей видимости, определяют водопоглощение керамических материалов.

В изучаемом зернистом теплоизоляционном материале встречаются также узкие щелевидные поры и группы соединяющихся пор весьма при- чудливой формы. Изометрические закрытые поры также присутствуют, но их значение в общей пористости структуры сравнительно невелико. Щелевидные поры, как правило, узкие (5–7 мкм), обычно изогнутые, серповидные, но иногда прямолинейные.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что на основе жидкого стекла, модифицированного хлоридом натрия, можно получить зернистый теплоизоляционный материал при относительно низкой температуре (300 °C). Кроме того, на основе жидкостекольных композиций можно получить зернистый теплоизоляционный материал с насыпной плотностью менее 100 кг/м<sup>3</sup>.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев, П.Н. Растворимое стекло [Текст] / П.Н. Григорьев, М.А. Матвеев. — М. : Стройиздат, 1956. — 443 с.
2. Абдрахимов, В.З. Исследование фазового состава теплоизоляционных материалов на основе твердых солевых шлаков и жидкого стекла [Текст] / В.З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 11–12. — С. 33–39.
3. Абдрахимов, В.З. Теоретические и технологические аспекты использования техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов. — Самара : Самар. академия гос. и муницип. управления, 2010. — 72 с.
4. Конев, В.И. Производство и применение растворимого стекла [Текст] / В.И. Конев, В.В. Данилов. — Л. : Стройиздат, 1991. — 177 с.

*КОВКОВ И.В., канд. техн. наук*

*Самарская академия государственного и муниципального управления  
ДЕНИСОВ Д.Ю., асп.; E-mail: denisovdj@mail.ru*

*Самарская академия государственного и муниципального управления  
АБДРАХИМОВ В.З., д-р техн. наук, проф.*

*Самарская академия государственного и муниципального управления  
КУЛИКОВ В.А., асп.*

*Самарская академия государственного и муниципального управления*

Получено после доработки 22.06.11

**Kovkov I.V.**, candidate of technical sciences, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

**Denisov D.Ju.**, post-graduate student; E-mail: denisovdj@mail.ru, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

**Abdrahimov V.Z.**, doctor of technical sciences, professor, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

**Kulikov V.A.**, post-graduate student, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

## **THE USE OF WATER GLASS COMPOSITION IN THE PRODUCTION OF HEAT-INSULATING MATERIAL**

Outcomes of experimental researches on obtaining a heat insulator are exhibited at rather low temperature ( $300^{\circ}\text{C}$ ) on the basis of water glass modified by sodium chloridum.

**K e y w o r d s:** heat-insulating granular material, water glass, sodium chloridum, water of hydration, liquidglass systems, silica modul.

### REFERENCES

1. Grigorjev, P.N. Soluble glass [Text] / P.N. Grigorjev, M.A. Matveev. — M. : Stroyizdat, 1956. — 443 p.
  2. Abdrahimov, V.Z. Probe of phase structure of heat insulators on the basis of solid salt slags and water glass [Text] / V.Z. Abdrahimov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 11–12. — P. 33–39.
  3. Abdrahimov, V.Z. Theoretical and technological aspects of use of technogenic raw material in manufacture of heat insulators / V.Z. Abdrahimov, D.Ju. Denisov. — Samara : Samara Academy of State and Municipal Steering. — 2010. — 72 p.
  4. Konev, V.I. Manufacture and application of soluble glass [Text] / V.I. Konev, V.V. Danilov. — L. : Stroyizdat, 1991. — 177 p.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

**УДК 697.921.001.24**

**В.Н. ПОСОХИН, Ю.Р. КАРЕЕВА**

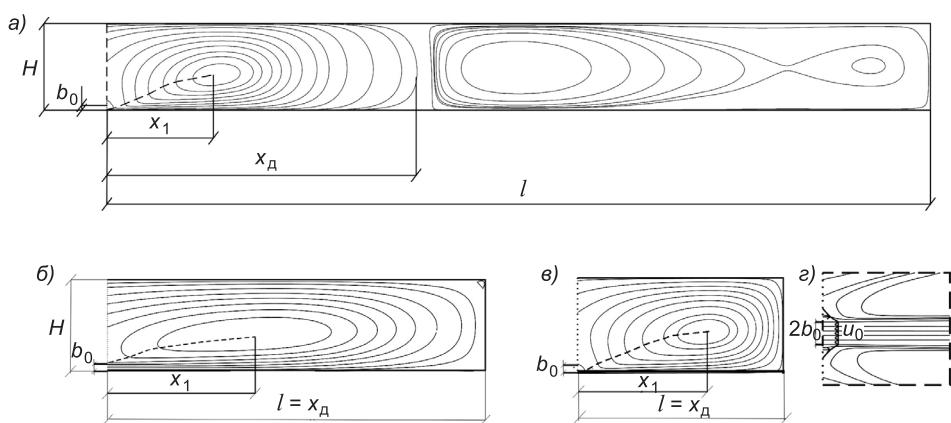
### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛОСКОЙ СТРУИ В ТУПИКЕ ПРИ РАЗНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ПРИТОЧНОГО И ВЫТЯЖНОГО ОТВЕРСТИЙ**

Численно решена задача о плоской турбулентной струе в тупиках разной длины при различном расположении приточного и вытяжного отверстий.

**Ключевые слова:** численный метод, плоская струя, тупики разной длины.

Характеристики стесненной струи в тупике зависят от геометрии последнего, а также от того, как расположены приточное и вытяжное отверстия. Качественные картины течений, полученные с помощью гидролотка, приведены в работе [1]. В известных теоретических исследованиях И.А. Шепелева, М.Д. Тарнопольского [2, 3], а также в экспериментальных работах В.А. Бахарева, В.Н. Трояновского [4] рассматривается течение в тупике, один торец которого заглушен, а второй свободен. Воздух подается со стороны открытого торца и удаляется через него же. То есть, по сути, полагается, что сток воздуха находится далеко вне тупика и не оказывает заметного влияния на общее движение, которое формируется только за счет действия струи.

В этой статье рассматриваются плоские течения: в тупике с одним заглушенным и одним проницаемым торцом (течение по схеме 1 — рис. 1) и в тупике, оба торца которого заглушины, а приточное и вытяж-



*Rис. 1. Линии тока течения в тупике с открытым торцом*

a) — «длинный» тупик; б) — «средний» тупик; в) — «короткий» тупик; г) — эжекция воздуха через открытый торец

ное отверстия расположены соосно в противолежащих торцах (текущее по схеме 2 — рис. 2). Все тупики имеют одинаковую высоту  $2H = 0,34$  м и разную длину: «длинный» тупик  $l = 2,52$  м;  $l/H = 14,82$ ; «средний» тупик  $l = 0,82$  м;  $l/H = 4,82$ ; «короткий» тупик  $l = 0,5$  м;  $l/H = 2,84$ . Условия истечения струи во всех случаях одинаковы: скорость истечения равномерна по высоте щели и равна  $u_0 = 52,9$  м/с, полуширина приточной щели равна полуширине стока  $b_0 = B = 0,0015$  м.

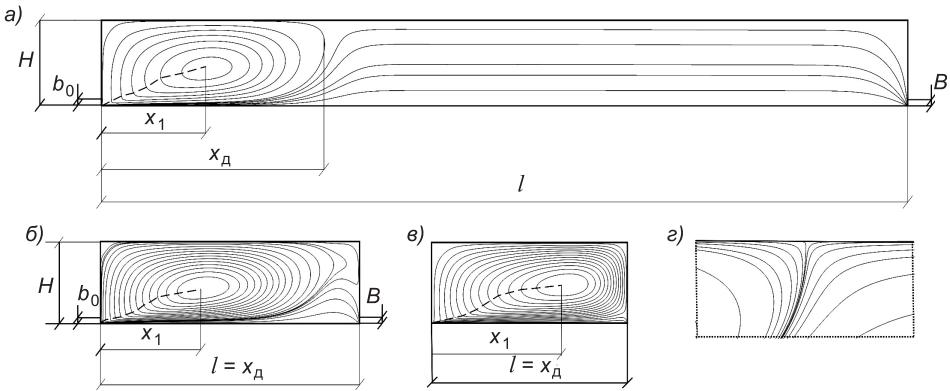


Рис. 2. Линии тока в тупике с двумя заглушенными торцами; приточное и вытяжное отверстия расположены соосно

а) — «длинный» тупик; б) — «средний» тупик; в) — «короткий» тупик; г) — течение в зоне разворота струи

Картины симметричных половин течений для всех тупиков показаны на рис. 1, 2. Форма линий тока определена с помощью CFD-комплекса Fluent. При этом использовалась стандартная  $k - \varepsilon$ -модель ( $k$  — кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $\varepsilon$  — удельная диссиляция турбулентной энергии). Приняты стандартные граничные условия, предлагаемые программой.

Характер течения в двух рассмотренных случаях различен. Особенно ясно это видно при сравнении двух длинных тупиков. В первом случае (рис. 1, а) за пределом дальнодействия струи мы имеем ряд последовательно расположенных быстро затухающих вихрей, во втором (рис. 2, а) наблюдается равномерное течение, скорость которого  $u = u_0 \frac{B}{H}$  определя-

ется интенсивностью стока. Дальнобойность струй также несколько различается. В первом случае ее уместно определять по нулевому значению осевой скорости в струе, во втором — по нулевому значению скорости обратного потока (рис. 2, г), действием стока струя как бы отжимается вверх к стенке тупика. В первом случае воздух эжектируется в тупик через проницаемый торец (рис. 1, г), во втором случае эжекция естественно отсутствует.

Для «среднего» и «короткого» тупиков указанные различия не проявляются так рельефно и течения в основном схожи, не считая эффекта эжекции через проницаемый торец. Штриховыми линиями нарисованы границы струй. Координата  $x_1$  определяет начало зоны разворота струи.

Приведем результаты численного определения основных характеристики течений. Предварительно укажем, что все результаты представлены

в виде графиков зависимостей безразмерных характеристик стесненных струй от безразмерной координаты  $\bar{x} = \frac{x}{H}$ ,

$$\text{т.е. } K_u = \frac{u_x^{\text{ст}}}{u_x^{\text{св}}} = K_u\left(\frac{x}{H}\right), \quad K_u^{\text{обр}} = \frac{u_x^{\text{обр}}}{u_x^{\text{св}}} = K_u^{\text{обр}}\left(\frac{x}{H}\right),$$

$$K_y = \frac{y_x^{\text{ст}}}{y_x^{\text{св}}} = K_y\left(\frac{x}{H}\right), \quad K_L = \frac{L_x^{\text{ст}}}{L_x^{\text{св}}} = K_L\left(\frac{x}{H}\right),$$

$$K_{\bar{u}_x} = \frac{\bar{u}_x^{\text{ст}}}{\bar{u}_x^{\text{св}}} = K_{\bar{u}_x}\left(\frac{x}{H}\right), \quad K_{\bar{u}_x}^{\text{обр}} = \frac{\bar{u}_x^{\text{обр}}}{\bar{u}_x^{\text{св}}} = K_{\bar{u}_x}^{\text{обр}}\left(\frac{x}{H}\right).$$

В приведенных выше связях  $u_x$  — скорость на оси струи;  $u_x^{\text{обр}}$  — максимальная продольная скорость в обратном потоке;  $y_x$  — координата границы, разделяющей прямой и обратный потоки (граница струи);

$L_x$  — расход воздуха через поперечное сечение струи;

$\bar{u}_x$  — средняя скорость по площади струи;

$\bar{u}_x^{\text{обр}}$  — средняя скорость по площади обратного потока;

индексы «ст» и «св» означают стесненную и свободную струю.

Приведем зависимости для характеристик плоской свободной струи, которые использовались в качестве масштабных величин:

осевая скорость

$$u_x^{\text{св}} = \frac{mu_0 \sqrt{b_0}}{\sqrt{x}},$$

где  $m$  — кинематический коэффициент приточного насадка; при равномерном профиле скорости на истечении  $m = 2,62$ ;

координата границы струи

$$y_x = 0,22x;$$

полурасход в сечении струи, отнесенный к единице длины приточной щели,

$$L_x = \frac{1}{m} u_0 \sqrt{b_0} \sqrt{x} = 0,381 u_0 \sqrt{b_0} \sqrt{x};$$

средняя скорость в поперечном сечении струи

$$u_x^{\text{св}} = \frac{L_x}{y_x} = 1,73 u_0 \sqrt{\frac{b_0}{x}}.$$

Приведенные формулы справедливы для струи — источника импульса, когда  $b_0 = 0$ ,  $L_0 = 0$ ,  $u_0 = \infty$ . Для реальных струй, вытекающих из отверстий конечного размера с конечной скоростью, эти формулы применимы при  $\frac{x}{b_0} = m^2 \rightarrow \frac{x}{H} = \frac{b_0}{H} m^2 = 0,0605$ . Далее будем учитывать это обстоятельство, чтобы избежать неясностей, связанных с наличием особенностей в точке  $\bar{x} = 0$ .

На рис. 3, а приведены результаты вычислений относительной осевой скорости и максимальной продольной скорости в сечениях обратного

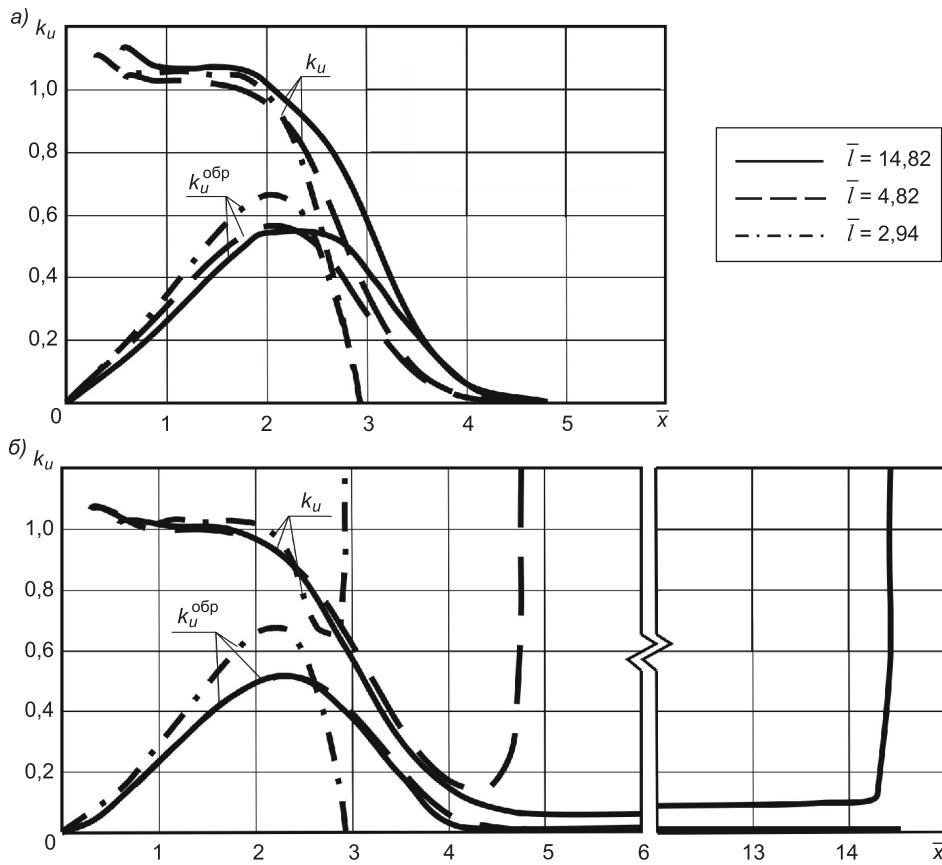


Рис. 3. Изменение относительной максимальной скорости в прямом и обратном потоках  
а) — течение по схеме 1; б) — течение по схеме 2

потока — течение по схеме 1. При  $x < 2 K_u \approx 1$ , т.е. осевые скорости стесненных и свободных струй здесь примерно одинаковы. Далее при  $x > 2$  начинается зона разворота струи и осевые скорости быстро падают. Максимальные скорости в обратном потоке вначале возрастают до некоторого максимума при  $\bar{x} = 2$  ( $k_u^{\text{обр}} = 0,55$  при  $\bar{l} = 14,82$  и при  $\bar{l} = 4,82$ ;  $k_u^{\text{обр}} = 0,68$  при  $\bar{l} = 2,94$ ). Далее  $K_u^{\text{обр}}$  падают, достигая нуля вместе с  $K_u$  и обозначая тем самым дальность струи. Заметим, что дальность струи в «длинном» и «среднем» тупиках практически одинакова и равна длине «среднего» тупика  $\bar{x}_d = 4,82$ ; дальность в «коротком» тупике равна его длине.

Рисунок 3, б иллюстрирует изменение максимальных скоростей в струе и в обратном потоке для тупика, заглушенного с обеих сторон. И здесь на интервале значений  $0,3 < \bar{x} < 2$   $K_u \approx 1$ , после чего осевые скорости быстро падают до некоторого минимального значения ( $k_u = 0,12$  при  $\bar{l} = 14,82$ ;  $k_u = 0,147$  при  $\bar{l} = 4,82$ ;  $k_u = 0,65$  при  $\bar{l} = 2,94$ ). Далее относительные скорости резко возрастают до значения  $K_u = \sqrt{\frac{l}{B} \frac{1}{m}}$ , определяемого интенсивностью стока.

Скорости обратного потока здесь также возрастают до некоторого максимума при  $\bar{x} \approx 2$  ( $K_u^{\text{обр}} = 0,51$  при  $\bar{l} = 14,82$ ,  $K_u^{\text{обр}} = 0,51$  при  $\bar{l} = 4,82$  и  $K_u^{\text{обр}} = 0,66$  при  $\bar{l} = 2,94$ ), после чего падают до нуля, фиксируя тем самым

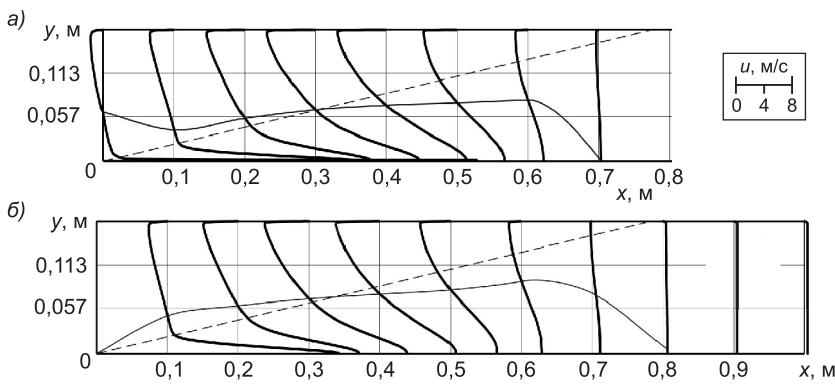


Рис. 4. Профили продольных компонент скорости в тупике длиной  $\bar{l} = 2,52$ ,  
 $\bar{l} = 14,82$

а) — течение по схеме 1; б) — течение по схеме 2

дальнобойность струй ( $x_d = 4,7$  при  $l = 14,82$ ;  $x_d = 2,94$  при  $l = 2,94$ ). Заметим, что дальность струй зависит только от длины тупика и практически не зависит от расположения источника и отсоса.

На рис. 4 приведены расчетные профили продольной компоненты скорости для тупиков «средней» длины при разной схеме подачи и удаления воздуха. Там же по координатам нулевых значений продольной скорости намечены границы струй; штриховыми линиями показана граница струи. В обоих случаях зона разворота начинается при  $\bar{x}_1 \approx 2$  ( $x_1 = 0,34$ ), дальность струй  $\bar{x}_d \approx 4,7$  ( $x_d = 0,8$  м). Для течения по схеме 1 существенное влияние имеет эжекция через открытый торец. Границы стесненных и свободных струй заметно различаются. Важно отметить, что протяженность зоны разворота струи превышает длину ее активной части.

На рис. 5 показаны результаты расчета относительных расходов воздуха в поперечных сечениях струи. Графики очень схожи. Различие отмечается только в области малых значений  $\bar{x}$ , где замечен эффект эжекции воздуха через проницаемый проем. Координата, при которой  $K_L = 0$ , очевидно соответствует дальности струи. Значения  $\bar{x}_d$ , которые фиксируются на этом рисунке, практически совпадают с ранее отмеченными.

Изменение средних по площади продольных скоростей в струе и в обратном потоке иллюстрирует рис. 6. И здесь в сечении, где начинается разворот струи ( $\bar{x}_1 \approx 2$ ), средние скоп-

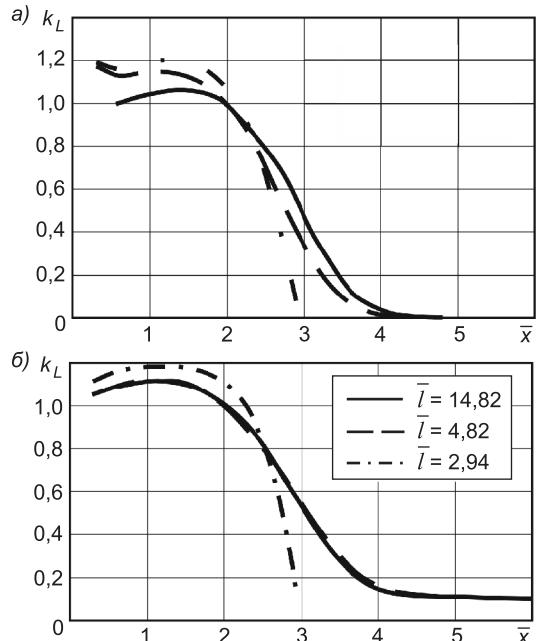


Рис. 5. Изменение относительных расходов воздуха в сечениях струи

а) — течение по схеме 1; б) — течение по схеме 2

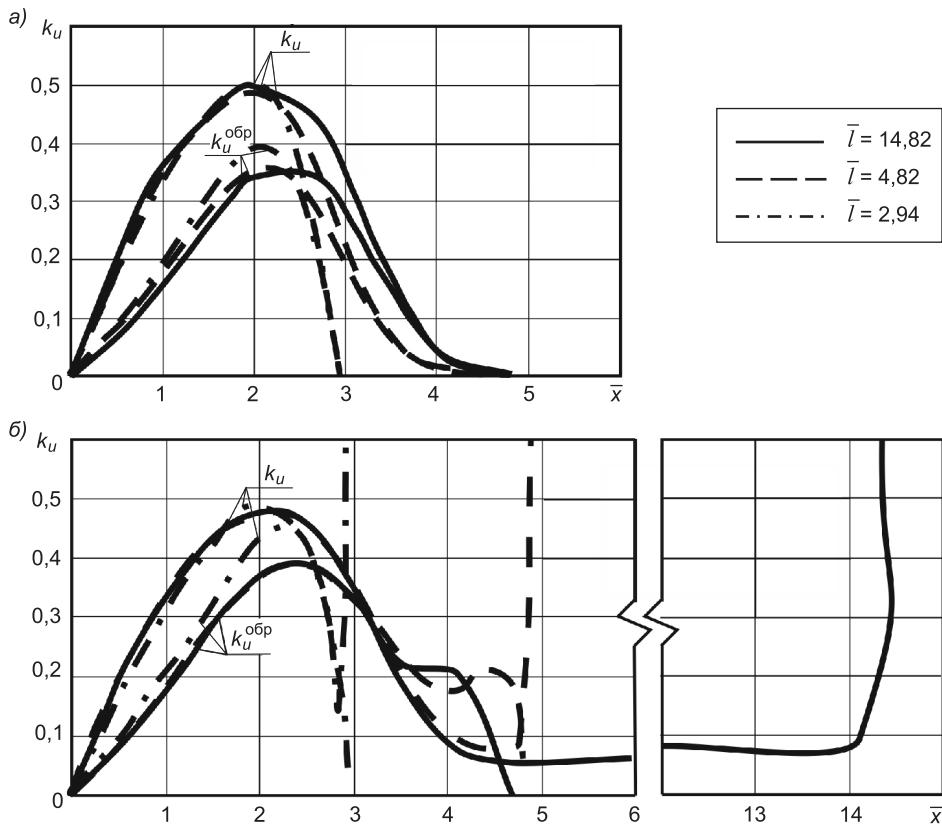


Рис. 6. Изменение относительной средней скорости в прямом и обратном потоках  
а) — течение по схеме 1; б) — течение по схеме 2

ности в прямом и обратном потоках достигают максимума, после чего падают в первом случае до нуля, а во втором до значения  $k_{\bar{u}} = \frac{1}{m} \frac{B}{H} \sqrt{\frac{l}{b_0}}$  и далее возрастают до значения  $k_{\bar{u}} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{l}{b_0}}$ .

Приведенные результаты могут стать основой для разработки уточненной методики расчета воздухораспределения при подаче воздуха стесненными плоскими струями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батурина, В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батурина. — М. : Профиздат, 1990. — 448 с.
2. Шепелев, И.А. Распространение турбулентной струи в ограниченном пространстве (осесимметричное течение) [Текст] / И.А. Шепелев, М.Д. Тарнопольский // Теплогазоснабжение и вентиляция : Тез. науч. сем. — Киев : Будівельник, 1965. — С. 75–81.
3. Тарнопольский, М.Д. Общее движение воздуха в вентилируемом помещении при струйной подаче (плоская задача) [Текст] / М.Д. Тарнопольский // Кондиционирование воздуха : Тр. НИИсантехники. — № 18. — М. : Стройиздат, 1966. — С. 179–185.
4. Бахарев, В.А. Основы проектирования и расчета отопления и вентиляции с соудароченным выпуском воздуха [Текст] / В.А. Бахарев, В.А. Трояновский. — М. : Профиздат, 1958. — 215 с.

*ПОСОХИН В.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: posohin@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
КАРЕЕВА Ю.Р., асп.; E-mail: kareeva\_87@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 25.04.11

**Posokhin V.N.**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: posohin@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia  
**Kareeva Yu.R.**, post-graduate student; E-mail: kareeva\_87@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **CHARACTERISTICS OF FLAT TURBULENT JET IN THE DEAD-END WITH DIFFERENT LOCATIONS OF INFLOW AND OUTFLOW HOLES**

The problem about flat turbulent jet in dead-ends of different length with different locations of inflow and outflow holes have been defined numerically.

**Key words:** numerical method, flat jet, dead-ends of different length.

### **REFERENCES**

1. Baturin, V.V. The basis of industrial ventilation [Text] / V.V. Baturin — M. : Profizdat, 1990. — 448 p.
2. Shepelev, I.A. Spread of the turbulent jet in the limited space (axisymmetric flow) [Text] / I.A. Shepelev, M.D. Tarnopolsky // Heat, gas supplying and ventilation : abstracts of scientific seminar. — Kiev : Budivelnik, 1965. — P. 75–81.
3. Tarnopolsky, M.D. The general movement of the air in the ventilated room with inject supply (plane problem) [Text] / M.D. Tarnopolsky // Air conditioning : works SRI Sanitary Engineering. — M. : Stroyizdat, 1966. — P. 179–185.
4. Baharev, V.A. The basis of the engineering and calculation of ventilation and heating with the concentration air output [Text] / V.A. Baharev, V.A. Troyanovsky. — M. : Profizdat, 1958. — 215 p.

УДК 697.921.452

В.И. КОСТИН, Е.Ю. РУССКИХ

## АНАЛИЗ СХЕМ РАБОТЫ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩАЮЩЕЙ ФОРМУЛЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Получена формула, позволяющая проводить анализ работы воздухонагревателей во всем диапазоне наружных температур при любой схеме регулирования.

**Ключевые слова:** воздухонагреватель, режим автоматического регулирования.

Экономичная и надежная эксплуатация воздухонагревателей невозможна без анализа их работы во всем диапазоне изменения температур наружного воздуха. При этом выбор оптимальной схемы регулирования будет определяться одновременным выполнением следующих условий.

1. В течение всего эксплуатационного периода температура обратной воды в установке должна быть не выше температуры обратной воды по графику регулирования:  $T_2 \leq T_{2_{\text{гр}}}$ .

2. Температура обратной воды должна быть не ниже 25...30 °C.

3. Скорость движения воды в трубках должна быть не менее 0,12 м/с при расчетной температуре наружного воздуха по параметрам Б и при 0 °C.

4. Тепловой поток выбранного воздухонагревателя не должен превышать расчетный более чем на 10 %.

Рассмотрим следующие уравнения для схемы регулирования теплоотдачи воздухонагревателя изменением расхода [1].

Уравнение теплового баланса системы воздухонагреватель — воздух:

$$L\rho c_p \left( \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} - t_h \right) = kF \left[ \frac{\partial(T_1 + T_2')}{2\partial \tau} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} + t_h \right) \right] + M c_m \frac{\partial(T_2' - T_2)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $L$  — объемный расход воздуха;

$c_p$ ,  $\rho$  — теплоемкость, плотность воздуха;

$t_h$ ,  $t_{\text{пп}}$  — температура наружного и приточного воздуха;

$T_1$  — температура подающей воды;

$T_2'$ ,  $T_2$  — температура обратной воды в конечный и начальный моменты;

$k$ ,  $F$  — коэффициент теплопередачи, площадь нагрева;

$M$  — масса воздухонагревателя;

$\tau$  — характерный фактор, влияющий на параметры системы;

$c_m$  — теплоемкость материала, из которого выполнены основные элементы воздухонагревателя.

Уравнение теплового баланса системы вода — воздух:

$$L\rho c_p \left( \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} - t_h \right) = c' G \frac{\partial(T_1 - T_2')}{\partial \tau} + M c_m \frac{\partial(T_2' - T_2)}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $c'$  — теплоемкость воды.

В результате преобразований уравнений (1) и (2) получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} = \frac{Bb^n \tau^{nm} D + W - E}{A + 0,5Bb^n \tau^{nm}}. \quad (3)$$

Подробный вывод формулы (3) представлен в [2].

Рассмотрим уравнения для схемы регулирования теплоотдачи воздухонагревателя через обводную линию (по воздуху):

— уравнение теплового баланса системы воздухонагреватель — вода:

$$c'G \frac{\partial(T1 - T2')}{\partial \tau} = kF \left[ \frac{\partial(T1 - T2')}{2\partial \tau} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial t_{\text{k}}}{\partial \tau} + t_{\text{h}} \right) \right] + Mc_{\text{m}} \frac{\partial(T2' - T2)}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{k}}$  — температура воздуха после воздухонагревателя,

$$t_{\text{k}} = \frac{\rho_{\text{пп}} L_{\text{пп}} t_{\text{пп}} - \rho_{\text{h}} L_{\text{h}} t_{\text{h}}}{\rho_{\text{k}} L_{\text{k}}}; \quad (5)$$

— уравнение теплового баланса системы вода — воздух:

$$L_{\text{k}} \rho c_p \left( \frac{\partial t_{\text{k}}}{\partial \tau} - t_{\text{h}} \right) = c'G \frac{\partial(T1 - T2')}{\partial \tau} + Mc_{\text{m}} \frac{\partial(T2' - T2)}{\partial \tau}, \quad (6)$$

где  $L_{\text{k}}$  — расход воздуха через воздухонагреватель;

$\tau$  — характерный фактор, влияющий на параметры системы. В рассматриваемой задаче это расход воздуха через воздухонагреватель  $L_{\text{k}}$ .

Коэффициент теплопередачи пропорционален массовой скорости, т.е.  $k \sim (v\rho)^p$ , следовательно,  $k \sim L^p$ , значит,

$$k = k_{\text{расч}} \left( \frac{L}{L_{\text{расч}}} \right)^p = \frac{k_{\text{расч}}}{L_{\text{расч}}^p} L^p. \quad (7)$$

Обозначим  $c'G(T1 - T2') = A$ ,  $\frac{k_{\text{расч}}}{L_{\text{расч}}} F = B$ ,  $\frac{1}{2} t_{\text{h}} B = E$ ,  $\frac{T1 + T2'}{2} = D$ ,

$Mc_{\text{m}}(T2' - T2) = W$ . Тогда выражение (4) можно записать в виде

$$A = BD\tau^p - \frac{1}{2}B\tau^p \frac{\partial t_{\text{k}}}{\partial \tau} - E\tau^p + W. \quad (8)$$

Получим дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial t_{\text{k}}}{\partial \tau} = \frac{(BD - E)\tau^p + W - A}{0,5B\tau^p}. \quad (9)$$

Рассмотрим уравнения для схемы регулирования с подмешиванием.

Уравнение теплового баланса системы воздухонагреватель — воздух:

$$L \rho c_p \left( \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} - t_{\text{h}} \right) = kF \left[ \frac{\partial(T1 + T2')}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} + t_{\text{h}} \right) \right] + Mc_{\text{m}} \frac{\partial(T2' - T2)}{\partial \tau}, \quad (10)$$

где  $\tau$  — характерный фактор, влияющий на параметры системы. В рассматриваемой задаче это температура подающей воды  $T1$ .

Обозначим  $L \rho c_p = A$ ,  $-L \rho c_p t_{\text{h}} = E$ ,  $k_{\text{расч}} F = B$ ,  $\frac{T2' - t_{\text{h}}}{2} = D$ ,  $b = k_v$ ,

$Mc_{\text{m}}(T2' - T2) = W$ . Тогда выражение (10) можно записать в виде

$$A \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} + E = 0,5B\tau + BD - \frac{1}{2}B \frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} + W. \quad (11)$$

Получим дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial t_{\text{пп}}}{\partial \tau} = \frac{0,5B\tau + BD + W - E}{0,5B + A}. \quad (12)$$

Из уравнения (4), обозначив  $mn = p_1 = p_2$ ,  $Bb^n D = a$ ,  $W = b$ ,  $E = c$ , получим

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{ax^{p_1} + b - c}{A + 0,5ex^{p_2}}. \quad (13a)$$

Обозначив в уравнении (9)  $p = p_1 = p_2$ ,  $BD - E = a$ ,  $W = b$ ,  $A = c$ ,  $B = e$ , получим

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{ax^{p_1} + b - c}{0,5ex^{p_2}}. \quad (13b)$$

Обозначив в уравнении (12)  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 0$ ,  $BD + W = b$ ,  $0,5B = a$ ,  $E = c$ ,  $B = e$ , запишем

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{ax^{p_1} + b - c}{A + 0,5ex^{p_2}}. \quad (13b)$$

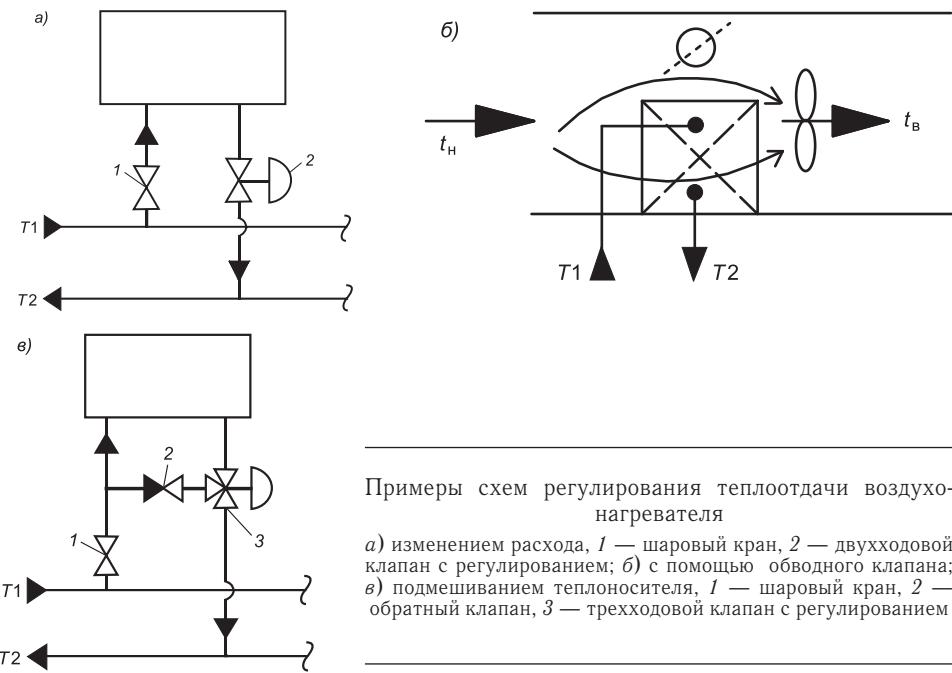
Таким образом, все уравнения сводятся к виду

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{ax^{p_1} + b - c}{A + 0,5ex^{p_2}}. \quad (14)$$

Тогда при следующих условиях получим:

- 1) при  $y = t_{\text{пп}}$ ,  $x = \Delta p$ ,  $p_1 = p_2 = mn$  — регулирование по воде (рис. а);
- 2) при  $y = t_{\text{кал}}$ ,  $x = L_k$ ,  $p_1 = p_2 = m$ ,  $A = 0$  — регулирование по воздуху (рис. б);
- 3) при  $y = t_{\text{пп}}$ ,  $x = T_1$ ,  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 0$  — регулирование подмешиванием (рис. в).

Для разных схем регулирования с помощью зависимостей, представленных выше, для разных городов был проведен расчет, позволяющий проанализировать работу установок при  $t_h = 0$  (см. таблицу, где  $t_h$ ,  $t_b$  — соответственно расчетные температуры наружного и внутреннего воздуха).



Примеры схем регулирования теплоотдачи воздухонагревателя

а) изменением расхода, 1 — шаровый кран, 2 — двухходовой клапан с регулированием; б) с помощью обводного клапана; в) подмешиванием теплоносителя, 1 — шаровый кран, 2 — обратный клапан, 3 — трехходовой клапан с регулированием

**Результаты расчета**

Город	T <sub>2рп</sub>	t <sub>н</sub> , °C	T <sub>2</sub> при t <sub>н</sub> = 0			
			Q <sub>tex</sub> = 0, Вт		Q <sub>tex</sub> > 0, Вт	
			t <sub>пп</sub> = t <sub>в</sub>	t <sub>пп</sub> > t <sub>в</sub>	Q <sub>tex</sub> /Q <sub>тр</sub>	0,3
<i>Регулирование по воде T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 150/70</i>						
Москва	44,5	-26	38	44,5	47	40
Ростов	46,4	-22	46,4	55,8	54,8	40
Омск	40,3	-37	30	30	24,5	21
Братск	38,6	-43	25	30	17,3	13,9
Якутск	36	-55	27,5	28,2	20,24	14,4
<i>Регулирование смещением T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 150/70</i>						
Москва	44,5	-26	40	44,5	45	41
Ростов	46,4	-22	45	48,3	47	48,6
Омск	40,3	-37	30	29	29	25
Братск	38,6	-43	31	31,5	31,5	25
Якутск	36	-55	26,5	22	15	13
<i>Регулирование смещением T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 130/70</i>						
Москва	44,5	-26	44,5	55	49	44
Ростов	46,4	-22	45,4	39,4	46,9	48,1
Омск	40,3	-37	40,3	37	29	27
Братск	38,6	-43	33,4	40	31,5	29
Якутск	36	-55	28,5	25	18	15
<i>Регулирование смещением T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 110/70</i>						
Москва	44,5	-26	44,5	55	50,5	45
Ростов	46,4	-22	46	48,35	46,8	47
Омск	40,3	-37	30	28,5	21,5	18
Братск	38,6	-43	31,5	40	31,5	28
Якутск	36	-55	27	28	16	14
<i>Регулирование смещением T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 95/70</i>						
Москва	44,5	-26	44,5	55	44,5	48
Ростов	46,4	-22	46,1	48	48	47,6
Омск	40,3	-37	30	28,5	21,5	18
Братск	38,6	-43	31	32	26	24
Якутск	36	-55	28	28	20	16
<i>Регулирование по воздуху T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 150/70</i>						
Москва	44,5	-26	54,7	43,8	47,8	49,6
Ростов	46,4	-22	48,3	50,4	55,4	63,9
Омск	40,3	-37	41,1	41,1	49,2	50,4
Братск	38,6	-43	38,9	39,2	42,3	44,3
Якутск	36	-55	36,6	36,8	41	43,3
<i>Регулирование по воздуху T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 130/70</i>						
Москва	44,5	-26	43,4	45	47	49,6
Ростов	46,4	-22	50,6	49,4	53,1	56,3
Омск	40,3	-37	40,3	41,5	42,7	43,9
Братск	38,6	-43	38,6	39,5	41,3	42,8
Якутск	36	-55	37,2	37,3	39,7	41
<i>Регулирование по воздуху T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 110/70</i>						
Москва	44,5	-26	42,9	45,3	46,1	47
Ростов	46,4	-22	48,5	51	51,9	55,4
Омск	40,3	-37	42,2	38,1	43,1	43,9
Братск	38,6	-43	40,5	40	40,4	41,4
Якутск	36	-55	36,8	37,9	37,9	38,9
<i>Регулирование по воздуху T<sub>1</sub> / T<sub>2</sub> = 95/70</i>						
Москва	44,5	-26	40	44,5	45,5	46,1
Ростов	46,4	-30	50,3	49,7	51,3	51,9
Омск	40,3	-37	30	29	42,2	41,8
Братск	38,6	-43	31	31,5	39,7	40,4
Якутск	36	-55	26,5	22	38,4	38,9

Из таблицы видно, что для западных регионов России (Москва, Ростов) при любых параметрах теплоносителя у запроектированных воздухонагревателей при любых схемах регулирования может наблюдаться перегрев обратной воды  $T_2$ , что недопустимо при работе установки от тепловых сетей. Возможна работа подобранных установок при регулировании смешением или изменением расхода воды для случая  $Q_{\text{tex}}/Q_{\text{tp}} = 0,5$ , при этом выполняются следующие основные требования.

1. Температура обратной воды в установке должна быть не выше температуры обратной воды по графику регулирования  $T_2 \leq T_{2\text{гр}}$ .

2. Температура обратной воды должна быть не ниже 25...30 °C.

Из расчета для городов восточных регионов страны (например, Омска, Братска, Якутска) видно, что регулирование по воздуху (через обводной клапан) подобранных установок приведет к перегреванию обратной воды  $T_2$ :  $T_2 > T_{2\text{гр}}$ . Наиболее оптимальные схемы работы воздухонагревателей для этих городов — работа при регулировании смешением и изменением расхода теплоносителя. Однако у некоторых установок при  $t_h = 0$ , работающих по той же схеме, температура обратной воды ниже температуры настройки датчика защиты от замораживания 25...30 °C, что может привести к срабатыванию системы автоматики и отключению установки во избежание замерзания теплоносителя в трубках: например, для г. Братска при  $t_b = t_{\text{пр}}$  и  $T_1/T_2 = 150/70$  температура на выходе из установки равна 25 °C. Наиболее оптимальная схема и условия работы для этой установки исходя из результатов расчета — регулирование смешением при  $T_1/T_2 = 150/70$ ,  $t_{\text{пр}} > t_b$  или  $Q_{\text{tex}}/Q_{\text{tp}} = 0,3$ . Возможны также варианты: регулирование смешением при  $T_1/T_2 = 130/70$  и  $t_{\text{пр}} = t_b$ , при  $T_1/T_2 = 110/70$ ,  $t_{\text{пр}} = t_b$  и др. (см. таблицу).

Аналогично можно проанализировать работу любой установки при любых температурных условиях и выбрать наиболее надежный вариант регулирования.

Таким образом, решение уравнения (14) позволит осуществить проверку работы выбранного воздухонагревателя во всем диапазоне температур ( $t_h = 0$  °C) по трем основным схемам регулирования (по воде, по воздуху, с подмешиванием) при любых значениях теплоносителя  $T_1/T_2$ , тем самым обеспечить выбор оптимальной схемы регулирования для конкретных условий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калмаков, А.А. Автоматика и автоматизация систем теплоснабжения и вентиляции: учебник для вузов [Текст] / А.А. Калмаков, Ю.Я. Кувшинов, С.С. Романов, С.А. Щелкунов; под ред. В.Н. Богословского. — М. : Стройиздат, 1986. — 479 с.
2. Байтингер, Н.М. Обобщенные характеристики регулирующих клапанов калориферных установок [Текст] / Н.М. Байтингер, В.В. Бурцев, В.И. Костин, Е.Ю. Русских // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3–4. — С. 58–63.

КОСТИН В.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

РУССКИХ Е.Ю., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 20.06.11

**Kostin V.I.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Russkikh E.Yu.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **FORMULA WORDS OF CALORIFERE PLANTS IN REGIME OF AN AUTOMATIC CONTROL**

Obtained a formula that allows analysis of calorifere plants in the entire range of external temperatures with any scheme of automatic control.

**Key words:** calorifere plants, regime of automatic.

### REFERENCES

1. Kalmakov, A.A. Automatics and automation of systems of a heat supply and ventilation : the textbook for high schools [Text] / A.A. Kalmakov, Yu.Ya. Kuvshinov, S.S. Romanov, S.A. Shchelkunov / Ed. by V.N. Bogoslovsky. — M. : Stroyizdat, 1986. — 479 p.
  2. Baytinger, N.M. The generalized characteristics of regulating valves calorifere plants [Text] / N.M. Baytinger, V.V. Burtsev, V.I. Kostin, E.Yu. Russkikh // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3–4. — P. 58–63.
-

УДК 628.356

В.Н. КУЛЬКОВ, Е.Ю. СОЛОПАНОВ, О.В. СОФАРОВА

## КИНЕТИКА ОСАЖДЕНИЯ АКТИВНОГО ИЛА НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОДОРОСЛЯХ В АЭРОТЕНКЕ

Приведена кинетическая зависимость осаждения активного ила на синтетических водорослях типа «ерш» при увеличении общей концентрации ила в модельной ячейке, представляющей собой вертикальный поперечный разрез аэротенка. Определено количество ила, оседающего на одном погонном метре «ершей», в зависимости от его суммарной концентрации в модели аэротенка. Получены аппроксимирующие математические уравнения.

**Ключевые слова:** аэротенк, синтетическая загрузка типа «ерш», свободноплавающий и иммобилизованный ил.

Увеличение дозы активного ила в аэротенке — одно из направлений интенсификации биологической очистки сточных вод. Рабочая доза активного ила повышается путем сокращения объема ила. Значительно повысить концентрацию свободноплавающего ила технологически сложно, так как увеличение дозы ила приводит к ухудшению его седиментационной способности и повышению выноса иловой взвеси с очищенной водой.

Другим направлением повышения дозы ила в аэрационном сооружении является использование нейтральных носителей для образования на них фиксированной микрофлоры. В аэротенке поддерживаются два вида микробиальных культур: свободноплавающая (СП), представляющая собой активный ил в обычном его понимании и прикрепленная к расположенному в иловой смеси носителю. В качестве носителей микрофлоры используются как плавающие, так и фиксировано установленные насадки из различных материалов различной формы, позволяющие поднять дозу ила в аэротенке до 8...10 г / л без ухудшения работы вторичных отстойников. К таким материалам можно отнести пластмассовый шнур (или веревку), устанавливаемый в аэротенке в виде сетей определенного плетения, свободноплавающие губки различной формы с пористостью около 97 % с внутренней и внешней поверхностью, способствующей прикреплению биомассы. В аэрационной зоне этот плавающий материал (с плотностью, близкой к 1) удерживается с помощью проволочных сеток, предотвращающих его вынос в отстойные сооружения. В отечественной практике разработаны сетчатые насадки из синтетических материалов под названием «Поли-Грин» и «Волан» для формирования прикрепленной биомассы в аэротенках АО Экологическая фирма «Грин Фрэг». Диаметр таких элементов составляет 30...35 мм («Поли-Грин») и 100...110 мм («Волан») с объемным весом 20...25 и 14...15 кг / м<sup>3</sup> соответственно. В технической литературе описываются и другие виды насадок и материалов для этих целей [1].

Для стабильного повышения дозы ила в аэротенке устанавливаются носители биомассы с большой поверхностью для обрастаия биопленкой, что позволяет повысить эффект биологической очистки за счет увеличе-

ния рабочей концентрации активного ила. При использовании дополнительной биомассы ила, размещенной на носителях, очистка осуществляется несколькими различными ценозами ила, подразделяющимися на две основные группы: ценоз активного ила, находящегося во взвешенном состоянии, и ценоз биопленки, прикрепленной к носителям. Возраст активного ила на носителях больше, чем у ила во взвешенном состоянии, не прерывно удаляемом и обновляемом. Свободнотекущий ил, возраст которого не более 3–4 сут, позволяет поддерживать в реакторе высокие скорости окисления, а ил возраста более 10–12 сут улучшает нитрифицирующие и седиментационные свойства активного ила. Кроме того, прикрепленная биомасса увеличивает общее время пребывания активного ила в системе, что особенно важно для сооружений, очищающих сложноокисляемую органику. Возрастание концентрации ила приводит к снижению нагрузок на ил и, следовательно, к подавлению нитчатого бактериального всухания и улучшению качества очистки [3].

Эффективным материалом для носителей биомассы, размещаемых в аэротенках, является ершовая нить из капронового волокна, которая обеспечивает удержание значительного количества биопленки на единицу удельной поверхности. Удельная поверхность адсорбции на ершах составляет  $500 \text{ м}^2/\text{м}^3$  [4]. При использовании носителей следует предусмотреть их защиту от засорения. Если это не обеспечивается, в процессе эксплуатации они быстро засоряются плавающими отбросами, которые загнивают и качество очищенных сточных вод ухудшается. Очистка носителей биомассы промыванием струей воды — трудоемкая процедура, а если она предусмотрена непосредственно в аэротенках, требуется их опорожнение.

Иммобилизация клеток ила на носителях обычно проходит по типу естественной адгезии, т.е. самопроизвольного прилипания бактериальных клеток к поверхности носителя. Применение носителей биомассы имеет свои ограничения. Так, например, их нельзя использовать при очистке сточных вод с повышенным содержанием нефтепродуктов и жиров (сточных вод нефтеперерабатывающих, маргариновых, молочных заводов и т.п.). Масляные продукты обволакивают материал носителей и тем самым быстро выводят их из строя. При неудовлетворительной аммонификации белковых соединений в системе канализации и высоком содержании белка в сточных водах, поступающих на очистку, этот процесс будет обеспечиваться в анаэробных зонах на носителях (их особенно много развивается на ершах), результатом чего будет увеличение содержания аммонийного азота в очищенных сточных водах [2].

Изучение кинетики осаждения и удаления ила с синтетических водорослей проводилось нами на физической модели аэротенка. Физическая модель поперечного вертикального сечения аэротенка (*модельная ячейка*) была выполнена из силикатного полированного стекла и имеет размеры: высоту 1,10 м, длину 1,5 м, ширину 0,05 м. Ячейку заполняли водопроводной водой на высоту 1,0 м и порциями (дробно) вводили активный ил, привезенный с правобережных КОС г. Иркутска. Количество воздуха, подаваемого компрессором в мелкопузырчатый аэратор, установленный в левом нижнем углу, контролировалось ротатором РМ-0,63 ГУЗ, оно составляло  $5,41 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$  (рис. 1).

В модельную ячейку помещались синтетические водоросли типа «ерш», укрепленные на раме, изготовленной из нержавеющей стали. Водоросли крепились к раме вертикально с шагом 100 мм, чтобы на  $1 \text{ м}^3$  объема модельной ячейки приходилось в среднем 50 п. м «ершей». В модели они размещались на 0,12 м выше дна и на 0,1 м ниже поверхности

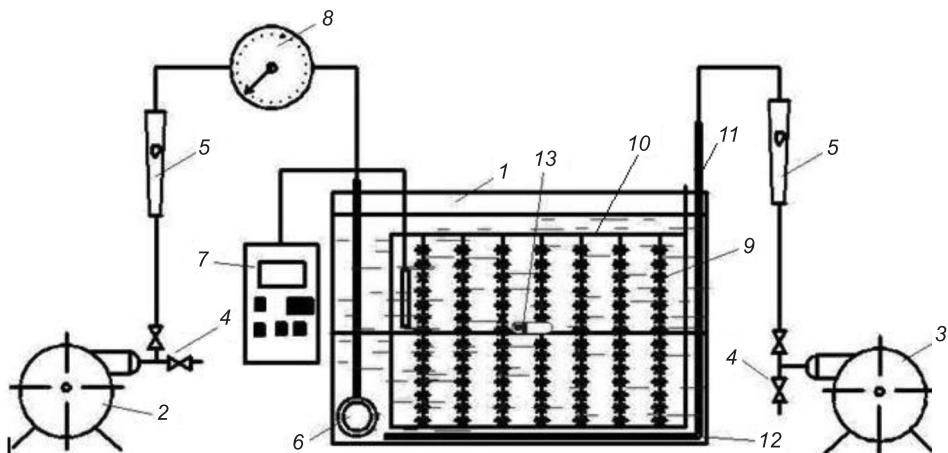


Рис. 1. Схема установки

1 — модельная ячейка; 2 — компрессор с ресивером для аэрации; 3 — компрессор с ресивером для регенерации; 4 — краны для регулирования воздуха и сброса его в атмосферу; 5 — ротаметр; 6 — аэратор; 7 — кислородомер; 8 — манометр; 9 — ершовая загрузка; 10 — рама; 11 — воздуховод к регенератору ершовой загрузки; 12 — среднепузырчатый регенератор ершовой загрузки; 13 — люксметр НТ 307

водно-иловой смеси, что необходимо для движения жидкости в основном циркуляционном контуре. В ячейке размещались 7 вертикальных «ершей» длиной 0,62 м и диаметром 120 мм. Общая длина ершовой загрузки составляла 4,34 м. Таким образом, лишь 35 % объема модели аэротенка было занято синтетическими водорослями. Над мелкапузырчатым аэратором и с правой стороны модельной ячейки (0,15 м) ершовая загрузка отсутствовала. Люксметр устанавливали стационарно с координатами (от правой стенки модели 0,72 м, от днища модели 0,56 м) и контролировали интенсивность света в контрольном квадрате между вертикальными синтетическими водорослями (рис. 2).

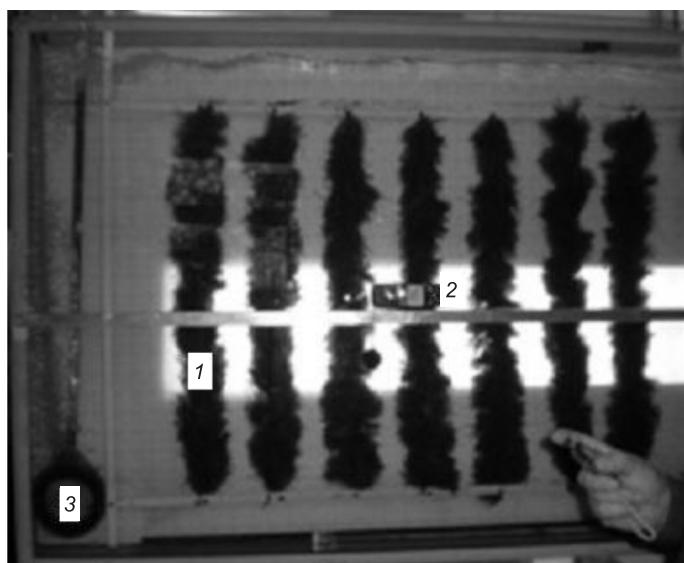


Рис. 2. Физическая модель вертикально-поперечного сечения аэротенка с синтетической загрузкой типа «ерш»

1 — загрузка типа «ерш» с прикрепленным биоцинозом; 2 — прибор для измерения интенсивности света — люксметр; 3 — мелкапузырчатый аэратор типа «Аквалайн»

Для определения концентрации свободнотекущего активного ила использовался оптический метод [5]. Плоская конструкция модельной ячейки позволяла люксметром ТКА-ПКМ проводить измерения интенсивности светового потока, проходящего через слой водно-иловой смеси. В точке измерения интенсивности светового потока (в контрольном квадрате) отбиралась водно-иловая смесь и пикнометрическим методом определялась концентрация свободнотекущего ила в г/л. Для определения концентрации свободнотекущего ила был построен калибровочный график зависимости интенсивности светового потока от концентрации ила, который необходим для экспресс-определения свободнотекущего ила по результатам измерения интенсивности светового потока.

При добавлении концентрированного ила с иловым индексом  $J = 130 \text{ см}^3/\text{г}$  в модельную ячейку контролировалась динамика светового потока, проходящего через водно-иловую смесь (рис. 3, а). Ил, добавленный в модельную ячейку, оседал на синтетических водорослях, распределяясь относительно равномерно на всех вертикальных нитях. С использованием калибровочного графика переводили интенсивность освещения в концентрацию свободнотекущего ила (рис. 3, б). Через промежуток времени, равный примерно 25 мин, значение концентрации свободнотекущего ила не выходило на предельное значение и продолжало уменьшаться. Найдено математическое выражение, описывающее процесс осаждения ила на ершах  $C_{\text{сп}} = 0,0545t^{-0,681}$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9881$ .

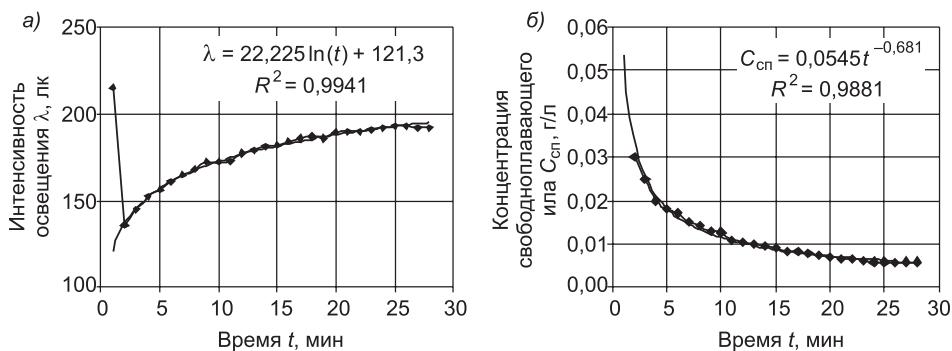


Рис. 3. Кинетика осаждения активного ила на синтетических водорослях «ерш»

Последующие добавления в модельную ячейку равных порций концентрированного ила приводили к повторению описанного процесса, но с уменьшением интенсивности света, проходящего через водно-иловую смесь, что свидетельствовало об увеличении дозы СП ила (рис. 4).

Увеличение общей концентрации ила в модельной ячейке приводит к перераспределению его на прикрепленный и свободнотекущий, но с плавным увеличением концентрации свободнотекущего ила. Зависимость концентрации прикрепленного ила (ПИ), приходящегося на одинаковый метр ершей, от общей концентрации ила в ячейке приведена на рис. 5. Для этой зависимости найдено аппроксимирующее выражение следующего вида:

$$C_{\text{ПИ}} = -0,446 C_{\text{общ}}^2 + 4,466 C_{\text{общ}}.$$

Необходимо отметить, что прирост массы прикрепленного ила на одинаковый метр ершей в исследованном интервале концентрации происхо-

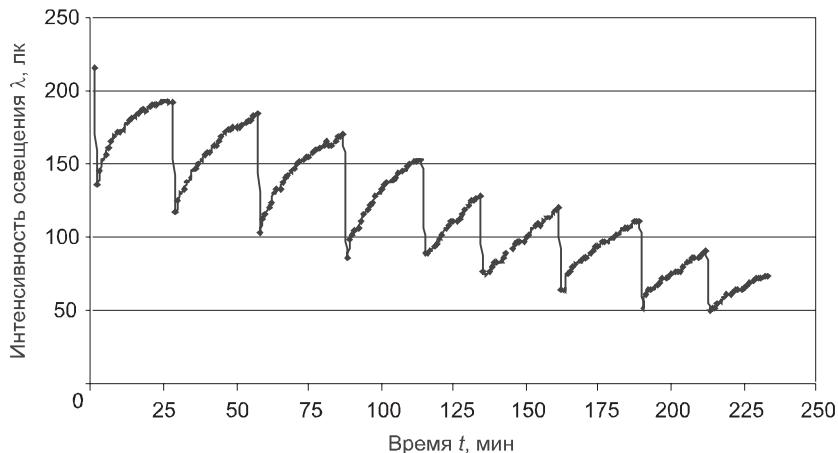


Рис. 4. Кинетика осаждения активного ила на синтетические водоросли при интенсивности мелкопузырчатой аэрации  $5,41 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

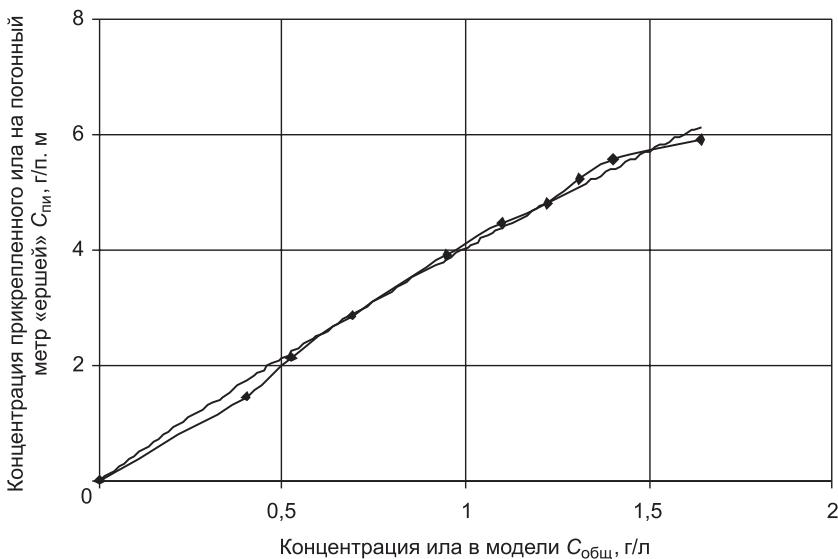


Рис. 5. Зависимость концентрации прикрепленного ила на погонном метре синтетических водорослей от общей концентрации ила в модельной ячейке

дит практически по линейной зависимости с тангенсом угла наклона к оси абсцисс 0,25.

Таким образом, независимо от общей концентрации активного ила в аэротенке всегда имеется свободноплавающий ил, доза которого зависит от интенсивности аэрации и скорости потоков в основном циркуляционном контуре, омывающем синтетические водоросли по периметру.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев : учебник для вузов. — М. : Изд-во АСВ, 2006. — 704 с.
2. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками [Текст] / Н.С. Жмур. — М. : АКВАРОС, 2003. — 512 с.
3. Патент 94028293/13 (028252) РФ от 27.07.94. Способ подавления бактериального нитчатого всухания активного ила [Текст] / Н.С. Жмур, О.М. Лапшин.

4. Куликов, Н.И. Интенсификация процессов очистки сточных вод от ксенобиотиков пространственной сукцессии закрепленных микроорганизмов [Текст] / Н.И. Куликов // Матер. I Всесоюз. конф. по микробиологии очистки сточных вод : тез. докл. — Киев : Наук. думка, 1982. — С. 29–31.
5. Кульков, В.Н. Распределение активного ила в аэротенке с центральным расположением мелкопузырчатого пневматического аэратора [Текст] / В.Н. Кульков, Е.Ю. Солопанов, И.В. Евтеева, А.С. Разум // Инженерное оборудование населенных мест и зданий : Матер. Всерос. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс]. — Иркутск : ГОУ ВПО ИрГТУ, 2009.

*КУЛЬКОВ В.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: kvn@istu.edu*

*Иркутский государственный технический университет*

*СОЛОПАНОВ Е.Ю., канд. техн. наук, доц.*

*Иркутский государственный технический университет*

*СОФАРОВА О.В., ассист.*

*Иркутский государственный технический университет*

Получено 01.08.11

**Kulkov V.N.**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kvn@istu.edu, Irkutsk State Technical University, Russia

**Solopanov E.Yu.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Irkutsk State Technical University, Russia

**Sofarova O.V.**, assistant, Irkutsk State Technical University, Russia

## **KINETICS OF DEPOSITION OF ACTIVATED SLUDGE ON SYNTHETIC BLOOMS IN THE AERATION TANK**

The kinetic dependence of deposition of the active sludge on synthetic algae such as «ruff» with an increase in the total concentration of the sludge in the model cell that represents a vertical cross-section of the aeration tank is shown. The number of sludge deposited on one meter «ruffs» depending on the total concentration of the sludge in the aeration tank model is determined. Approximate mathematical equations are obtained.

**Key words:** aeration tank, synthetic loading of the «ruff», free-and immobilized sludge.

### REFERENCES

1. Voronov, Yu.V. Wastewater and sewage treatment [Text] / Yu.V. Voronov, S.V. Yakovlev : Text-book for high school. — M. : Publ. house ACB, 2006. — 704 p.
2. Zhmур, N.S. Technological and biochemical processes in wastewater treatment plants in the facilities with aeration tanks [Text] / N.S. Zhmur. — M. : AKVAROS, 2003. — 512 p.
3. Patent 94028293/13 (028252) RF от 27.07.94. Way to suppress bacterial swelling of filamentous activated sludge [Text] / N.S. Zhmur, O.M. Lapshin.
4. Kulikov, N.I. Intensification of processes of wastewater treatment from xenobiotics spatial succession assigned microorganisms [Text] / N.I. Kulikov // Proc. All-Union conf. on wastewater microbiology. — Kiev : Nauk. dumka, 1982. — P. 29–31.
5. Kulkov, V.N. The distribution of activated sludge in the aeration tank with a central location of finely air aerator [Text] / V.N. Kulkov, E.Yu. Solopanov, I.V. Evteeva, A.S. Razum // Engineering equipment of residential areas and buildings : Materials of All-Russian scientific-practical conf. [Electronic resource]. — Irkutsk : SEI ISTU, 2009.

## СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.072.001.24

В.Н. ВЕНИК, О.И. НЕДАВНИЙ, С.П. ОСИПОВ, А.А. КОВАЛЕВ

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КУБОВИДНОГО ЩЕБНЯ

Показано, что вид распределения зерен кубовидного щебня по размерам существенно влияет на точность расчетной оценки удельной поверхности. Предложены два усовершенствованных метода расчета удельной поверхности кубовидного щебня. Погрешность оценки удельной поверхности уменьшится по сравнению с традиционным расчетом в несколько раз.

Ключевые слова: кубовидный щебень, удельная поверхность, плотность распределения, логнормальное распределение.

Кубовидный щебень широко применяется в дорожном строительстве. Под кубовидным щебнем традиционно понимается [1, 2] щебень в форме призмы или многогранника, у которого толщина или ширина меньше длины не более чем в два раза. Основными характеристиками любого щебеночного материала являются плотность, пористость, удельная поверхность. Удельная поверхность щебеночного материала наряду с характеристиками связующего (битума, цементного теста) определяет потребительские характеристики готового строительного материала (асфальтобетона, бетона) [2, 3]. Величину удельной поверхности щебня оценивают экспериментальным или расчетным путем [3]. Наиболее часто применяют расчетный метод, который не всегда удовлетворяет потребителей, так как обладает значительной погрешностью, обусловленной неполным соответствием реальности математической модели, описывающей щебень. Более адекватное описание математической модели щебня может быть достигнуто, если учесть, что размер единичного зерна щебня является случайной величиной.

Оценим удельную поверхность кубовидного щебня. Будем рассматривать сита с отверстиями квадратной формы. Пусть  $d$  — размер меньшего отверстия сита,  $D$  — размер большего отверстия сита. Удельная поверхность оценивается по приближенной формуле [3]

$$S_0 = \frac{12}{\rho(d+D)}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала щебня.

Будем считать форму единичного зерна щебня идеальным кубом с длиной ребра  $x$ , где  $x$  — случайная величина с плотностью распределения  $f(x)$ , принимающая значения в интервале от размера меньшего сита

$d$  до размера большего сита  $D$ . В этом случае среднее значение удельной поверхности находится следующим образом:

$$S = \frac{\frac{6}{\rho} \int_d^D f(x) x^2 dx}{\int_d^D f(x) x^3 dx}. \quad (2)$$

Если плотность распределения случайной величины  $f(x)$  известна, то погрешность оценки удельной поверхности по формуле (2) будет равна нулю. Сложности возникают в случае неопределенности функции  $f(x)$ , так как любое приближение  $f^*(x)$  приводит к появлению систематической погрешности  $\delta$  оценки удельной поверхности:

$$\delta = \frac{S^*}{S} - 1 = \frac{\int_d^D f^*(x) x^2 dx \int_d^D f(x) x^3 dx}{\int_d^D f^*(x) x^3 dx \int_d^D f(x) x^2 dx} - 1, \quad (3)$$

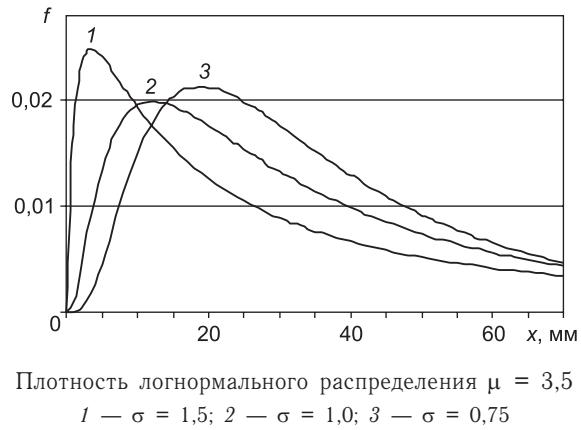
где  $S^*$  — соответствующая приближению  $f^*(x)$  оценка удельной поверхности щебня.

Проведем анализ влияния степени приближения к истинной плотности распределения случайной величины  $x$  на точность оценки удельной поверхности. Для оценки гранулометрического состава зерновых частиц применяют интегральные методы гранулометрии, к которым относится ситовый метод, основанный на анализе рассева материала с зернами крупностью 3...80 мм на наборах сит вручную. Получение информации о плотности распределения  $f(x)$  из результатов интегрального метода оценки гранулометрического состава является сложной задачей. В работе [4] доказано, что распределение размера частиц при дроблении описывается логнормальным распределением с параметрами  $\mu$ ,  $\sigma$ . На рис. 1 приведены плотности вероятности для логнормального распределения для различных параметров  $\mu$  и  $\sigma$ . Конкретный метод дробления, режимы дробления, характеристики дробимого материала определяют параметры указанного распределения. Результатом ситового метода является гистограмма  $g(x)$ :

$$g(x) = \{\alpha_i, d_{i-1} \leq x < d_i, i = 1, n\}.$$

Здесь  $\alpha_i$  — массовая доля щебня, размеры зерен которого больше меньшего размера  $i$ -го сита ( $d = d_{i-1}$ ) и меньше большего размера  $i$ -го сита ( $D = d_i$ ).

Для анализа эффективности того или иного расчетного метода оценки удельной поверхности зернового материала необходимо допустить ту



Плотность логнормального распределения  $\mu = 3,5$   
1 —  $\sigma = 1,5$ ; 2 —  $\sigma = 1,0$ ; 3 —  $\sigma = 0,75$

или иную аппроксимацию плотности распределения  $f(x)$  на интервале от  $d$  до  $D$ . Логнормальное распределение гладкое, поэтому представляется разумным оценить приближение истинного распределения на интересующем интервале постоянной величиной (равномерное распределение) или линейной функцией (линейное распределение).

**Гипотеза 1.** Оценка удельной поверхности кубовидного щебня в предположении о равномерности распределения зерен по размерам более точная по сравнению с оценкой по среднему арифметическому значению меньшего и большего размеров сит.

**Гипотеза 2.** Оценка удельной поверхности кубовидного щебня в предположении о линейности распределения зерен по размерам более точная по сравнению с оценкой в предположении о равномерности распределения.

**Равномерное распределение.** В этом случае функция  $f(x)$  имеет вид  $f(x) = \frac{1}{D-d}$ . После подстановки  $f(x)$  в формулу (2) получим выражение для вычисления удельной поверхности

$$S = \frac{8}{\rho} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^4 - d^4}. \quad (4)$$

Относительное отклонение оценки (1) от истинного значения удельной поверхности в рассматриваемом случае находится из выражения

$$\delta = \frac{S_0}{S} - 1 = \frac{(D-d)^2}{2(D^2 + dD + d^2)}. \quad (5)$$

Из анализа полученного выражения следует, что применение формулы (1) для оценки удельной поверхности приводит к завышению оценки. В табл. 1 приведены результаты отклонения оценки удельной поверхности для наиболее типичных интервалов размеров щебня. Максимальное завышение достигается для интервала 3...20 мм (38,7 %), минимальное — для интервала 15...20 мм (2 %). Из анализа формулы (5) можно сделать вывод о том, что относительное отклонение оценки удельной поверхности по формуле (1) для случая равномерного распределения за-

Таблица 1  
Погрешность оценки удельной поверхности для линейного распределения кубовидного щебня по размерам, %

Интервал, мм	$a = 0$		$a = 2$		$a = 1$		$a = -1$		$a = -2$		$a = \infty$	
	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_1$	$\delta_2$								
3...10	17,6	23,4	4,9	23,1	4,6	24,7	6,0	24,2	5,6	23,8	5,2	
3...20	30,8	38,9	6,2	38,7	6,0	39,8	6,9	39,5	6,6	39,2	6,4	
5...10	7,1	10,0	2,7	9,9	2,6	10,7	3,3	10,4	3,1	10,2	2,9	
5...20	21,4	28,2	5,5	27,9	5,4	28,8	6,1	28,6	5,9	28,4	5,7	
10...20	7,1	10,1	2,8	10,0	2,7	10,4	3,1	10,3	3,0	10,2	2,9	
15...20	1,4	2,0	0,6	2,0	0,6	2,0	0,7	2,0	0,7	2,0	0,6	
20...40	7,1	10,2	2,8	10,1	2,8	10,3	3,0	10,3	2,9	10,2	2,9	
40...70	4,8	7,0	2,1	7,0	2,1	7,1	2,1	7,0	2,1	7,0	2,1	
40...80	7,1	10,2	2,9	10,2	2,8	10,3	2,9	10,2	2,9	10,2	2,9	

Примечание:  $\delta_1$  — по формуле (1),  $\delta_2$  — по формуле (4),  $a = 0$  — равномерное распределение.

висит только от отношения меньшего и большего размеров сит. Для большинства рассматриваемых интервалов точность оценки удельной поверхности с помощью выражения (1) вряд ли можно считать удовлетворительной.

**Линейное распределение.** Линейное распределение описывается функцией  $f(x) = a_0 x + b_0$ , условие нормировки  $\int_d^D f(x) dx = 1$ . Плотность распределения для линейного распределения является либо однопараметрической

$$f(x) = \frac{2(ax+1)}{a(D^2 - d^2) + 2(D-d)}, \quad a = \frac{a_0}{b_0}, \quad b_0 \neq 0,$$

либо непараметрической

$$f(x) = \frac{2x}{D^2 - d^2}, \quad b_0 = 0.$$

Формула для вычисления значения удельной поверхности кубовидного щебня в случае однопараметрического линейного распределения имеет вид

$$S = \frac{10}{\rho} \cdot \frac{3a(D^4 - d^4) + 4(D^3 - d^3)}{4a(D^5 - d^5) + 5(D^4 - d^4)}. \quad (6)$$

Относительное отклонение оценки удельной поверхности по формуле (1) вычисляется следующим образом:

$$\delta_1 = \frac{6[4a(D^5 - d^5) + 5(D^4 - d^4)]}{5[3a(D^4 - d^4) + 4(D^3 - d^3)](D+d)} - 1.$$

Если  $a = 0$ , то выражение (6) совпадает с оценкой (4) для равномерного распределения. Относительное отклонение зависит от параметра  $a$  и отношения  $d/D$ . Максимальное значение относительного отклонения оценки удельной поверхности достигается для  $d/D = 0$ :

$$\delta_{\max} = \frac{6(4a+5)}{5(3a+4)} - 1.$$

При значении параметра  $a = -1,111$  максимальное отклонение равно нулю. Если  $a > -1,111$  или  $a < -1,333$ , то оценка удельной поверхности будет завышенной, если  $-1,333 < a < -1,111$  — заниженной.

Если линейное распределение не зависит от параметра, то удельная поверхность находится из выражения

$$S = \frac{15}{2\rho} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D^5 - d^5},$$

которое выводится из формулы (6) с помощью предельного перехода  $a \rightarrow \infty$ .

Относительное отклонение в этом случае вычисляется по формуле

$$\delta_1 = \frac{8(D^5 - d^5)}{5(D^4 - d^4)(D+d)} - 1.$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов относительных отклонений оценки по формуле (1) удельной поверхности  $\delta_1$  для линейного параметри-

ческого и линейного непараметрического распределений. Значения параметра  $a$  варьировали от  $-2$  до  $+2$ . Максимальное значение отклонения оценки удельной поверхности по формуле (1) для параметрического линейного распределения достигается для интервала  $3\dots20$  мм ( $39,8\%$ ), минимальное для интервала  $15\dots20$  мм ( $2\%$ ). Для всех рассматриваемых интервалов зависимость анализируемого отклонения от значения параметра  $a$ ,  $|a| > 1$ , можно считать несущественной, расхождение не более  $5\%$ .

Выше было сказано, что равномерное распределение может зависеть от одного параметра, а может и не иметь параметра. Пусть мы имеем дело с линейным распределением, но оценку удельной поверхности осуществим по формуле (4). Относительное отклонение оценки для параметрического линейного распределения находится по формуле

$$\delta_2 = \frac{4(D^3 - d^3)[4a(D^5 - d^5) + 5(D^4 - d^4)]}{5(D^4 - d^4)[3a(D^4 - d^4) + 4(D^3 - d^3)]} - 1.$$

Соответствующее выражение для непараметрического линейного распределения имеет вид

$$\delta_2 = \frac{16(D^3 - d^3)(D^5 - d^5)}{15(D^4 - d^4)(D^4 - d^4)} - 1.$$

В табл. 1 приведены результаты расчета  $\delta_2$  для линейного параметрического распределения и линейного непараметрического распределения ( $a = \infty$ ). Для любого интервала размеров щебня  $\delta_2(a = 2) \approx \delta_2(a = \infty)$ .

Оценка удельной поверхности, вычисленная по формуле (4), для всех рассматриваемых интервалов для линейного распределения зерен кубовидного щебня по размерам точнее не менее чем в 3 раза, по сравнению с вычисленной по формуле (1). Эффективность тем выше, чем меньше отношение  $d/D$ .

Применение формулы (4) существенно повышает точность расчетной оценки удельной поверхности кубовидного щебня. Полученное максимальное значение отклонения в  $6,6\%$  можно считать удовлетворительным.

Использование формулы (4) оправданно в условиях полной неопределенности, когда известны только значения меньшего и большего размеров сит. Проверим ее эффективность для логнормального распределения размера частиц на всем интервале возможных значений, т.е. от  $0$  до  $D_{\max}$ .

**Логнормальное распределение.** Плотность логнормального распределения с параметрами  $\mu$ ,  $\sigma$  описывается функцией

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{x\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

Удельная поверхность в этом случае оценивается по формуле

$$S = \frac{6 \int_d^D x e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx}{\rho \int_d^D x^2 e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx}.$$

Параметры логнормального распределения  $\mu$  и  $\sigma$  находятся методом наименьших квадратов по результатам ситового метода. Для данных,

приведенных в работе [3], получены значения параметров  $\mu \approx 3,5$  и  $0,75 \leq \sigma \leq 1,5$ .

Для сравнения методов оценки удельной поверхности были рассчитаны зависимости относительных отклонений  $\delta_1(d)$  при использовании формулы (1) и  $\delta_2(d)$  при использовании формулы (4). В табл. 2 приведены результаты расчетов оценки удельной поверхности для логнормального распределения с параметрами  $\mu = 3,5, \sigma = 1,5; 1,0; 1,0$  по формулам (1) и (4). Оценка по формуле (4) может быть и заниженной, и завышенной. Для большинства интервалов по сравнению с оценкой по формуле (1) точность возрастает в несколько раз. Для некоторых наборов значений параметров  $\mu, \sigma$ , минимального и максимального размеров сит улучшения точности оценки не происходит.

Таблица 2

**Погрешность оценки удельной поверхности для линейного распределения кубовидного щебня по размерам, %**

Интервал, мм	$\mu = 3,5, \sigma = 1,5$			$\mu = 3,5, \sigma = 1,0$			$\mu = 3,5, \sigma = 0,75$		
	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
3...10	15,7	-1,7	-0,25	21,5	3,3	-1,1	27,3	8,2	0,48
3...20	24,9	-4,5	-0,25	31,0	0,14	-3,6	36,8	4,6	-2,6
5...10	6,0	-1,0	-0,02	8,6	1,4	-0,23	11,9	4,4	-0,06
5...20	16,5	-4,0	0,06	21,2	-0,23	-1,7	26,8	3,8	-2,2
10...20	5,0	-2,0	0,03	6,5	-0,62	-0,14	8,4	1,2	-0,37
15...20	0,9	-0,5	0,001	1,1	-0,24	-0,004	1,4	0,09	-0,01
20...40	3,9	-3,0	0,05	4,1	-2,8	-0,03	4,4	-2,5	-0,16
40...70	2,0	-2,7	0,01	1,3	-3,4	-0,05	0,34	-4,3	-0,16
40...80	2,8	-4,0	0,02	1,6	-5,1	-0,13	0,02	-6,6	-0,45

Примечание:  $\delta_1$  — по формуле (1),  $\delta_2$  — по формуле (4),  $\delta_3$  — по формуле (6).

Проверим гипотезу 2. Для улучшения точности оценки удельной поверхности кубовидного щебня применим формулу (6). Выше было сказано, что параметры  $\mu, \sigma$  определяются по результатам ситового метода. Исходя из этих значений можно предложить способ вычисления параметра линейного распределения:

$$a = \frac{f(\mu, \sigma, D) - f(\mu, \sigma, d)}{f(\mu, \sigma, d)D - f(\mu, \sigma, D)d}. \quad (7)$$

Здесь  $f(\mu, \sigma, x)$  — плотность логнормального распределения с параметрами  $\mu, \sigma$ .

В табл. 2 приведены результаты расчетов  $\delta_3$  относительного отклонения оценки удельной поверхности по формуле (6) с параметром  $a$ , вычисленным с помощью выражения (7). Анализ представленных результатов показал, что погрешность оценки снижается в несколько раз и для рассматриваемых интервалов и исследованного диапазона значений  $\mu, \sigma$  не превосходит по абсолютной величине 3,6 %.

Для проверки эффективности применения усовершенствованных методов расчета удельной поверхности была проведена серия экспериментальных исследований параметров единичного зерна кубовидного щебня. Исследовался щебень из базальта с размерами от 15 до 33 мм, объем вы-

борки 200 зерен щебня. В процессе исследований оценивались следующие параметры единичного зерна щебня: линейные размеры, площадь боковой поверхности, масса, удельная поверхность. Была экспериментально подтверждена гипотеза А.Н. Колмогорова о принадлежности распределения щебня по размерам при дроблении каменных материалов классу логнормальных распределений. Параметры логнормального распределения для анализируемых выборок зерен кубовидного щебня —  $\mu = 2,48$ ;  $\sigma = 0,12$ . Весь диапазон изменения линейных размеров кубовидного щебня был разбит на 6 интервалов. Для каждого интервала подсчитывались выборочные средние значения измеряемых параметров единичного зерна кубовидного щебня и соответствующие средние значения, вычисленные аналитическим способом для указанных параметров логнормального распределения. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных средних значений площади боковой поверхности зерна щебня — около 5 %, массы зерна около — 8 %, линейного размера — 2,5 %, удельной поверхности — около 8 %. Соответствующие расхождения для всего диапазона изменения линейных размеров щебня составили: для среднего значения площади боковой поверхности зерна 0,5 %, для среднего значения массы зерна 2,5 %, для среднего значения линейного размера 0,1 %, для значения удельной поверхности 2,4 %. Это означает, что экспериментальным путем подтверждена эффективность применения усовершенствованных методов оценки всех основных параметров единичного зерна кубовидного щебня, в том числе и удельной поверхности.

Усовершенствованные методы расчета удельной поверхности кубовидного щебня позволяют повысить точность оценки не менее чем в два раза. Дальнейшее совершенствование методов может быть связано с более адекватной статистической моделью описания формы «кубовидного щебня», что приведет к продвижению на пути решения такой важной научно-технической и народно-хозяйственной проблемы [3], как выработка единого подхода и критериев определения характеристик кубовидного щебня с подчинением всех технических характеристик исходных материалов цели — обеспечению долговечности дорожных покрытий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кушка, В.Н. Кубовидный щебень. Девять лет спустя [Текст] / В.Н. Кушка // Стройт. материалы. — 2010. — № 6. — С. 20–21.
2. Проблемы развития автодорожного комплекса [Текст] // Инновации. Технологии. Решения. — 2007. — № 6. — С. 26–28.
3. Королев, И.В. Пути экономии битума в строительстве [Текст] / И.В. Королев. — М. : Транспорт, 1988. — 149 с.
4. Колмогоров, А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / А.Н. Колмогоров. — М. : Наука, 1986. — 535 с.

ВЕНИК В.Н., асп.

Томский государственный архитектурно-строительный университет  
НЕДАВНИЙ О.И., д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет  
ОСИПОВ С.П., канд. техн. наук, доц.; E-mail: osip 1809@rambler.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
КОВАЛЕВ А.А., асп.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 27.06.11

**Wenik V.N.**, post-graduate student, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

**Nedavny O.I.**, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

**Osipov S.P.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: osip1809@rambler.ru, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

**Kovalev A.A.**, post-graduate student, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

## **IMPROVING THE CURRENT METHOD OF ASSESSMENT SPECIFIC SURFACE CUBOID RUBBLE**

It is shown that the form of cube-shaped distribution of grains of crushed stone the size significantly affects the accuracy of estimation of specific surface. Proposed an improved method for calculating the surface area cube-shaped rubble. Error in estimating the specific surface area decreased as compared with the traditional calculation of more than two times...

**Key words:** cubiform gravel, surface area, density, lognormal distribution.

### REFERENCES

1. Kushka, V.N. Cubiform rubble. Nine years later [Text] / V.N. Kushka // Construction materials. — 2010. — N 6. — P. 20–21.
  2. Problems of development of road sector [Text] // Innovations. Technology. Resolution. — 2007. — N 6. — P. 26–28.
  3. Korolev, I.V. Ways savings of bitumen in construction [Text] / I.V. Korolev. — M. : Transport, 1988. — 149 p.
  4. Kolmogorov, A.N. Probability theory and mathematical statistics [Text] / A.N. Kolmogorov. — M. : Nauka, 1986. — 535 p.
-

**УДК 625.855.3:625.7.06**

**Н.Х. ЧАН, И.В. МАРДИРОСОВА, О.А. БАЛАБАНОВ**

## **КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЯМ ЖАРКОГО И ВЛАЖНОГО КЛИМАТА**

Разработан комплексный модификатор на основе полиолефина, гидратной извести и технического углерода, повышающий структурно-механические свойства асфальтобетона и более чем в два раза снижающий интенсивность накопления в нем остаточных деформаций. Комплексно-модифицированный асфальтобетон обладает повышенными сдвигово-, водоустойчивостью, а также стойкостью к старению и может быть рекомендован для эксплуатации в условиях жаркого и влажного климата.

**Ключевые слова:** полиолефин, гидратная известь, технический углерод, асфальтобетон, сдвигостойчивость, водоустойчивость, стойкость к старению.

Повышение грузонапряженности, скорости и интенсивности движения автомобильного транспорта вызывает ускоренное разрушение асфальтобетонных покрытий. Под воздействием высоких летних температур асфальтобетон приобретает пластичность и вязкость, что приводит к образованию на покрытиях продольной колеи и поперечных волн, ухудшающих комфортность и безопасность движения. Помимо этого, совместное воздействие температуры, солнечной радиации и кислорода воздуха вызывает старение нефтяных дорожных битумов, приводящее к изменению их группового состава и повышению вязкости. В результате повышается температура хрупкости битума и снижается его адгезия к минеральным материалам, что приводит к выкрошиванию и шелушению поверхности асфальтобетонного покрытия, образованию сетки трещин и т.п. Поэтому вопрос повышения качества асфальтобетона становится все более актуальным. Главными направлениями улучшения свойств асфальтобетона являются обеспечение сдвигостойчивости при высоких температурах, коррозионной устойчивости под действием осадков и замедление темпа старения битумного вяжущего.

Одно из основных направлений повышения качества битума как в России, так и за рубежом — это использование различных полимерных модификаторов, действующих на процессы структурообразования битумов и способствующих улучшению их свойств при эксплуатационных температурах. В России наибольшее распространение получили модификаторы на основе термоэластопластов типа СБС, в частности дивинилстирольный термоэластопласт ДСТ. Однако совмещение ДСТ с битумом связано с уменьшением доли масляной фракции вяжущего. Эти процессы сопровождаются коагуляцией асфальтенов, что требует введения пластикаторов, в качестве которых обычно применяют индустриальное масло. Дополнительное введение масел ухудшает адгезию битума к минеральным материалам, снижает вязкость вяжущего, что обуславливает понижение сдвигостойчивости асфальтобетона.

Указанные недостатки практически отсутствуют у разработанного нами комплексного модификатора, включающего полиолефиновый ком-

понент (ПК), гидратную известь (ГИ) и технический углерод (ТУ). Введение полиолефина в битумное вяжущее значительно изменяет его структурные и физико-механические свойства за счет взаимодействия парофенонафтеновых компонентов битума с полимерной матрицей, и таким образом формируется новая структура с прочным соединением полярного и аморфного битума с неполярным структурно-вязким полиолефином [1]. В результате этого образуется пространственная эластично-термоустойчивая структура вяжущего, повышается температура размягчения, интервал пластичности, эластичность и вязкость битумного вяжущего (понижается показатель глубины проникания иглы).

Порошкообразная гидратная известь в составе комплексного модификатора выполняет роль активного наполнителя, оказывающего положительное влияние на формирование структуры асфальтового вяжущего. Это обусловлено ее высокой дисперсностью (размер большинства зерен меньше 100 нм) и химическим составом. Являясь гидроксидом кальция, известь способна вступать в химические реакции с асфальтогенными кислотами битума, образуя активную солевую форму ПАВ, химически сорбирующуюся на минеральной поверхности. Это оказывает положительное влияние на адгезию битума к минеральным материалам, обеспечивая повышение водостойкости асфальтобетона в процессе его эксплуатации.

Оценку комплексного влияния полиолефина и гидратной извести на свойства асфальтового вяжущего и выбор оптимального соотношения между ними проводили с использованием методов математического планирования эксперимента. Соотношение между битумом и минеральным порошком в асфальтовом вяжущем составляло 1:1,5, что наиболее отвечает составам, рекомендуемым ГОСТ 9128–2009, и согласуется с исследованиями асфальтового вяжущего, проведенными авторами в работе [2]. Использовали полное двухфакторное планирование эксперимента. В качестве варьируемых факторов принимали:  $X_1$  — количество полиолефина в битуме (от 0 до 6 %);  $X_2$  — количество гидратной извести в минеральном порошке (от 0 до 40 %). Большие количества добавок не обеспечивают удобоукладываемость асфальтобетонной смеси и температуру хрупкости асфальтового вяжущего (рис. 1 и 2). Изолинии экспериментально-статистических моделей свойств асфальтового вяжущего представлены на рис. 3.

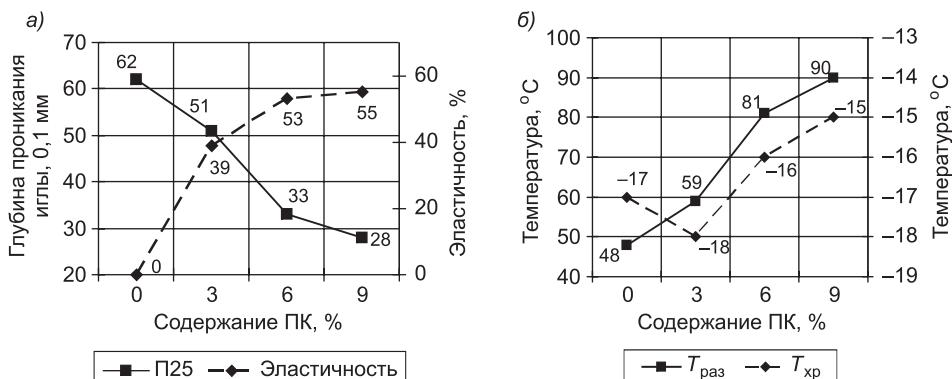


Рис. 1. Зависимость свойств битума БНД60/90 от содержания в нем ПК

*a* — пенетрация при 25 °С и эластичность; *б* — температуры размягчения и хрупкости

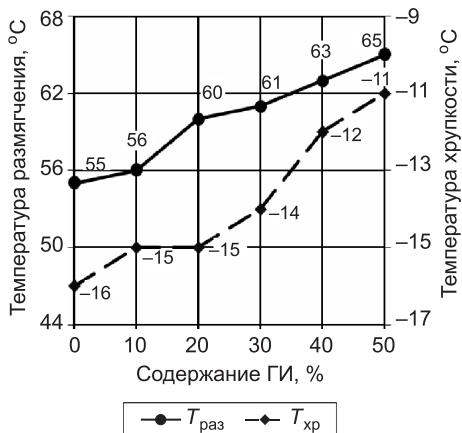


Рис. 2. Зависимость свойств асфальтового вяжущего от содержания в нем гидратной извести

фин способствует ее повышению, а гидратная известь незначительно уменьшает. При рекомендуемых содержаниях модификаторов, указанных выше, эластичность асфальтового вяжущего достигает 30–40 %. Наличие свойств эластичности благоприятно сказывается на циклической усталости асфальтобетонов при умеренных и низких температурах [3].

Изолинии экспериментально-статистической модели растяжимости модифицированного асфальтового вяжущего, приведенные на рис. 3, *д*, указывают на понижение этого свойства. Однако полученные значения растяжимости можно считать приемлемыми. В работе [3] отмечается, что показатель растяжимости оказывается малопригодным для оценки качества битума и не позволяет судить о поведении вяжущего в дорожном покрытии в условиях динамических воздействий. Высокие значения растяжимости указывают на однородность вяжущего, но могут служить причиной снижения сдвигостойчивости покрытия.

Согласно [2] необходимый диапазон температуры размягчения асфальтового вяжущего, обеспечивающий устойчивость асфальтобетона к пластическим деформациям при высоких летних температурах, от 54 до 76 °C. Такие температуры, судя по полученным изолиниям экспериментально-статистической модели для температуры размягчения (рис. 3, *г*), соответствуют следующим концентрациям модифицирующих добавок: полиолефина в количестве 3,0–4,6 % от массы битума; гидратной извести 20–30 % от массы минерального порошка. С другой стороны, анализ изолиний экспериментально-статистической модели для температуры хрупкости (рис. 3, *в*) показывает, что увеличение содержания ГИ в минеральном порошке отрицательно сказывается на этом показателе и, видимо, введение ее в состав комплексного модификатора в количестве более 20 % нецелесообразно. В связи с этим указанное выше содержание добавок 3,0 % ПК в битуме и 20 % ГИ в минеральном порошке приняты нами за оптимальное для модифицирующих компонентов в асфальтовом вяжущем.

Одной из задач настоящих исследований является разработка способов замедления процессов старения асфальтобетонной смеси, модифицированной добавками ПК и ГИ. Рассматривалась возможность применения в качестве антистарителя асфальтобетона добавки технического углерода (ТУ). Технический углерод обладает развитой и высокоактивной поверхностью, способной присоединять кислород и свободные радикалы.

Полученные данные свидетельствуют о синергизме действия добавок полиолефина и гидратной извести. На изолиниях моделей свойств вяжущего прослеживается, что с увеличением количества применяемых модификаторов наблюдается понижение глубины проникновения иглы (рис. 3, *а*, *б*) и увеличение температуры размягчения (рис. 3, *г*), что способствует повышению сдвигостойчивости асфальтобетона при высоких летних температурах.

Влияние предлагаемого комплексного модификатора на эластичность асфальтового вяжущего неоднозначно (рис. 3, *е*). Полиоле-

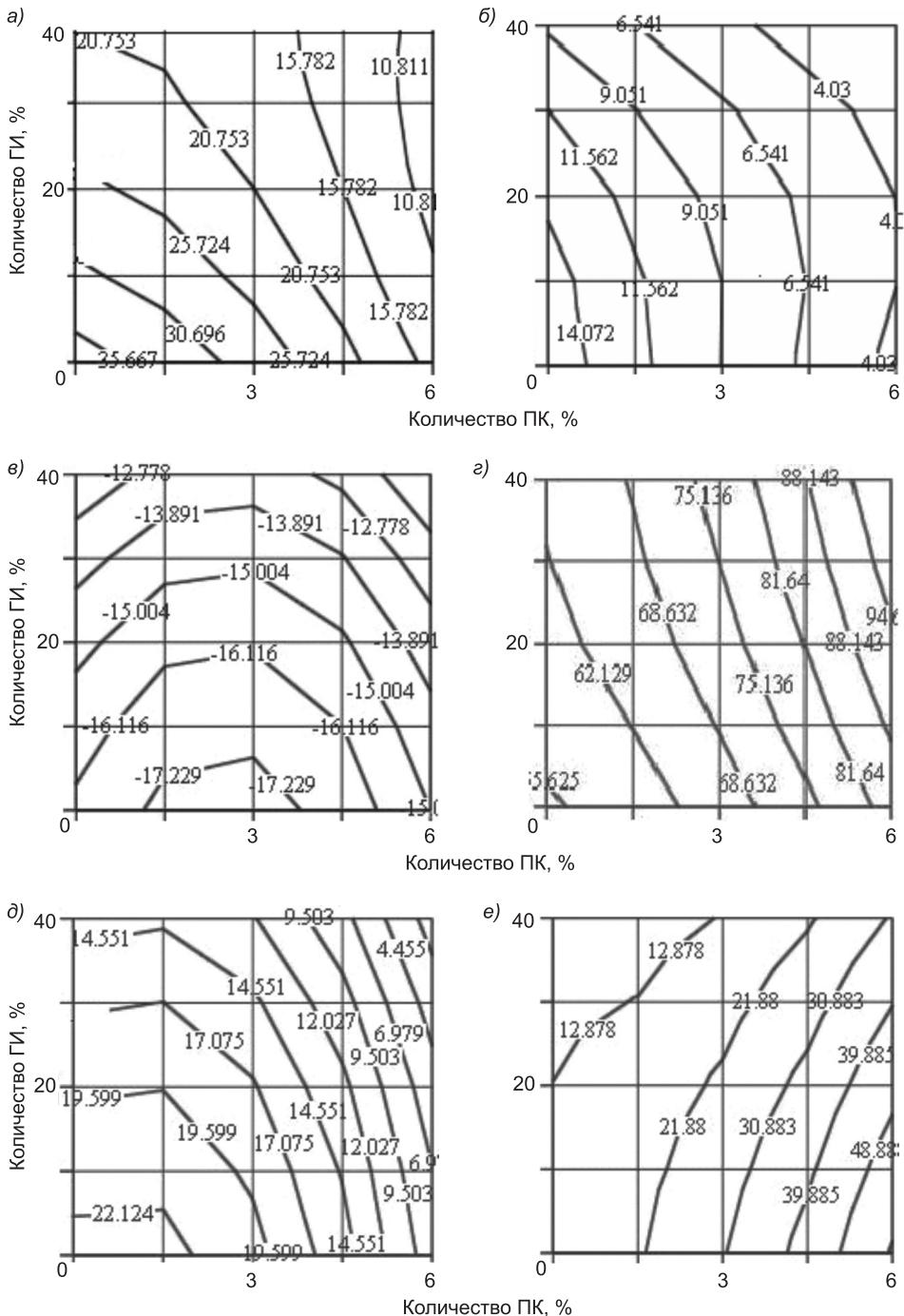


Рис. 3. Изолинии экспериментально-статистических моделей свойств асфальтового вяжущего:

а — пенетрация при 25 °C; б — пенетрация при 0 °C; в — температура хрупкости; г — температура размягчения; д — растяжимость; е — эластичность

В сочетании с гидратной известью он может играть роль антиоксиданта битумного вяжущего. Взаимодействуя со свободными углеводородными радикалами асфальтенов битума, ТУ обрывает цепные реакции окисления, замедляет тем самым образование высокомолекулярных соединений в процессе старения.

Оценку старения асфальтобетона проводили по методике Supergravel, разработанной в рамках программы SHRP [4] в США. Согласно этой методике, исследования выполнялись при кратковременном (Short Term Over Aging – STOA) и долговременном (Long Term Over Aging – LTOA) старении. При кратковременном старении смесь после приготовления выдерживали в течение 6 ч при температуре 135 °C в термическом шкафу с циркуляцией воздуха, после чего из нее готовили образцы для проведения испытаний. При долговременном старении смесь в тех же условиях выдерживали при температуре 85 °C в течение трех дней. В качестве критериев влияния процесса старения на свойства асфальтобетона использовался показатель кратковременного  $K_S$  и долговременного  $K_L$  старения, которые определяли по формулам

$$K_S = \frac{R_{20}^{\text{STOA}}}{R_{20}} \cdot 100 \%, \quad K_L = \frac{R_{20}^{\text{LTOA}}}{R_{20}} \cdot 100 \%.$$

Здесь  $R_{20}^{\text{STOA}}$  — предел прочности асфальтобетона при сжатии и 20 °C после кратковременного старения, МПа;

$R_{20}^{\text{LTOA}}$  — то же, после долговременного старения, МПа;

$R_{20}$  — то же, до старения, МПа.

Полученные зависимости приведены на рис. 4. Анализ зависимостей показывает, что использование комплексной добавки из гидратной извести и технического углерода замедляет процесс старения асфальтобетона. Установлено, что наиболее эффективное содержание ТУ в составе асфальтобетона составляет 0,2 %, а гидратной извести — 1,5 % от массы смеси. В этом случае коэффициенты  $K_S$  и  $K_L$  поникаются соответственно на 10 и 13 %, что указывает на замедление процесса старения асфальтобетона как при приготовлении смеси, так и при эксплуатации. Дальнейшее увеличение содержания этих добавок менее заметно замедляет процесс старения асфальтобетона.

Исследования влияния комплексного модификатора из полиолефина, гидратной извести и технического углерода на физико-механические свойства асфальтобетона было проведено на четырех составах смесей типа А с использованием в качестве минерального материала гранитного щебня и при содержании битума БНД 60/90 в количестве 5,2 %. Первая смесь не содержала модифицирующую добавку, во вторую вводилось

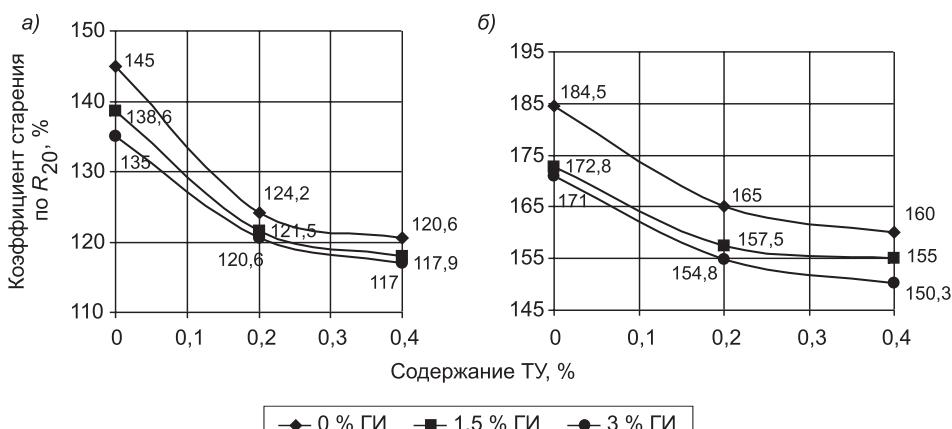


Рис. 4. Старение асфальтобетонной смеси по методике STOA (a) и LTOA (б) в зависимости от содержания ГИ и ТУ

дополнительно 3 % ПК, в третью — 3 % ПК и 1,5 % ГИ и в четвертую — 3 % ПК, 1,5 % ГИ и 0,2 % ТУ (мас. %). При приготовлении смесей полиолефиновая добавка совмещалась с битумом, гидратная известь и технический углерод подавались непосредственно на минеральные материалы.

В таблице представлены результаты испытаний этих смесей, из которых следует, что асфальтобетон, полученный с использованием комплексной добавки из ПК, ГИ и ТУ, обладает наиболее повышенными структурно-механическими свойствами. Прочность асфальтобетонных образцов при 20 и 50 °C выросла при этом на 50–60 %. На 10 % увеличился коэффициент водостойкости, что свидетельствует о повышении водоустойчивости асфальтобетона в процессе эксплуатации и является следствием улучшения адгезионных свойств вяжущего с поверхностью минерального материала и повышенной структурированности микроструктуры асфальтобетона с ультрадисперсными наполнителями ГИ и ТУ.

#### **Физико-механические свойства асфальтобетонов типа А**

Показатель	ГОСТ 9128–98 тип А	Состав			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Плотность, г / см <sup>3</sup>	—	2,407	2,401	2,410	2,412
Водонасыщение, %	1,5–4,0	2,75	2,90	2,05	1,92
Предел прочности при сжатии, МПа:					
при 20 °C, не менее	2,2	3,34	4,01	4,95	5,18
при 50 °C, не менее	1,2	1,33	1,52	1,92	2,12
при 0 °C, не менее	13	9,04	9,15	10,39	10,54
Водостойкость, не менее	0,8	0,95	0,95	1,00	1,00
Водостойкость при длительном водонасыщении, не менее	0,7	0,86	0,86	0,95	0,95
Коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg}\phi$	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Сцепление при сдвиге при 50 °C, МПа	0,25	0,29	0,35	0,42	0,48
Трещиностойкость при 0 °C, МПа	3,5–7,0	4,03	4,70	4,83	4,91

Исследования по определению устойчивости асфальтобетонов к образованию колеи при динамическом циклическом воздействии проводились с использованием испытательного стенда, разработанного в ДорТрансНИИ РГСУ. С этой целью изготавливались цилиндрические образцы диаметром 21,5 см и высотой 5 см. После терmostатирования в течение суток в воздушной среде при температуре 50 °C образцы подвергались многократному воздействию циклической нагрузки величиной 0,6 МПа, передаваемой через штамп диаметром 7 см с частотой 10 Гц. Количество приложений нагрузки фиксировалось с помощью специальной программы на ЭВМ. Глубина погружения штампа при этом контролировалась датчиками линейных перемещений. Проведенные исследования (рис. 5) позволили установить, что модификация асфальтобетона разработанной добавкой позволяет снизить в два раза интенсивность накопления остаточных деформаций в структуре материала.

**Вывод.** Использование разработанной комплексной модифицирующей добавки с применением полиолефина, гидратной извести и техниче-

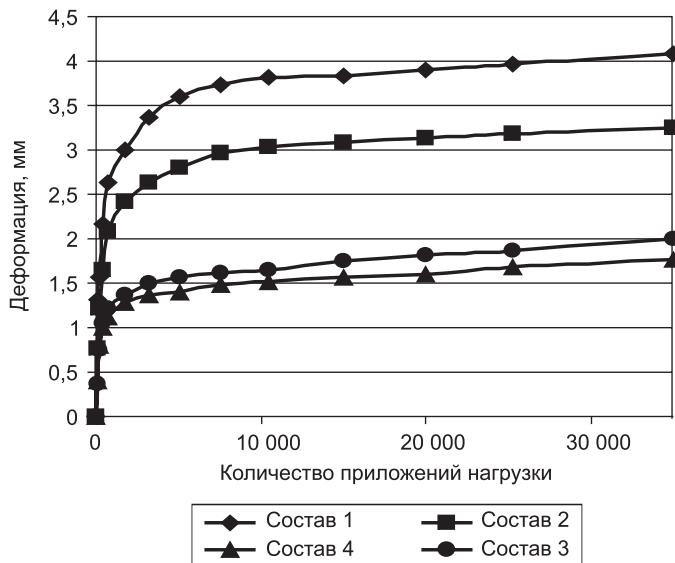


Рис. 5. Развитие пластической деформации асфальтобетонных образцов

ского углерода позволяет улучшить структурно-механические свойства асфальтобетона с двукратным снижением интенсивности накопления остаточных деформаций в структуре материала. Комплексно-модифицированный асфальтобетон обладает повышенной сдвигово-, водоустойчивостью и стойкостью к старению и может быть рекомендован для эксплуатации в условиях жаркого и влажного климата южных регионов страны.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бонченко, Г.А. Асфальтобетон. Сдвигостойчивость и технология модифицирования полимером [Текст] / Г.А. Бонченко. — М. : Машиностроение, 1994. — 176 с.
- Иваньски, М. Асфальтобетон как композиционный материал [Текст] / М. Иваньски, Н.Б. Урьев. — М. : 2000, «Техполиграфцентр», 2007. — 770 с.
- Золотарев, В.А. О показателях качества битумов, модифицированных полимерами [Текст] / В.А. Золотарев // Збірник наук. ст. — Київ, 2006. — Вип. 5. — С. 200–221.
- Bell, A.C. Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures. — SHRP. — Report Nr SHRP-A-383. — National Research Council, Washington D.C. — 183 p.

ЧАН Н.Х., асп.; E-mail: tnh82@mail.ru

Ростовский государственный строительный университет

МАРДИРОСОВА И.В., канд. хим. наук, доц.; E-mail: isabellavm@rambler.ru

Ростовский государственный строительный университет

БАЛАБАНОВ О.А., инж.

Ростовский государственный строительный университет

Получено после доработки 29.06.11

**Tran N.H.**, post-graduate student; E-mail: tnh82@mail.ru, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

**Mardirosova I.V.**, candidate of chemical sciences, assistant professor; E-mail: isabellavm@rambler.ru, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

**Balabanov O.A.**, engineer, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

## **COMPLEX-MODIFIED ASPHALT CONCRETE INCREASED RESISTANCE TO HOT AND HUMID CLIMATE**

The complex modifier based on polyolefin, hydrated lime and carbon black enhances the structural and mechanical properties of asphalt concrete and more than twice as reducing the intensity of accumulation of residual strain in him. Complex-modified asphalt concrete has a high shear-stability, waterproof, and resistance to aging and can be recommended for use in hot and humid climate.

**Key words:** polyolefin, hydrated lime, carbon black, asphalt concrete, shear-stability, waterproof, resistant to aging.

### **REFERENCES**

1. Bonchenko, G.A. Asphalt concrete. Shear-stability and technology of polymer modification [Text] / G.A. Bonchenko. — M. : Mechanical Engineering, 1994. — 176 p.
  2. Ivanski, M. Asphalt as a composite material [Text] / M. Ivanski, N.B. Urev. — M. : 2000, «Techpoligrafcentre», 2007. — 770 p.
  3. Zolotarev, V.A. About quality of bitumens modified by polymers [Text] / V.A. Zolotarev / Collection of research papers. — Kiev, 2006. — Vol. 5. — P. 200–221.
  4. Bell, A.C. Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures. — SHRP. — Report Nr SHRP-A-383. — National Research Council, Washington D.C. — 183 p.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

П.В. ЧУБАРОВ, Г.В. ГЛАДЫШЕВ,  
Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

### ДРОССЕЛЬНЫЙ ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ С ЭЛАСТИЧНЫМИ ДРОССЕЛЯМИ ВПУСКА

Приведены историческая справка создания пневматических машин, принципиальная схема и физико-математическая модель дроссельного пневмоударного механизма с эластичными дросселями впуска.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, сжатый воздух, ударник, камеры рабочего и холостого хода, дроссели с эластичными стенками.

**Историческая справка.** Одной из первых пневматических машин можно считать машину К. Траутца (1877 г.), содержащую пневмоцилиндры только для вращения буровой штанги. Первой же пневматической ударной машиной (ПУМ) с воздухораспределением самим ударником является машина Д. Дарлингтона (1877 г.), которая снабжена поворотным механизмом и ударником ступенчатой формы. Кольцевая проточка на ударнике при взаимодействии с каналами в цилиндре обусловливала воздухораспределение между управляемыми камерами рабочего и холостого хода. В одном из вариантов ПУМ выпускные каналы управляемых камер объединены в один, что предусматривало некоторое снижение амплитуды и увеличение времени действия импульса звуковой мощности. Однако такое техническое решение не позволило существенно снизить аэродинамический шум машины, и впоследствии исследователи-разработчики обратились к поиску специальных шумоснижающих устройств.

Предложенное в 1878 г. Р. Шрамом воздухораспределение применительно к бурильным машинам содержало золотник, который осуществлял выпуск воздуха в управляемые камеры при воздействии на него извне. На протяжении всего последующего времени интерес к золотниковым ПУМ не ослабевал. В настоящее время их насчитывается более 200 разновидностей. Из них наиболее совершенными по экономичности признаны ПУМ с четырехступенчатым золотником.

В 1884 г. Ф.А. Халсей разработал автоматический цилиндрический сплошной золотник. В этом же году В. Хессель получил патент на пневматическую машину ударно-поворотного действия с управляемыми впуском каналами в ударнике ступенчатой формы. Управление осуществлялось при взаимодействии неподвижного конического стержня-клапана в цилиндре и соответствующей формы канала в ударнике.

Одной из первых ручных машин для промышленных целей можно назвать предложенный в 1895 г. молоток Д. Келлера с бесклапанным ПУМ. Молоток был снабжен ударником бесступенчатой формы, разъединенным

с рабочим инструментом. Функции управления впуском осуществлялись проточками на боковой поверхности ударника и каналами в цилиндре.

В 1902 г. В.М. Холдо (США) выдан патент на применение в ПУМ центральной трубы для подвода сжатого воздуха в сочетании с каналами в ударнике. Желание уменьшить количество воздухоподводящих каналов в ударнике и цилиндре привело к совмещению их функций по отношению к управляемым камерам рабочего и холостого хода. При повороте ударника на некоторый угол вокруг своей оси канал в нем совмещался попаременно с сетью сжатого воздуха или с окружающим пространством (атмосферой). Так, в ПУМ Г. Пресса (патент 1902 г.) ударнику с помощью кулачка и паза сообщался необходимый угол поворота или фиксированное (бесспоротное) возвратно-поступательное движение.

Стремление увеличить экономичность пневматической машины ударного действия обусловило появление кранового (поворотного) воздухораспределителя золотникового типа, управляющего одновременно и выпуском сжатого воздуха. ПУМ такого типа был предложен в 1903 г. фирмой «Хизли Ингерсолл Пнеуматик Тоол» (США). Подобные механизмы не нашли широкого распространения из-за сложности сопрягаемых поверхностей распределителя и его коробки.

Клапанное шариковое воздухораспределение одним из первых реализовал в 1905 г. Х. Флоттман, а клапанное пластинчатое в 1908 г. К. Христеансон. В последующие годы клапанные воздухораспределения ПУМ успешно развивались. К настоящему времени насчитывается более 200 их разновидностей. Можно отметить наиболее прогрессивное решение клапанного пневмоударного механизма, предложенное Н.А. Клушиным, Э.А. Абраменковым и др., в котором ход клапана превышает его длину (высоту). Это позволяет реализовать рабочий цикл воздухораспределения с одновременным перекрытием впуска сетевого воздуха в обе камеры — рабочего и холостого хода, что исключает сообщение (через одну из камер) сети с атмосферой и тем самым снижает непроизводительные утечки сжатого воздуха.

**Развитие нового научного направления.** В 1966 г. Н.А. Клушиным, Э.А. Абраменковым и Д.Г. Суворовым с целью уменьшения длины ударника по отношению к его ходу предложен механизм, у которого в управляемую камеру холостого хода воздух из сети постоянно поступает через открытый дроссель. Существенно уменьшить длину и упростить форму ударника позволило техническое решение пневмоударного механизма (Н.А. Клушин, Э.А. Абраменков и др., 1969 г.), у которого управляемые камеры рабочего и холостого хода постоянно сообщены с сетью сжатого воздуха посредством дросселей с расчетными расходными характеристиками. Последующие технические решения механизмов с дроссельным воздухораспределением, направленные на совершенствование их экономичности, включали: использование камер стабилизации энергососителя со стороны рабочего хода ударника, расположение дросселей впуска ярусами с возможностью перекрытия их ударником, а также замену дроссельных каналов проточными пористыми элементами.

В данной работе рассматриваются принципиальная схема и физико-математическая модель дроссельного пневмоударного механизма (ДПУМ) с эластичными дросселями впуска (рис. 1 и 2).

Сжатый воздух из сети по дросселям А и Б с эластичными стенками постоянно поступает в управляемые камеры рабочего В и холостого Г хода в цилиндре 1, а из них по командным каналам Д и Е — в камеры-регуляторы Ж и И (рис. 1). Разница в давлениях на эластичные стенки дросселей обуславливает уменьшение или увеличение площади их про-

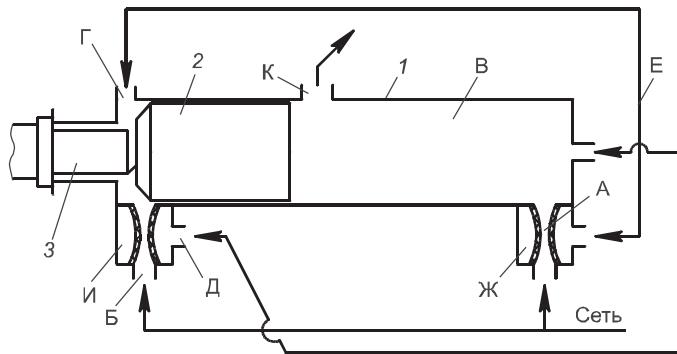


Рис. 1. Дроссельный пневматический ударный механизм

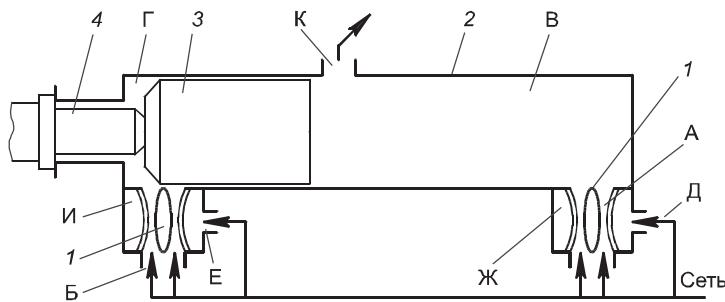


Рис. 2. Дроссельный пневматический ударный механизм

ходного сечения и различное наполнение управляемых камер. Опорожнение камер В и Г осуществляется попеременно через выпускной канал К. Под действием разности силовых импульсов со стороны управляемых камер ударник 2 совершаает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 3.

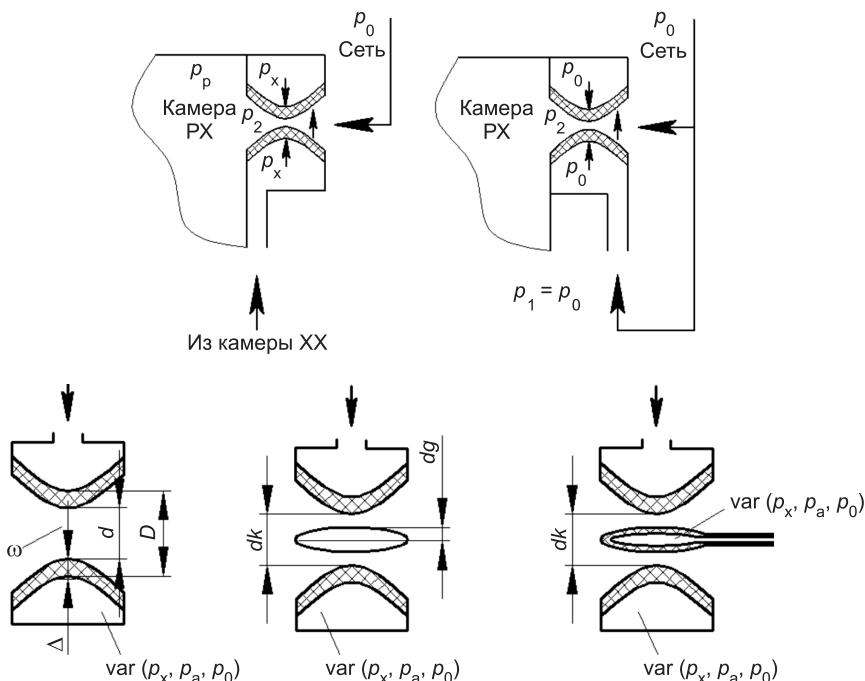


Рис. 3. Виды дроссельного впуска

Командные каналы с переменным давлением обеспечивают плавность изменения давления в камерах-регуляторах и проходного сечения дросселей.

Сжатый воздух из сети по дросселям А и Б с эластичными стенками и обтекателями 1 поступает в управляемые камеры рабочего В и холостого Г хода в цилиндре 2, а по каналам Д и Е — в камеры-регуляторы Ж и И (рис. 2). Разница в давлениях на эластичные стенки дросселей обуславливает уменьшение или увеличение площади их проходного сечения и различное наполнение управляемых камер. Опорожнение камер В и Г осуществляется попеременно через выпускной канал К. Под действием разности силовых импульсов со стороны управляемых камер ударник З совершаet возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4. Эластичные стенки дросселей плотно охватывают обтекатели и перекрывают поступление воздуха из сети в управляемые камеры.

**Физико-математическое описание пневмоударного механизма.** Рассматриваемое устройство представлено системой уравнений, описывающей баро- и термодинамический процесс.

В общем виде уравнения баро- и термодинамики ДПУМ можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{dp_p}{dt} &= \frac{k}{V_p - x_y S_y} \left[ W(\omega_p \varphi_p - \mu_{ap} \varepsilon_{ap} + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk})) + p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dp_x}{dt} &= \frac{k}{V_x + x_y S_y} \left[ W(\omega_x \varphi_x - \mu_{ax} \varepsilon_{ax} + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk})) + p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{d\theta_p}{dt} &= \frac{\theta_p}{p_p (V_p - x_y S_y)} \times \\ &\times \left[ W(\omega_p \varphi_p \Omega_p - \mu_{ap} \varepsilon_{ap} \Omega_{ap} + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk} \Omega_{yk})) + (k-1)p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{d\theta_x}{dt} &= \frac{\theta_x}{p_x (V_x - x_y S_y)} \times \\ &\times \left[ W(\omega_x \varphi_x \Omega_x - \mu_{ax} \varepsilon_{ax} \Omega_{ax} + \operatorname{sgn}(y_{yk} \psi_{yk} \Omega_{yk})) + (k-1)p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned}$$

В выражениях приняты следующие обозначения:

$$W = \sqrt{\frac{2kR}{k-1}},$$

$R, k$  — газовая постоянная и показатель процесса;

$\omega_p, \omega_x$  — проходные сечения дросселей впуска в камеры рабочего и холостого хода;

$p_p, p_x, p_0$  — давления воздуха в камерах рабочего и холостого хода, в сети;

$V_p, V_x$  — объемы камер рабочего и холостого хода;

$\varphi_p, \varphi_x$  — функции впуска воздуха в камеры рабочего и холостого хода;

$\varepsilon_{ap}, \varepsilon_{ax}$  — функции выпуска воздуха из камер рабочего и холостого хода в атмосферу;

$\mu_{ap}$ ,  $\mu_{ax}$  — площади проходных сечений каналов выпуска воздуха из камер рабочего и холостого хода;

$\Omega_p$ ,  $\Omega_x$  — функции расхода воздуха в зависимости от изменения температуры со стороны камер рабочего и холостого хода;

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

$\Omega_{yk}$ ,  $\Omega_{yt}$  — функции расхода воздуха в зависимости от изменения температуры за счет перетечек между ударником и корпусом;

$\theta_p$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_0$  — температура воздуха в камерах рабочего и холостого хода, в сети;

$y_{yk}$  — площадь проходного сечения, на котором осуществляются утечки между ударником и корпусом;

$\psi_{yk}$  — функция бародинамического изменения в процессе утечек между ударником и корпусом;

$x_y$  — перемещение ударника;

$S_y$  — площадь диаметрального сечения цилиндра ударника;

$t$  — время.

**Особенности ограничений.** Условия изменения давления воздуха:

$$1. p_p \approx p_a \text{ и } p_2 < p_x, \lim \omega \rightarrow \min \omega, \omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

$$2. p_p > p_a \text{ и } (p_3 + p_0) / 2 = p_x, \lim(p_p + p_0) / 2 = p_x, \lim \omega \rightarrow \max \omega.$$

$$3. (p_p + p_0) / 2 \leq p_0 \text{ при } p_x > (p_p + p_0) / 2, \lim \omega \rightarrow \min \omega.$$

$$4. (p_p + p_0) / 2 > p_0 \text{ при } p_x < (p_p + p_0) / 2, \lim \omega \rightarrow \max \omega.$$

Кроме указанного отметим, что усилия на площади  $S_D > S_d$  и при

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} < \frac{\pi (D)^2}{4} = \frac{\pi (d + 2\Delta)^2}{4}$$

следует  $F_D > F_d$ , что обеспечит закрытие  $\omega$  при  $p_2 = p_x$  и тем более при  $p_x > p_2$ , т.е.  $\lim \omega \rightarrow \min \omega$ .

Таким образом, если  $p_3 \rightarrow p_a$ ,  $p_2 = p_1$ ,  $p_1 > p_2$ , то камеры рабочего или холостого хода сообщены с атмосферой и желательно выполнение условий 1 и 3. Отметим, что  $\omega_k = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_d^2)$ .

**Выводы.** Отмеченные условия учитываются системой баро- и термодинамических уравнений с учетом движения ударника и корпуса механизма (машины) с ДПУМ.

Относительно «дорна» в эластичной муфте:

1) увеличивается скорость потока и снижается  $p_2$ ;

2) уменьшается деформация эластичной муфты (кольца) и увеличивается ее ресурс;

3) следует ожидать более быструю реакцию на изменение проходного сечения впуска, так как сечение кольцевое и его деформация уменьшается;

4) при эластичном дорне под давлением ожидается более интенсивное изменение проходного кольцевого сечения в сравнении с устройством с дорном из жесткого материала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные : справ. пособ. [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.

2. А. с. 406476 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Н.А. Клужин, Э.А. Абраменков, А.М. Петреев и др. — Опубл. БИ 1977, № 45.
3. А. с. 447947 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Э.А. Абраменков, Э.П. Варнелло, Л.А. Ганжин и др. — Опубл. БИ 1974, № 39.

ЧУБАРОВ П.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ГЛАДЫШЕВ Г.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 04.07.11

**Chubarov P.V.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gladyshev G.V.**, post-graduate 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

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

## THE THROTTLE PNEUMOSHOCK MECHANISM WITH ELASTIC THROTTLES OF THE ADMISSION

In this article historical background of pneumatic machines, the concept and the physical and mathematical model of the throttle in the air percussion mechanism with elastic choke intake are considered.

**Key words:** pneumoshock mechanism, compressed air, drummer, chambers of working and single courses, throttles with elastic walls.

## REFERENCES

1. Abramenkov, E.A. Pneumatic mechanisms of machines of shock action: throttle, jet, unspool, valveless. Reference manual [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk: Publishing house NSU, 1993. — 430 p.
2. А. с. 406476 USSR. A pneumatic hammer [Text] / N.A. Klushin, E.A. Abramenkov, A.M. Petreev and others. — Publ. Bul. 1977, N 45.
3. А. с. 447947 USSR. A pneumatic hammer [Text] / E.A. Abramenkov, E.P. Varnello, L.A. Gangin and others. — Publ. Bul. — 1974, N 39.

УДК 621.01.004.67

В.Б. ЛОМУХИН, А.Б. ВИНОГРАДОВ,  
И.В. ЛАПТЕВА, В.В. СУРГИН

**НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА  
РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТАВА  
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ИХ УЗЛОВ**

Предложена методика выбора ремонтно-восстановительных составов, применение которой позволит повысить долговечность, надежность и безопасность эксплуатации машин, машинных комплексов и систем, а также позволит готовить специалистов на реальном материале с использованием современного оборудования.

**Ключевые слова:** строительные машины, ремонтно-восстановительные составы, диагностирование, анализ масла.

Диагностирование текущего технического состояния деталей и систем строительных машин (ССМ) по результатам анализа работающего масла достаточно полно изучено многими учеными. Сам способ диагностирования хорошо зарекомендовал себя в практической работе.

Ремонтно-восстановительные составы (РВС), ставшие популярными последнее время, исследуются и применяются учеными и практиками. Однако сведения об их практическом применении противоречивы. Приводятся исследования, как правило, одного РВС и разрабатываются методики применения именно исследованного препарата. Отсутствуют методики и алгоритмы выбора того или иного РВС. В связи с этим попытки применения РВС не всегда приводят к ожидаемому результату [1].

В Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете сделана попытка реализовать современные научные результаты в области диагностирования по анализу масла для объективного выбора РВС в зависимости от текущего технического состояния ССМ. Цель работы — получение научно обоснованной методики выбора РВС и ее экспериментальная проверка.

Способы определения пороговых значений могут быть различными. В данной статье предложен способ получения пороговых значений, изложенный в работах [1, 2]. Интегрируя полученные на основе реального статистического материала распределения, получаем возможность построить пороги предельных значений элементов-индикаторов. При этом не важна физическая сущность исследуемого фактора, им может быть любой диагностический параметр.

Если принять величину надежности диагноза равной 0,95, что соответствует уровню необходимой надежности двигателей, то можно отложить уровень  $1 - 0,95 = 0,05$  на интегральных кривых (рис. 1). Уровень пересечет эти кривые в точках  $A$  и  $B$ . Получив таким образом пороговые значения и проведя сравнение [2], можно приступить к выбору РВС. Для этого предположим, что количество изношенного слоя следует компенси-

ровать аналогичным количеством привнесенного слоя (материала РВС) (рис. 2). Теперь на основании сделанного предположения следует найти связь между концентрацией продуктов износа (диагностическим параметром) и массой необходимого РВС.

Рассмотрим известное уравнение Пахомова для расчетов применительно к силовым установкам ССМ [1]. Взаимосвязь массы и концентрации можно выразить как

$$G = K_i Q, \quad (1)$$

где  $G$  — масса изношенных элементов в системе, г;  
 $K_i$  — текущая концентрация металла, г/т.

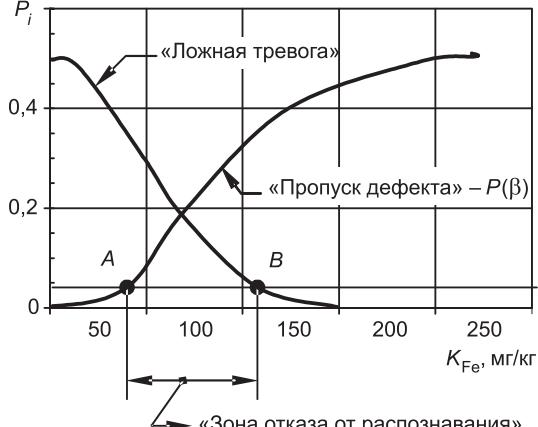


Рис. 1. Статистические пороги распознавания



Рис. 2. Баланс

Исключая промежуточные вычисления [2], получим массу РВС, которую следует применить в диагностируемом механизме:

$$G_j = (K_j + K_0)Q = K_j Q + \frac{\sum K_i + q \sum (1 - e^{-\alpha_i}) \frac{t_i}{\alpha_i}}{\sum e^{-\alpha_i}} Q. \quad (2)$$

Используя пороговые значения, можно рассчитать остаточный ресурс по выражению

$$G_{\text{пор}} = K_{\text{пор}} Q, \quad (3)$$

где  $K_{\text{пор}}$  может принимать значения  $A$  или  $B$  (пороги «Пропуск дефекта» и «Ложная тревога» — см. рис. 1).

Соответственно остаточный ресурс определяется до момента применения РВС (порог  $A$ ) или ресурс, когда еще возможно применить РВС (порог  $B$ ),

$$t_{\text{ост}} = \frac{K_{\text{пор}}}{G_i} t_i - (t_i + t_1); \quad (4)$$

$$t = \frac{K_{\text{пор}} Q}{(K_i + K_0)Q} t_i - (t_i + t_1) = \frac{\frac{K_{\text{пор}} t_i}{\sum K_i + \frac{q}{Q} \left( \sum (1 - e^{-\alpha_i}) \frac{t_i}{\alpha_i} \right)}}{K_i + \frac{\sum e^{-\alpha_i}}{\sum e^{-\alpha_i}}} - (t_i + t_1), \quad (5)$$

где  $K_0$  — начальная концентрация, г/т;

$t$  — время от смены масла, ч;

$q$  — интенсивность поступления продуктов износа в масло, г/ч;

$Q$  — количество масла в картере, т.

Однако время, затрачиваемое на накопление статистического материала для расчета пороговых значений, велико. Поэтому применение допорового метода диагностирования двигателя внутреннего сгорания, начиная со второй пробы, позволяет обосновать выбор необходимого РВС для ССМ в текущем техническом состоянии [1, 3].

Рассчитав границы по углу, получим правило для принятия решения

$$0^\circ < \alpha > X^\circ. \quad (6)$$

Графическая модель показана на рис. 3.

Для подтверждения теоретических предпосылок, изложенных выше, была произведена экспериментальная проверка.

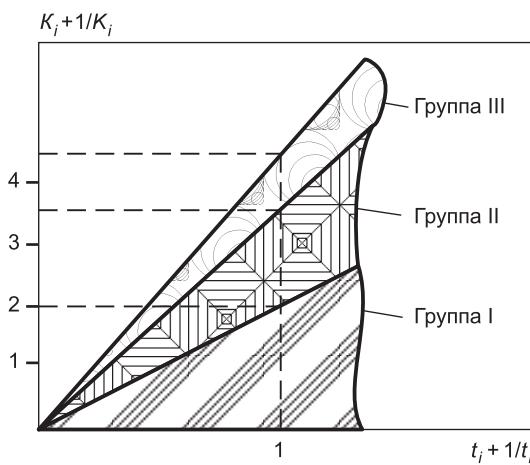


Рис. 3. Модель принятия решения при выборе препарата для ССМ

Группа I — кондиционеры металла; группа II — оптимизаторы поверхности; группа III — РВС

ведены в табл. 1. Как видно по приведенным в таблице данным, проверка теоретических предпосылок приводит к существенному сужению «Зоны отказа от распознавания».

Таблица 1

**Изменение «Зоны отказа от распознавания» для различных типов энергетических установок ССМ, используемых в различных областях народного хозяйства РФ**

Двигатель	Порог $A^1$ до	Порог $B^1$ до	Ширина зоны отказа от распознавания до	Порог $A$ после	Порог $B$ после	Ширина зоны отказа от распознавания после	Объем выборки, тыс. ед.
Судовой Г 70-5 (плавучий кран)	40	120	80	180	210	30	4,8
Судовой М-400(ДГ)	80	140	60	150	160	10	3,7
Автомобильный ЗМЗ 402.1 (автомобильный кран)	30	170	140	220	250	30	0,9
Дизель-генератор 6НФД-36	40	150	110	160	200	40	0,6

Очевидно, что и для выбора применяемых РВС следует учитывать полученные разделения. Например (см. табл. 1 и рис. 1), на отрезке:

- $\{A^1 \ B^1\}$  следует применять кондиционеры металла (группа I);
- $\{B^1 \ A\}$  следует применять оптимизаторы шероховатостей поверхностей (группа II);
- $\{A \ B\}$  следует применять ремонтно-восстановительные составы (группа III);
- до значения  $A^1$  применять препараты не следует;
- за значением  $B$  применять препараты не следует, нужно применить традиционный ремонт.

Таким образом, получим интервалы применения РВС по значению концентрации железа в работающем масле (табл. 2).

Таблица 2  
**Интервалы применения РВС по значению концентрации железа в работающем масле**

Наименование	Марка двигателя	Концентрация железа, г/т
Группа I	Судовой Г 70-5	40...120
	Судовой М-400	80...140
	Автомобильный ЗМЗ 402.1	30...170
	Дизель-генератор 6НФД-36	40...150
Группа II	Судовой Г 70-5	120...180
	Судовой М-400	140...150
	Автомобильный ЗМЗ 402.1	170...220
	Дизель-генератор 6НФД-36	150...160
Группа III	Судовой Г 70-5	180...210
	Судовой М-400	150...160
	Автомобильный ЗМЗ 402.1	220...250
	Дизель-генератор 6НФД-36	160...200

Как видно из вышеизложенного, предлагаемая теория выбора РВС по результатам диагностирования перспективна для строительных машин и механизмов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломухин, В.Б. Основы современной эксплуатации двигателей [Текст] / В.Б. Ломухин. — Новосибирск : Наука, 2004. — 188 с.
2. Ломухин, В.Б. Выбор ремонтно-восстановительного состава по анализу картерного масла [Текст] / В.Б. Ломухин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2010. — № 3. — С. 23–27.
3. Ломухин, В.Б. Математическая модель оптимального подбора препаратов по состоянию двигателя на основе спектрального анализа картерного масла [Текст] / В.Б. Ломухин // Ползуновский вестник. — № 1–2. — Барнаул : Алт. ГПУ, 2003. — С. 45–49.

ЛОМУХИН В.Б., канд. техн. наук, доц.; E-mail: d1191@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ВИНОГРАДОВ А.Б., д-р техн. наук, проф.; E-mail: same@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЛАПТЕВА И.В., асп.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*СУРГИН В.В., асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 08.08.11

**Lomuhin V.B.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: dll91@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Vinogradov A.B.**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: same@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Lapteva I.V.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Surgin V.V.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **SCIENTIFIC ASPECTS OF A CHOICE OF REPAIR-REGENERATIVE STRUCTURE FOR BUILDING CARS AND KNOTS MAKING THEM**

The offered theory allows to provide objective, depending on the current technical condition, application is repair regenerative structures that will lead to increase in a resource of the mechanism and economy of working costs and as inclusion of this system in process of training will allow to prepare for experts on a real material with use of the modern equipment.

**Key words:** building cars, repair-regenerative structures, diagnosti-rovanie, oil analysis.

### REFERENCES

1. Lomuhin, V.B. Bases of modern operation of engines [Text] / V.B. Lomuhin. — Novosibirsk : Science, 2004. — 188 p.
2. Lomuhin, V.B. Choice of pemontno-regenerative structure under the analysis oils [Text] / V.B. Lomuhin // Repair, restoration, modernisation. — 2010. — N 3. — P. 23–27.
3. Lomuhin, V.B. Mathematical model of optimum selection of preparations on a condition of the engine on the basis of the spectral analysis crankcase oils [Text] / V.B. Lomuhin //Polzunovsky bulletin. — N 1–2. — Barnaul : Altay State Polytechnical University, 2003. — P. 45–49.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.012.45

В.В. АДИЩЕВ, Э.В. БЕРЕЗИНА, Н.В. ЕРШОВА

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭТАЛОННЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ ИЗГИБАЕМЫХ И ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Предложен способ трансформирования эталонных диаграмм растяжения–сжатия на основе энергетических соотношений для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов. Определены коэффициенты трансформирования диаграмм для некоторых классов бетона.

**Ключевые слова:** эталонная диаграмма, коэффициент трансформации, изгибающие железобетонные элементы, энергетические соотношения.

Исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов направлены в основном на построение диаграмм растяжения–сжатия при осевом нагружении. Предлагаются различные способы построения диаграмм  $\sigma - \varepsilon$ , описание которых часто является достаточно сложным и содержит множество эмпирических коэффициентов, что делает их использование неудобным при расчете. Кроме того, диаграммы растяжения–сжатия, полученные при осевом нагружении, применяются при расчете изгибающих элементов без какого-либо изменения, хотя имеются исследования [1], которые подтверждают, что разрушение образца при изгибе происходит при больших деформациях, чем при осевом нагружении.

В соответствии с современными взглядами, сформировавшимися среди специалистов по теории сопротивления железобетона, рациональную аналитическую зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  характеризуют следующие свойства:

— достоверное описание зависимости напряжений от деформаций для всех уровней относительных напряжений (диаграммы стандартного кратковременного нагружения);

— возможность распространения на неоднородное напряженное состояние;

— универсальность для всех видов и марок бетона;

— содержание коэффициентов, имеющих физический смысл;

— простая форма записи в виде прямой и обратной функций  $\sigma(\varepsilon)$ ,  $\varepsilon(\sigma)$ .

Наибольшее распространение получили аналитические формы  $\sigma_m - \varepsilon_m$ . Они весьма многообразны, и вместе с тем на сегодня к ним предъявляются некоторые общие требования:

— они должны иметь несложную математическую запись при минимальном числе опытных параметров с ясным физическим смыслом и быть

пригодными для описания поведения наибольшего набора разных материалов (бетона);

— параметры диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » должны иметь соответствующее обоснование с позиций теории вероятностей и математической статистики;

— диаграммы должны быть пригодными для решения задач расчета конструкций по предельным состояниям, оценки результатов испытаний и т.д.;

— диаграммы должны легко увязываться с современными вычислительными подходами с использованием ЭВМ.

Для описания зависимости  $\sigma - \varepsilon$  предлагается много различных эмпирических и аналитических способов. Все способы можно сгруппировать по принимаемым допущениям и подходу к построению зависимости  $\sigma - \varepsilon$  для бетона:

1) зависимость «напряжения–деформации» в условиях одноосного кратковременного сжатия принимается в виде полинома;

2) связь  $\sigma - \varepsilon$  при одноосном сжатии принимается в виде ломаной или идеализированной диаграммы Прандтля с горизонтальным участком;

3) применение нелинейных зависимостей  $\sigma - \varepsilon$  при сжатии с горизонтальным или нисходящим участком в виде прямой.

Исходя из анализа основных способов описания аналитической зависимости  $\sigma - \varepsilon$  видно, что большая часть исследований проведена для сжатия. Характер поведения бетона при растяжении считается подобным сжатию, вследствие чего характер взаимосвязи диаграмм  $\sigma - \varepsilon$  при осевом растяжении и изгибе недостаточно изучен.

Какой бы ни была информация о поведении центрально-сжатых бетонных образцов, она не будет исчерпывающей с точки зрения практики: правомерность приложения полученной таким образом диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  к расчету внецентренно сжатых (изгибаемых) железобетонных элементов оспаривается. Некоторые авторы утверждают, что предел прочности бетона при изгибе значительно (почти в 2 раза) превышает его приизменную прочность. Следовательно, при изгибе мы должны иметь принципиально иную связь между напряжениями и деформациями, чем при осевом сжатии.

При расчетах, таким образом, должна применяться преобразованная (трансформированная) диаграмма, полученная на основе реальных диаграмм состояния бетона. Только смоделировав такую трансформированную диаграмму состояния с учетом возможного влияния на нее различных факторов, можно реализовать ее для оценки напряженно-деформированного состояния и прочности нормальных сечений бетонных и железобетонных элементов при различных силовых воздействиях. Поэтому разрабатываются методики уточнения параметров (методики трансформирования) диаграмм деформирования материалов при разных процентах армирования железобетонных элементов, разных классах бетона, разных силовых воздействиях, разной длительности нагрузления, разных случаях напряженного состояния. Решение этой проблемы только начато и требует проведения больших экспериментальных и теоретических исследований.

Задача о трансформации диаграмм растяжения–сжатия для применения их в расчетах изгибаемых железобетонных элементов рассматривалась В.В. Адищевым и В.М. Митасовым, это нашло отражение в работах [2, 3 и др.]. Ими был разработан основной подход к трансформированию диаграмм. Интересными в этом направлении можно считать работы Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиева, А.Н. Петрова, И.А. Узуна. Однако

в этих работах трансформированная диаграмма содержит эмпирические коэффициенты, физический смысл которых недостаточно ясен. В работах других авторов понятие «трансформирование» относится не к изменению эталонной диаграммы при изгибе и внецентренном сжатии, а к переходу от одного способа нагружения к другому.

В настоящей работе предлагается следующий способ трансформирования эталонной диаграммы при изгибе. На рис. 1 изображена схема расположения узловых точек эталонной диаграммы деформирования бетона и приведен способ ее трансформации. Этalonная диаграмма при растяжении аппроксимируется функцией  $\sigma(\varepsilon) = \psi(\varepsilon)$ , трансформированная диаграмма — функцией  $\sigma(\varepsilon) = \psi^u(\varepsilon)$ .

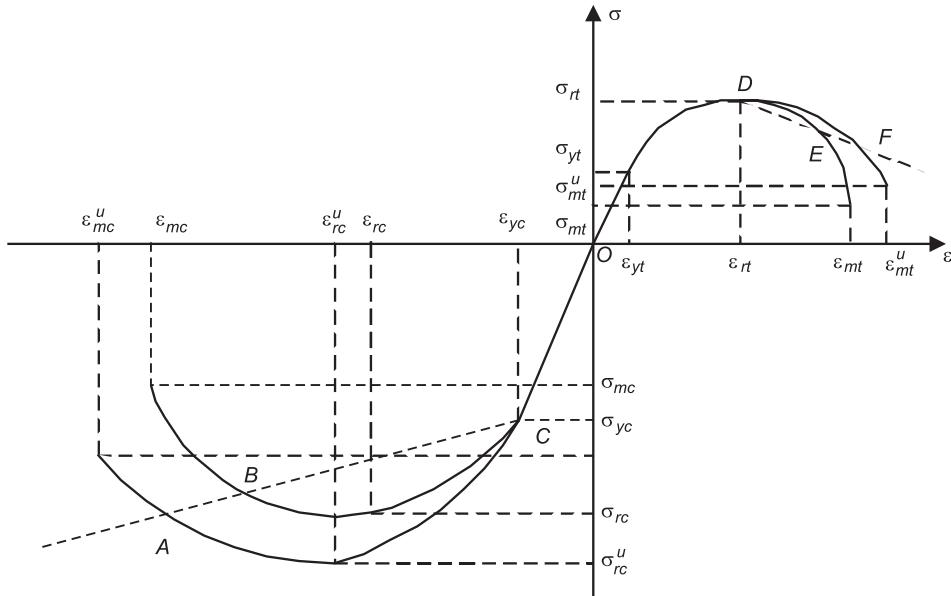


Рис. 1. Схема трансформирования эталонной диаграммы деформирования бетона

Так как нет причин для увеличения напряжения в растянутой зоне, то в растянутой зоне трансформируется только нисходящая ветвь диаграммы, начиная с точки  $D(\varepsilon_{rt}; \sigma_{rt})$ , таким образом,  $\mathbf{DF} = k_t \mathbf{DE}$ , где  $k_t$  — коэффициент трансформирования растянутой зоны. Предположение, что трансформирование эталонной диаграммы начинается при  $\varepsilon = \varepsilon_{rt}$ , автоматически обеспечивает равенство  $\psi^u(\varepsilon_{rt}) = \psi(\varepsilon_{rt})$ .

В обозначениях на рис. 1 характерных значений напряжений и деформаций индексами «*yt*», «*yc*» снабжены напряжения и деформации, ограничивающие области упругого деформирования, индексами «*rt*», «*rc*» — соответствующие экстремальным точкам на эталонной и трансформированной диаграммах. Индексы «*mt*», «*mc*» соответствуют предельным значениям деформаций на диаграммах. Верхний индекс «*u*» присвоен значениям напряжений и деформаций в узловых точках трансформированной диаграммы.

Аналитическая зависимость, выражающая трансформированную диаграмму растянутой зоны при изгибе, следующая:

$$\sigma(\varepsilon) = \psi^u(\varepsilon) = \begin{cases} k_t \psi\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{rt}}{k_t} + \varepsilon_{rt}\right) - (k_t - 1)\psi(\varepsilon_{rt}) & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_{rt}, \\ \psi(\varepsilon) & \text{при } \varepsilon < \varepsilon_{rt}. \end{cases}$$

Узловое значение деформации трансформированной диаграммы растянутой зоны определяется как  $\varepsilon_{mt}^u = k_t (\varepsilon_{mt} - \varepsilon_{rt}) + \varepsilon_{rt}$ .

Для построения трансформированной диаграммы сжатой зоны считаем, что  $\mathbf{CA} = k_c \mathbf{CB}$ , где  $k_c$  — коэффициент трансформирования диаграммы в сжатой зоне. Трансформированная часть диаграммы в сжатой зоне (рис. 1) соответствует интервалу изменения деформаций сжатия  $\varepsilon_{mc}^u > \varepsilon > \varepsilon_{yc}$ . Известны экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что при изгибе в сжатой зоне предельные напряжения и деформации повышаются по сравнению с центральным сжатием. Аппроксимация трансформированной диаграммы бетона сжатой зоны при изгибе может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma(\varepsilon) = \psi^u(\varepsilon) = \begin{cases} k_c \psi\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{yc}}{k_c} + \varepsilon_{yc}\right) - (k_c - 1)\psi(\varepsilon_{yc}) & \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_{yc}, \\ \psi(\varepsilon) & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_{yc}. \end{cases}$$

Узловые значения деформаций трансформированной диаграммы определяются соотношениями

$$\varepsilon_{mc}^u = k_c (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}) + \varepsilon_{yc}, \quad \varepsilon_{rc}^u = k_c (\varepsilon_{rc} - \varepsilon_{yc}) + \varepsilon_{yc}.$$

Коэффициенты трансформирования сжатой и растянутой зон, вообще говоря, различны.

Определение коэффициента трансформации растянутой зоны с учетом энергетических соотношений рассматривалось в [2]. Использовался энергетический критерий разрушения, в соответствии с которым разрушение (образование трещины) происходит при накоплении критического уровня микроповреждений в некотором слое материала («зоне предразрушения»), прилегающем к крайнему фиброму волокну. В этом слое достигается соответствующий средний уровень плотности энергии деформирования. При центральном кратковременном нагружении критическое значение удельной энергии деформирования равно:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{mt}} \psi(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (1)$$

Состояние предразрушения характеризуется частью удельной энергии (1), «израсходованной» на образование повреждений:

$$W_{rt} = W - \frac{\psi^2(\varepsilon_{mt})}{2E_b}, \quad (2)$$

где  $\frac{\psi^2(\varepsilon_{mt})}{2E_b}$  — обратимая часть удельной энергии деформирования.

В соответствии с принятым критерием бетон находится в состоянии предразрушения, если в некоторой зоне, прилегающей к нижнему волокну, средняя плотность энергии деформирования, затрачиваемой на образование микроповреждений, достигает критического значения. Граница зоны «предразрушения» определяется равенством  $\varepsilon(y_{rt}) = \varepsilon_{rt}$ , т.е. зона «предразрушения» соответствует интервалу  $y_{rt} < y < h - x$ , где  $y_{rt}$  — величина неизвестная (рис. 2, а).

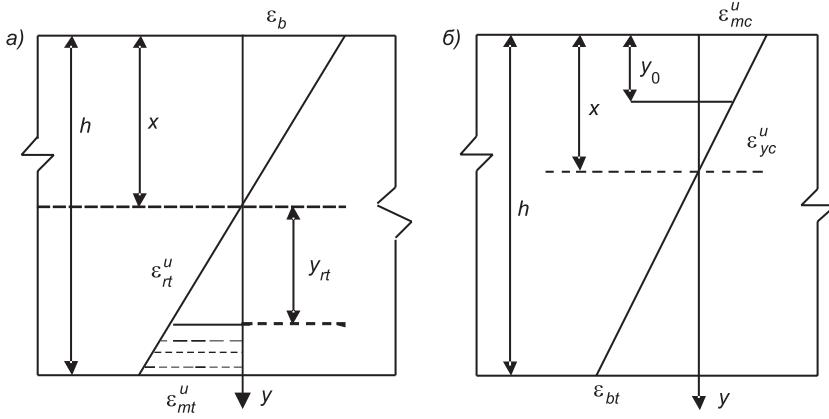


Рис. 2. Распределение деформаций по сечению при изгибе  
а) для растянутой зоны; б) для сжатой зоны

Средняя плотность энергии, затраченной на повреждения в некотором слое толщиной  $h - x - y_{rt}$ , прилегающем к нижнему волокну, равна

$$V_{rt} = \frac{1}{h - x - y_{rt}} \int_{y_{rt}}^{h-x} \left\{ \int_0^{\varepsilon(y)} \psi^u(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{[\psi^u(\varepsilon(y))]^2}{2E_b} \right\} dy,$$

где  $\int_{y_{rt}}^{h-x} \frac{[\psi^u(\varepsilon(y))]^2}{2E_b} dy$  — энергия, высвобождаемая при образовании трещин в каждом слое. Состояние «предразрушения» определяется равенством

$$V_{rt} = W_{rt}. \quad (3)$$

Равенство (3) преобразуется в уравнение относительно неизвестной величины коэффициента трансформации  $k_t$ :

$$\begin{aligned} k_t^2 \int_{\varepsilon_{rt}}^{\varepsilon_{mt}} & \left\{ (\psi(\varepsilon) - \psi(\varepsilon_{rt})) \left( \varepsilon_{mt} + \frac{\psi(\varepsilon_{rt})}{2E_b} - \varepsilon - \frac{\psi(\varepsilon)}{2E_b} \right) \right\} d\varepsilon + \\ & + k_t \int_{\varepsilon_{rt}}^{\varepsilon_{mt}} \psi(\varepsilon_{rt}) \left( \varepsilon_{mt} + \frac{\psi(\varepsilon_{rt})}{E_b} - \varepsilon - \frac{\psi(\varepsilon)}{2E_b} \right) d\varepsilon + \\ & + \frac{\psi^2(\varepsilon_{mt}) - \psi^2(\varepsilon_{rt})}{2E_b} (\varepsilon_{mt} - \varepsilon_{rt}) - (\varepsilon_{mt} - \varepsilon_{rt}) \int_{\varepsilon_{rt}}^{\varepsilon_{mt}} \psi(\varepsilon) d\varepsilon = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Вид уравнения показывает, что коэффициент трансформации зависит только от характеристик эталонной диаграммы бетона.

Сжатие является более сложным процессом, чем растяжение. Его, безусловно, нельзя считать двумерным, так как он сопровождается образованием не только трещин, но и сколов. В данной работе сделана попытка при расчетах использовать плоскую модель такого процесса, как сжатие. Считаем, что разрушение при центральном сжатии наступает тогда, когда удельная энергия в некотором слое, прилегающем к крайнему сжатому фибровому волокну, достигает своего критического значения.

Удельная энергия разрушения, соответствующая центральному сжатию, будет равна

$$W_{rc} = - \int_{\varepsilon_{mc}}^0 \psi(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\psi^2(\varepsilon_{mc})}{2E_b},$$

где  $\frac{\psi^2(\varepsilon_{mc})}{2E_b}$  — обратимая часть удельной энергии.

При изгибе необходимо использовать не эталонную диаграмму, а некоторую ее трансформацию, которая учитывает различия между изгибом и центральным сжатием.

Распределение деформаций по сечению в состоянии предразрушения в сжатой зоне представлено на рис. 2, б.

Узловые значения деформации трансформированной диаграммы определяются соотношениями

$$\varepsilon_{mc}^u = k_c (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}) + \varepsilon_{yc}, \quad \varepsilon_{rc}^u = k_c (\varepsilon_{rc} - \varepsilon_{yc}) + \varepsilon_{yc}.$$

Считаем, что разрушение наступает, когда удельная энергия достигает своего критического значения не в крайнем волокне, а в некотором слое толщиной  $y_{rc}$ , прилегающем к крайнему волокну, соответствующему сжатию:

$$V_{rc} = \frac{1}{y_{rc}} \int_{-x}^{-x+y_{rc}} \left\{ - \int_{\varepsilon(y)}^0 \psi(\varepsilon(y)) d\varepsilon - \frac{[\psi^u(\varepsilon(y))]^2}{2E_b} \right\} dy,$$

где  $\frac{[\psi^u(\varepsilon(y))]^2}{2E_b}$  — энергия, высвобождаемая в каждом слое при образовании трещины.

Так как  $V_{rc}$  — удельная энергия деформирования зоны «предразрушения», то состояние «предразрушения» определяется равенством  $V_{rc} = W_{rc}$ , или

$$V_{rc} = \frac{1}{y_{rc}} \int_{-x}^{-x+y_{rc}} \left\{ - \int_{\varepsilon(y)}^0 \psi(\varepsilon(y)) d\varepsilon - \frac{[\psi^u(\varepsilon(y))]^2}{2E_b} \right\} dy = - \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} \psi(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\psi^2(\varepsilon_{mc})}{2E_b}.$$

В результате получаем уравнение относительно  $k_c$ :

$$\begin{aligned} & k_c^2 \left\{ \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} (\psi(\varepsilon) - \psi(\varepsilon_{yc})) d\varepsilon - \frac{1}{2E_b} \frac{1}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}} \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} (\psi(\varepsilon) - \psi(\varepsilon_{yc}))^2 d\varepsilon \right\} + \\ & + k_c \left\{ \frac{1}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}} \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} [\psi(\varepsilon) - \psi(\varepsilon_{yc})](\varepsilon_{yc} - \varepsilon) d\varepsilon + \psi(\varepsilon_{yc})(\varepsilon_{yc} - \varepsilon_{mc}) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{E_b} \frac{1}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}} \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} [\psi(\varepsilon) - \psi(\varepsilon_{yc})] \psi(\varepsilon_{yc}) d\varepsilon \right\} + \\ & + \left\{ \frac{\psi(\varepsilon_{yc})}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{yc}} \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} (\varepsilon_{yc} - \varepsilon) d\varepsilon + \frac{\psi^2(\varepsilon_{yc}) - \psi^2(\varepsilon_{mc})}{2E_b} - \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{yc}} \psi(\varepsilon) d\varepsilon \right\} = 0. \end{aligned}$$

Это уравнение содержит только координаты эталонной диаграммы, т.е. коэффициент трансформации зависит только от класса бетона, который характеризуют узловые точки эталонной диаграммы.

Координаты узловых точек (рис. 3, табл. 1) определяются из экспериментов на центральное растяжение–сжатие [4]. На рис. 3 узловая точка 1 соответствует точке с координатами  $(\varepsilon_{mc}, \sigma_{mc})$  на эталонной диаграмме (см. рис. 1), точка 2 — точке экстремума  $(\varepsilon_{rc}, \sigma_{rc})$ , точка 3 — точке с координатами  $(\varepsilon_{yt}, \sigma_{yt})$ , узловая точка 4 — точке с координатами  $(\varepsilon_{rt}, \sigma_{rt})$  на эталонной диаграмме, точка 5 соответствует точке экстремума  $(\varepsilon_{rt}, \sigma_{rt})$ , точка 6 — точке с координатами  $(\varepsilon_{mt}, \sigma_{mt})$ .

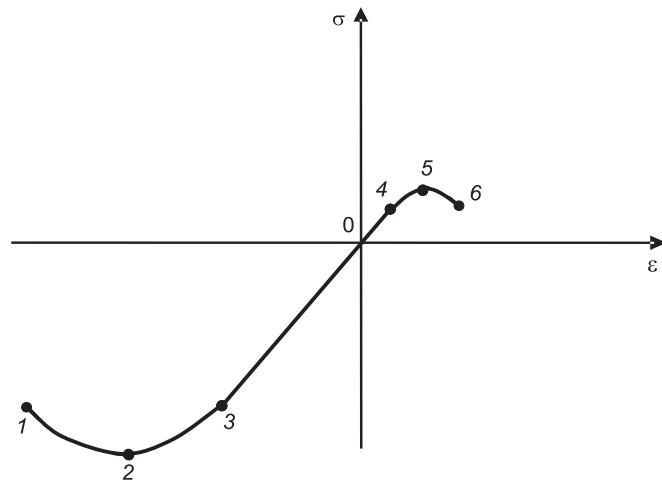


Рис. 3. Узловые точки диаграммы деформирования бетона

Таблица 1

**Координаты узловых точек эталонной диаграммы деформирования для бетонов класса В15, В35, В45 при центральном растяжении–сжатии**

№ узла	B15		B35		B45	
	$\varepsilon_i$	$\sigma_i$ , МПа	$\varepsilon_i$	$\sigma_i$ , МПа	$\varepsilon_i$	$\sigma_i$ , МПа
1	$-4,8 \cdot 10^{-3}$	-17,5	$-3,8 \cdot 10^{-3}$	-30,5	$-3,6 \cdot 10^{-3}$	-36,1
2	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	-20,0	$-1,6 \cdot 10^{-3}$	-36,0	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	-42,4
3	$-0,5 \cdot 10^{-3}$	-12,0	$-0,53 \cdot 10^{-3}$	-21,0	$-0,6 \cdot 10^{-3}$	-25,5
4	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,3860	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,8555	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,9350
5	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,6050	$4,7 \cdot 10^{-5}$	1,2657	$4,6 \cdot 10^{-5}$	1,3285
6	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0,4960	$5,1 \cdot 10^{-5}$	1,2534	$5,4 \cdot 10^{-5}$	1,2720

Зависимости  $\sigma - \varepsilon$  на участках неупругого деформирования аппроксимируются полиномами второго порядка [4].

В результате вычислений получены коэффициенты трансформации диаграмм деформирования бетона для рассматриваемых условных классов бетона В15, В35, В45.

Из табл. 2 видно, что значения предельных деформаций в растянутой зоне при изгибе для бетонов более низкого класса увеличиваются на 30 % по сравнению с центральным растяжением, а для бетонов более высоких классов это увеличение менее значительно (10–17 %).

Таблица 2

**Коэффициенты трансформации эталонных диаграмм и сравнение предельных деформаций и напряжений**

Растяжение				Сжатие			
Параметр	Класс бетона			Параметр	Класс бетона		
	B15	B35	B45		B15	B35	B45
$k_t$	2,212	2,056	2,119	$k_c$	1,642	1,622	1,291
$\varepsilon_{mt} \cdot 10^5$	4,4	5,1	5,4	$\varepsilon_{rc} \cdot 10^3$	-1,4	-1,6	-2,0
$\varepsilon_{mt}^u \cdot 10^5$	5,85	5,52	6,30	$\varepsilon_{rc}^u \cdot 10^3$	-1,98	-2,27	-2,41
$\frac{\varepsilon_{mt}^u}{\varepsilon_{mt}}$	1,331	1,083	1,166	$\frac{\varepsilon_{rc}^u}{\varepsilon_{rc}}$	1,414	1,419	1,205
$\psi(\varepsilon_{mt})$	0,4960	1,2534	1,2720	$\psi(\varepsilon_{rc})$	-20,0	-36,0	-42,4
$\psi^u(\varepsilon_{mt})$	0,8456	1,5438	1,6690	$\psi^u(\varepsilon_{rc})$	-25,1	-45,02	-47,01
$\frac{\psi^u(\varepsilon_{mt})}{\psi(\varepsilon_{mt})}$	1,705	1,232	1,312	$\frac{\psi^u(\varepsilon_{rc})}{\psi(\varepsilon_{rc})}$	1,26	1,25	1,11

Значения напряжений в экстремальных точках диаграмм при изгибе в сжатой зоне на 11–26 % превышают значения соответствующих напряжений при центральном сжатии.

Найденные коэффициенты трансформации для растянутой и сжатой зон определяют трансформированную диаграмму  $\sigma - \varepsilon$  для изгибаемых элементов в состоянии предразрушения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бондаренко, В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. — М. : Стройиздат, 1982. — 287 с.
- Адищев, В.В. Определение коэффициента трансформации эталонной диаграммы деформирования бетона растянутой зоны при изгибе в стадии предразрушения [Текст] / В.В. Адищев, В.М. Митасов, Э.В. Березина, Е.М. Сергуничева, Н.В. Ершова // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 1.
- Адищев, В.В. Энергетический подход к моделированию процесса образования трещин в изгибаемых железобетонных элементах [Текст] / В.В. Адищев, В.М. Митасов // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 4. — С. 26–31.
- Сергуничева, Е.М. Построение диаграмм деформирования бетона при растяжении [Текст] / Е.М. Сергуничева, Э.В. Березина, Н.В. Ершова // Вест. КрасГАУ. — 2007. — № 5. — С. 33–37.

*АДИЩЕВ В.В., д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*БЕРЕЗИНА Э.В., доц.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ЕРШОВА Н.В., ст. препод.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено после доработки 26.07.11

**Adishchev V.V.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Architecture and Civil University (Sibstrin), Russia

**Berezina E.V.**, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Ershova N.V.**, senior lecturer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **DETERMINATION OF REFERENCE CHARTS TRANSFORMATION RATIO FOR BEND AND ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS**

The method for transforming stress-strain reference charts based on energy relations for the bending and eccentrically compressed reinforced concrete elements is examined. The charts transformation coefficients for some classes of conventional concrete are defined.

**Key words:** reference chart, transformation coefficient, bend reinforced concrete elements, energy relations.

### REFERENCES

1. Bondarenko, V.M. Engineering methods for the nonlinear theory of reinforced concrete [Text] / V.M. Bondarenko, S.V. Bondarenko. — M. : Stroyizdat, 1982. — 287 p.
2. Adishchev, V.V. Determination of the transformation of the reference strain diagram of concrete stretched area at a bend in the prefraction stage [Text] / V.V. Adishchev, V.M. Mitasov, E.V. Berezina, E.M. Sergunicheva, N.V. Ershova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 1.
3. Adishchev, V.V. Energy approach to modeling the process of cracking in reinforced concrete flexural elements [Text] / V.V. Adishchev, V.M. Mitasov / News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 4. — P. 26–31.
4. Sergunicheva, E.M. Plotting diagrams of concrete deformation in tension [Text] / E.M. Sergunicheva, E.V. Berezina, N.V. Ershova // KrasGAU herald. — 2007. — N 5. — P. 33–37.

УДК 539.3:624.154

В.Д. КУРГУЗОВ, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАБИВКИ ИЛИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СВАЙ ИЗ ГРУНТА\*

Предложена модель жесткопластического деформирования стержня в среде с трением, упругим отпором и вязким сопротивлением под действием динамических нагрузок. На начальном этапе при напряжениях меньше предела текучести стержень считается абсолютно твердым (недеформируемым). По достижении напряжениями предела текучести в стержне возникает зона пластических деформаций, которая начинает распространяться от одного из его торцов. Сформулированы уравнения движения абсолютно твердой и пластической частей стержня. Предложен итерационный процесс определения границы зоны пластичности и смещений стержня на всем временном интервале действия внешней нагрузки. Представлены решения модельных задач об извлечении полностью заглубленной сваи из грунта и забивке свай в грунт.

**Ключевые слова:** стержень, трение, вязкость, динамическое нагружение, жестко-пластическое деформирование.

В большинстве работ по моделированию процессов движения сваи в грунте при ее забивке рассматриваются волновые процессы распространения упругих напряжений в свае при ее взаимодействии с грунтом. Например, в работах [1–3] изучаются колебания упругих стержней, взаимодействующих с окружающей средой по закону сухого трения Кулона; получены точные аналитические решения в случае возбуждения стержня импульсами ступенчатой формы; решены задачи о колебаниях конечного стержня, один конец которого закреплен, а на другом задано мгновенно включенное напряжение или знакопеременное периодическое напряжение постоянной интенсивности; рассмотрены случаи распределенного и локализованного трения; показано, что диссиляция в системе с трением сильно зависит от характера приложения нагрузки во времени.

В данной работе рассматривается более общая задача движения жесткопластического стержня в среде с трением, упругим и вязким сопротивлением. Подобные задачи возникают также при изучении динамических процессов глубокой вытяжки (заглубления) металлических композитов с дискретными волокнами при динамическом импульсном воздействии на арматуру.

Рассмотрим стержень длины  $L$ , движущийся в среде с трением  $\tau$ , упругим  $k$  и вязким сопротивлением  $c$  под действием динамического импульса внешней нагрузки  $P$  (рис. 1, *a*). Материал стержня считается жесткопластическим с линейным упрочнением. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  деформирования материала стержня приведена на рис. 2, где  $\sigma_t$  — предел текучести,  $\sigma_b$  — предел прочности,  $\varepsilon_b$  — деформации, соответствующие пределу прочности.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 72.

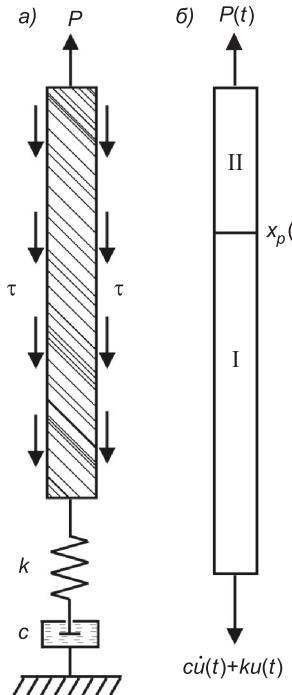


Рис. 1. Схема нагружения стержня (а); положение границы пластической области  $x_p(t)$ , разделяющей стержень на абсолютно жесткую I и деформируемую II части (б)

вать условием предельного равновесия Кулона  $\tau = c_0 + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ , где  $c_0$  — сцепление грунта;  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $\sigma_n$  — боковое давление. С увеличением глубины боковое давление грунта растет по линейному закону, следовательно, касательные напряжения  $\tau = \tau(x)$  на боковой поверхности стержня будут распределены также линейно.

Зададим внешнюю нагрузку  $P(t)$  в виде повторяющихся по времени синусоидальных импульсов, как показано на рис. 3. Каждый из импульсов можно представить в виде

$$P_n(t) = \begin{cases} p_n \sin \omega_n t, & t_{2n-1} \leq t \leq t_{2n}, \\ 0, & t_{2n} \leq t \leq t_{2n+1}, \end{cases}$$

где  $n$  — номер цикла нагружения;

$p_n$  — амплитуда импульса;

$\omega_n$  — частота.

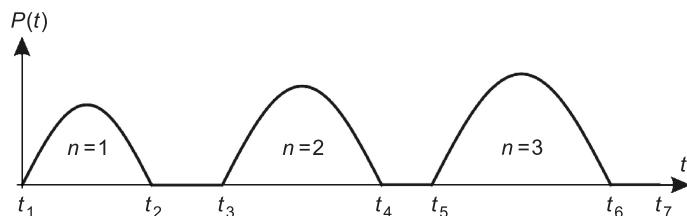


Рис. 3. Внешняя нагрузка  $P(t)$  в виде повторяющихся во времени синусоидальных импульсов

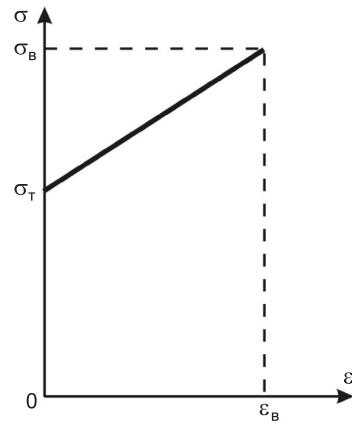


Рис. 2. Диаграмма деформирования жесткопластического материала

Направим ось  $Ox$  с началом на нижнем торце стержня по его оси. На боковой поверхности стержня действуют касательные напряжения  $\tau = \tau(x)$ , создаваемые силой трения, направленной противоположно вектору скорости. Сила трения может быть самой разнообразной природы. Например, в случае окружающей среды типа грунта касательные напряжения на боковой поверхности стержня можно характеризовать

Рассмотрим отдельный импульс  $P(t) = P_s \sin \omega_s t$ . При напряжениях  $\sigma$  меньше предела текучести  $\sigma_t$  стержень, согласно модели жесткопластического материала с упрочнением (см. рис. 2), является абсолютно жестким (недеформируемым). Примем следующие обозначения:  $c$  — коэффициент вязкости;  $k$  — коэффициент жесткости;  $M$  — масса стержня;  $m(x) = F\rho$  — масса, приходящаяся на единицу длины стержня;  $\rho$  — плотность материала стержня;  $F = F(x)$  — площадь поперечного сечения стержня;  $b = b(x)$  — периметр поперечного сечения стержня;  $L_1 = u(t)$ ,  $L_2 = u(t) + L$  — координаты нижнего и верхнего торцов стержня,  $u = u(t)$  — смещение стержня.

Введем в рассмотрение продольное усилие в стержне  $N = F\sigma$ . Тогда уравнение движения стержня можно записать в виде

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial x} = m(x)\ddot{u}(t) + b(x)\tau(x). \quad (1)$$

Интегрируя уравнение (1) по длине стержня, получаем

$$N(L_2, t) - N(L_1, t) = M\ddot{u}(t) + \int_{L_1}^{L_2} b(x)\tau(x)dx.$$

Учитывая, что  $N(L_2, t) = P(t)$ ,  $N(L_1, t) = c\dot{u}(t) + ku(t)$ , приходим к уравнению движения в виде

$$M\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) - \int_{L_1}^{L_2} b(x)\tau(x)dx. \quad (2)$$

Уравнение (2) используется ниже при решении задачи о забивке / извлечении абсолютно жесткой сваи. При извлечении сваи из грунта упругий отпор отсутствует, поэтому в (2) следует положить  $k = 0$ , при забивке свая испытывает упругое и вязкое сопротивление, т.е.  $k \neq 0$ ,  $c \neq 0$ .

Для получения зависимости  $N = N(x, t)$  проинтегрируем уравнение (1) по  $x$  от  $L_1$  до  $x$ :

$$\int_{L_1}^x \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} dx = \int_{L_1}^x m(x)\ddot{u}(t) dx + \int_{L_1}^x b(x)\tau(x)dx.$$

В результате получим

$$N(x, t) = \dot{u}(t) \int_{L_1}^x m(x)dx + c\dot{u}(t) + ku(t) + \int_{L_1}^x b(x)\tau(x)dx. \quad (3)$$

В частном случае стержня постоянного поперечного сечения при  $\tau(x) = \text{const}$  зависимость продольного усилия  $N$  от пространственной координаты  $x$ , как это следует из формулы (3), будет линейной. Следовательно, пластическое деформирование стержня начнется либо на нижнем, либо на верхнем торце. На рис. 4 показаны типичные зависимости  $N(L_2, t) = P(t)$  (кривая 1) и  $N(L_1, t) = c\dot{u}(t) + ku(t)$  (кривая 2). Если амплитуда внешней силы  $P_s$  окажется больше величины  $F\sigma_t$ , в первый раз в состояние пластичности стержень перейдет на верхнем торце. Момент времени  $t_p$  перехода стержня в пластичность определим из решения уравнения  $N(L_2, t_p) = F\sigma_t$ . При дальнейшем возрастании нагрузки граница пластической области  $x_p(t)$  будет перемещаться по стержню и стержень разобьется

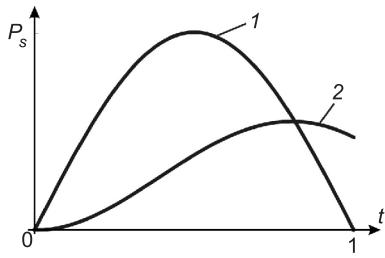


Рис. 4. Зависимость от времени типичных нагрузок, действующих на верхнем (кривая 1) и нижнем (кривая 2) торцах стержня

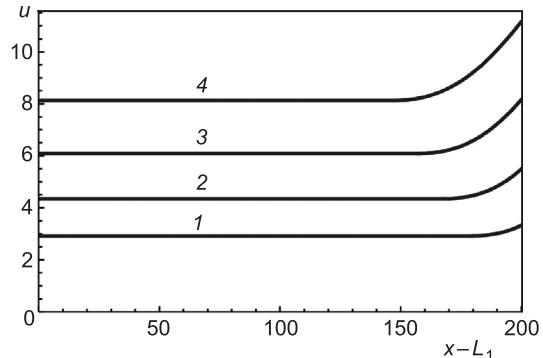


Рис. 5. Распределение смещений по длине сваи в последовательные моменты времени

на две части: абсолютно жесткую и деформируемую, как показано на рис. 1, б. В общем случае функция  $N(x, t)$  нелинейна, поэтому в пластическое состояние стержень переходит в одном из поперечных сечений  $L_1 < x_p(t) < L_2$ , дальнейшее распространение пластической зоны возможно в направлении обоих торцов. Для простоты рассуждений в дальнейшем при построении численного алгоритма ограничимся случаем возникновения пластической зоны на верхнем торце стержня (см. рис. 1, б).

Обозначим смещения абсолютно жесткой части стержня через  $u_1(t)$ . Тогда уравнение движения можно записать в виде

$$F(x)\rho\ddot{u}_1(t) = \frac{\partial N_1(x, t)}{\partial x} - b(x)\tau(x), \quad L_1(t) \leq x \leq x_p(t), \quad t \geq t_p,$$

где  $N_1(x, t)$  — продольное усилие абсолютно жесткой части стержня. Интегрируя по  $x$  от  $L_1(t)$  до  $x_p(t)$ , получаем соотношение

$$\Phi_p \rho\ddot{u}_1(t)x_p(t) = N_1(x_p(t), t) - N_1(L_1(t), t) - \int_{L_1}^{x_p} b(x)\tau(x) dx,$$

где  $\Phi_p = \int_{L_1}^{x_p} F(x) dx$ . Учитывая, что  $N_1(x_p(t), t) = F(x_p)\sigma_\tau$ ,  $N_1(L_1(t), t) = c\dot{u}_1(t) + k u_1(t)$ , приходим к уравнению движения абсолютно жесткой части стержня:

$$\Phi_p \rho\ddot{u}_1(t)x_p(t) + c\dot{u}_1(t) + k u_1(t) = F(x_p)\sigma_\tau - \int_{L_1}^{x_p} b(x)\tau(x) dx. \quad (4)$$

Уравнение (4) необходимо дополнить начальными условиями

$$u_1(t_p) = u(t_p) \equiv u_p, \quad \dot{u}_1(t_p) = \dot{u}(t_p) \equiv \dot{u}_p, \quad (5)$$

где  $u(t)$  — решение задачи (2) для исходного абсолютно жесткого стержня при  $t \leq t_p$ . Задача (4), (5) в силу наличия множителя  $x_p(t)$  даже в случае стержня постоянного поперечного смещения и постоянной силы трения ( $b(x) = \text{const}$ ,  $\tau(x) = \text{const}$ ) является нелинейной.

Рассмотрим теперь уравнение движения пластической части стержня

$$F(x)\rho\ddot{u}_2(x, t) = \frac{\partial N_2(x, t)}{\partial x} - b(x)\tau(x), \quad x_p(t) \leq x \leq L_2(t), \quad t \geq t_p. \quad (6)$$

Зависимость  $\sigma - \varepsilon$  при пластическом деформировании имеет вид  $\sigma = \sigma_t + \alpha\varepsilon$  (см. рис. 2). Следовательно, продольные усилия пластической части стержня можно представить в виде

$$N_2 = F\sigma_2 = F\left(\sigma_t + \alpha \frac{\partial u_2}{\partial x}\right).$$

Подставляя в (6), получаем дифференциальное уравнение в частных производных относительно неизвестной функции  $u_2(x, t)$ :

$$F(x)\alpha \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial x^2} - F(x)\rho \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial t^2} = b(x)\tau(x). \quad (7)$$

Уравнение (7) необходимо дополнить начальными условиями

$$u_2(x, t_p) = u_p, \quad \dot{u}_2(x, t_p) = \dot{u}_p \quad (8)$$

и граничными условиями

$$\left. \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_p(t)} = 0, \quad \left. F(x) \left( \sigma_t + \alpha \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial x} \right) \right|_{x=L_2(t)} = P(t). \quad (9)$$

На границе раздела  $x_p(t)$  жесткой и пластической частей стержня смещения должны совпадать. Отсюда получаем условия склейки решений задач (4) и (7):

$$u_1(t) = u_2(x_p(t), t), \quad \dot{u}_1(t) = \dot{u}_2(x_p(t), t). \quad (10)$$

Особенностью задачи (7)–(9) является то, что ее решение ищется в расширяющейся области пространственной переменной: нижняя граница области интегрирования  $x_p(t) \leq x \leq L_2(t)$  перемещается относительно стержня вниз с изменением времени. Поэтому обычные методы интегрирования уравнения колебаний (7) здесь не проходят. Для решения задачи (7)–(9) воспользуемся численно-аналитическим методом, который состоит в следующем. Дискретизируем уравнение (7) по времени, оставляя пространственную переменную  $x$  непрерывной. Зададим шаг по времени  $\Delta t$ . Аппроксимируя вторую производную по времени в (7) центральной разностью второго порядка, получим

$$\frac{\partial^2 u_2(x, t_p + \Delta t)}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\alpha} \frac{u_2(x, t_p + \Delta t) - 2u_2(x, t_p) + u_2(x, t_p - \Delta t)}{\Delta t^2} = \frac{b(x)\tau(x)}{\alpha F(x)},$$

где  $x_p(t_p + \Delta t) \leq x \leq L_2$ . Значение решения на нижнем слое по времени найдем, разложив функцию  $u_2(x, t)$  в ряд по переменной  $t$  в окрестности точки  $t_p$ :

$$u_2(x, t_p - \Delta t) = u_2(x, t_p) - \dot{u}_2(x, t_p)\Delta t + \ddot{u}_2(x, t_p)\frac{\Delta t^2}{2} = u_p - \dot{u}_p\Delta t + \ddot{u}_p\frac{\Delta t^2}{2}.$$

В результате приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_2(x, t_p + \Delta t)}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\alpha \Delta t^2} u_2(x, t_p + \Delta t) = \\ & = \frac{b(x)\tau(x)}{\alpha F(x)} - \frac{\rho}{\alpha \Delta t^2} \left( u_p + \dot{u}_p \Delta t - \ddot{u}_p \frac{\Delta t^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

относительно неизвестной функции  $u_2(x, t_p + \Delta t)$  с краевыми условиями

$$\left. \frac{\partial u_2(x, t_p + \Delta t)}{\partial x} \right|_{x=x_p(t)} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial u_2(x, t_p + \Delta t)}{\partial x} \right|_{x=L_2} = \frac{1}{\alpha F(L_2)} (P(t_0 + \Delta t) - F(L_2) \sigma_t).$$

Функция  $x_p(t)$  в уравнениях (4), (7) является неизвестной. Для ее нахождения организуется итерационный процесс: задаемся некоторым значением  $x_p(t_p + \Delta t)$ , которое уточняется на последующих итерациях с использованием условий склейки решений (10). Таким образом, находим все неизвестные функции задачи  $x_p(t_p + \Delta t)$ ,  $u_1(t_p + \Delta t)$ ,  $u_2(x, t_p + \Delta t)$ . На следующих шагах по времени  $t_p + 2\Delta t$ ,  $t_p + 3\Delta t$ , ... алгоритм повторяется с единственным отличием, что функции в правой части (11) в круглых скобках будут зависеть от переменной  $x$ .

Для демонстрации возможностей предложенного численно-аналитического метода рассмотрим решения двух простых модельных задач:

- 1) извлечение полностью заглубленной жесткопластической сваи из грунта;
- 2) забивка / извлечение абсолютно жесткой сваи.

В первой задаче рассматривается заглубленная жесткопластическая свая круглого постоянного поперечного сечения длиной  $L = 20$  м, диаметром 1 м, которая под действием внешней нагрузки может деформироваться пластически. Плотность материала сваи  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, предел текучести  $\sigma_t = 245$  МПа, коэффициент упрочнения  $\alpha = 625$  МПа, коэффициент вязкости  $c = 200$  (Н·с)/м, упругий отпор отсутствует  $k = 0$ . Предположим, что сила трения не зависит от переменной  $x$ , т.е.  $\tau(x) = \tau_0 = 0,1$  МПа. Тогда

$$T_L = \int_0^L b(x) \tau(x) dx = L b \tau_0 = 6,28 \text{ МН.}$$

Амплитуду внешней нагрузки примем равной  $P_s = 40T_L$ , продолжительность импульса — равной 1 с ( $\omega_s = \pi$ ). Вычислив зависимость (3), решаем уравнение  $N(L_2, t_p) = F\sigma_t$  и определяем момент времени перехода сваи в пластичность  $t_p = 0,278$  с. Зададим шаг по времени  $\Delta t = 0,05$ . Используя изложенный выше алгоритм (4)–(11), находим границу зоны пластичности  $x_p(t_p + \Delta t) = 17,95$  м, смещение жесткой части сваи  $u_1(t_p + \Delta t) = 0,29$  м и зависимость от  $x$  смещений деформируемой части сваи  $u_2(x, t_p + \Delta t)$ . Распределение смещений по длине сваи в последовательные моменты времени  $t_p + \Delta t, \dots, t_p + 4\Delta t$  (обозначены цифрами 1–4 соответственно) показано на рис. 5. Граница зоны пластичности в соответствующие моменты времени принимает значения:  $x_p(t_p + \Delta t) = 17,95$  м,  $x_p(t_p + 2\Delta t) = 16,8$  м,  $x_p(t_p + 3\Delta t) = 15,73$  м,  $x_p(t_p + 4\Delta t) = 14,73$  м.

Следует отметить, что шаг по времени  $\Delta t = 0,05$  выбран довольно грубым. Данный пример носит иллюстративный характер и приведен только для того, чтобы продемонстрировать возможности метода. Для адекватного описания процесса деформирования сваи на всем интервале действия импульса внешней нагрузки необходимо выбирать достаточно мелкий шаг по времени.

Во второй задаче рассматривается случай, когда приложенная нагрузка вызывает в свае напряжения меньше предела текучести. Тогда, согласно принятой модели деформирования, свая будет перемещаться как абсолютно твердое тело. Типичными задачами такого рода являются за-

бивка сваи в грунт и извлечение сваи из грунта. Рассмотрим полностью заглубленную в грунт сваю круглого постоянного поперечного сечения длиной  $L = 24$  м, диаметром 0,56 м, плотностью  $\rho = 7500$  кг / м<sup>3</sup>. Коэффициент вязкости грунта примем равным  $\eta = 200$  Па · с (влажная глина [4]). Переход к коэффициенту вязкости  $c$ , входящему в уравнение (1), осуществляется по формуле  $c = b\eta$ , где  $b$  — периметр поперечного сечения, следовательно,  $c = 351,858$  (Н · с) / м. При вытягивании сваи упругий отпор отсутствует, поэтому коэффициент жесткости  $k = 0$ . Закон трения сваи о грунт имеет вид

$$\tau(x) = \xi \operatorname{tg} \varphi \cdot \gamma(L - x),$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения;

$$\xi = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) — коэффициент бокового давления;$$

$\gamma$  — удельный вес грунта;

ось  $Ox$  с началом на нижнем торце сваи направлена к поверхности.

В расчетах используются следующие значения параметров задачи:  $\gamma = 2 \cdot 10^4$  Н / м<sup>3</sup>,  $\varphi = 31^\circ$ ,  $\xi = 0,32$  [4]. Тогда напряжения трения можно записать в виде

$$\tau(x) = \tau_0 \frac{L - x}{L},$$

где  $\tau_0 = 0,096$  МПа.

Выдергивать сваю из грунта будем синусоидальным импульсом внешней нагрузки, приложенным к верхнему торцу,  $P = P_s \sin \omega_s t$ , где  $P_s = 500$  Т<sub>н</sub>,  $T_L = L \tau_0 / 2$ ,  $\omega_s = \pi$ , следовательно, импульс действует в течение одной секунды.

По мере вытягивания сваи из грунта сила трения будет уменьшаться, так как уменьшается площадь боковой поверхности, поэтому в уравнении (2) пределы интегрирования примут значения  $L_1 = u(t)$  и  $L_2 = L$ . В результате получим нелинейное уравнение движения

$$M \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) = P_s \sin \omega_s t - b \tau_0 \left[ \frac{L}{2} - \left( 1 - \frac{u(t)}{2L} \right) u(t) \right], \quad (12)$$

интегрировать которое будем численно. Приложенный импульс внешней нагрузки действует в течение 1 с, затем нагрузка снимается (см. рис. 3). На временах  $t > 1$  интегрируется уравнение (12), в котором  $P_s = 0$ , а в качестве начальных условий используются значения смещений и скоростей в момент времени  $t = 1$ . После снятия нагрузки свая продолжит движение по инерции и остановится в момент времени  $t = 94$  с. В этот момент свая будет возвышаться над землей на 1,45 м. Повторяя циклы нагружений, получим последовательность значений смещений, показанную на рис. 6 треугольниками, где  $u$  — смещения,  $n$  — циклы нагружения. Начальными условиями для каждого последующего цикла являются значения смещений и скоростей, полученные на предыдущем цикле. На последнем цикле ( $n = 6$ ) свая окажется вытащенной из земли на 18,6 м.

Рассмотрим теперь противоположную задачу — забивку той же самой сваи в грунт. В начальный момент неподвижная свая стоит на земле, затем к верхнему торцу сваи прикладываются последовательные импульсы внешней силы по указанной выше схеме. Напряжения трения в этом случае будут иметь вид  $\tau(x) = \tau_0 \frac{L - x}{L}$ , а пределы интегрирования в урав-

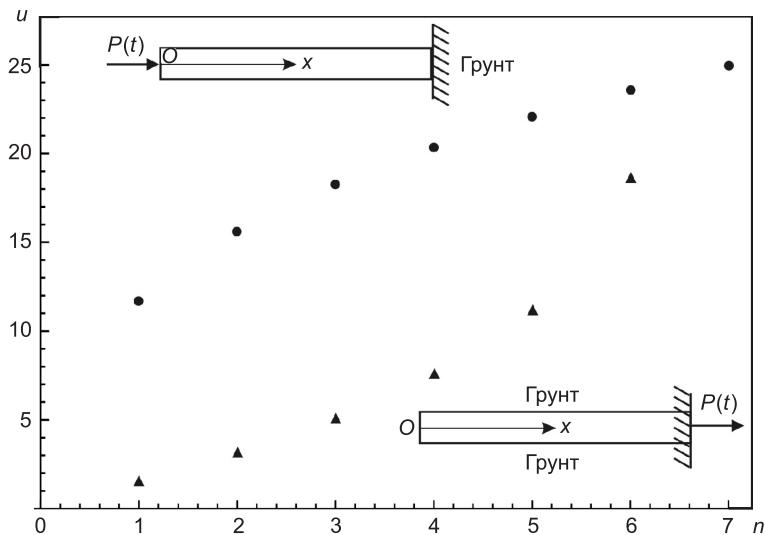


Рис. 6. Зависимость смещений  $u$  от числа циклов нагружений  $n$   
 ● — забивка сваи в грунт; ▲ — извлечение сваи из грунта

нении (2) примут значения  $L_1 = L$  и  $L_2 = L + u(t)$ . Уравнение, описывающее процесс заглубления сваи, будет иметь вид

$$M\ddot{u}(t) + cu(t) + ku(t) = P_s \sin \omega_s t - b\tau_0 \frac{u^2(t)}{2L}, \quad (13)$$

где  $\tau_0 = 0,096$  МПа,  $c = 15$  (Н · с) / м,  $k = 1,232$  МН / м. На рис. 6 кружками показана последовательность смещений сваи при каждом цикле нагружений. С последним ударом ( $n = 7$ ) свая уйдет в землю на глубину 24,93 м.

В приведенных примерах использовалась массивная свая плотностью  $\rho = 7500$  кг / м<sup>3</sup>. Расчеты показывают, что с уменьшением массы сваи либо силы удара или увеличением вязкости грунта потребуется большее количество ударов для забивки / извлечения сваи из грунта. Так, например, полагая в задаче о забивке железобетонной сваи плотностью  $\rho = 2500$  кг / м<sup>3</sup> коэффициент вязкости  $\eta = 400$  Па · с,  $P_s = 400T_L$ , получим последовательность значений смещений, показанную на рис. 7. Как видно, в этом случае для полной забивки сваи требуется 36 циклов нагружений, при  $n = 36$  имеем  $u = 23,906$  м. Полученная последовательность смещений оказывается близкой к линейной.

В статье предложена математическая модель жесткопластического деформирования стержня в среде с трением, вязким сопротивлением и упругим отпором под действием динамических нагрузок. Абсолютно жесткая свая, забиваемая в грунт, является частным случаем такой модели. Предложенная модель не учитывает волновые процессы распространения

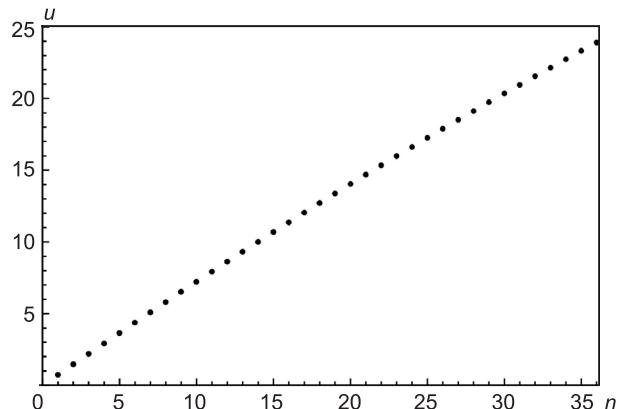


Рис. 7. Забивка железобетонной сваи в вязкий грунт  
 зависимость смещений  $u$  от числа циклов нагружений  $n$

упругих напряжений, поэтому оказывается намного проще традиционных моделей взаимодействия свай с грунтом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин, Л.В. Удар жестким телом по упругому стержню с внешним сухим трением [Текст] / Л.В. Никитин // Изв. АН СССР. МТТ. — 1967. — Т. 2, № 2. — С. 166–170.
2. Никитин, Л.В. Продольные колебания упругих стержней при наличии сухого трения [Текст] / Л.В. Никитин // Изв. АН СССР. МТТ. — 1978. — Т. 13, № 6. — С. 137–145.
3. Смирнов, А.Л. Математическое моделирование процесса забивки свай в грунт [Текст] / А.Л. Смирнов // Динамика неоднородных сред и взаимодействие волн с элементами конструкций : сб. науч. тр. / Под ред. В.С. Никифоровского. — Новосибирск : Ин-т горного дела СО АН СССР, 1987. — С. 146–149.
4. Чеботарев, Г.П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения [Текст] / Г.П. Чеботарев. — М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 616 с.

*КУРГУЗОВ В.Д., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
НЕМИРОВСКИЙ Ю.В., д-р физ.-мат. наук, проф.  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск*

Получено после доработки 14.06.11

**Kurguzov V.D.**, doctor of physics and mathematics sciences, professor; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Nemirovsky Yu.V.**, doctor of physics and mathematics sciences, professor, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

#### MODELLING OF DYNAMIC PROCESSES OF PILE DRIVING OR PILE EXTRACTS FROM THE GROUND

The model of hard plastic bar deformations in the environment with a friction, elastic repulse and viscous resistance under the influence of dynamic loadings is offered. At the initial stage at stresses of a smaller limit of yield point the bar is considered absolutely hard (not deformed). On reaching pressure of a yield point in a bar there is a zone of plastic strains which starts to extend from one of its end faces. The equations of movement of absolutely hard and plastic parts of a bar are formulated. Iterative process of definition of plasticity zone boundary and bar displacement on all time intervals of action of external loading is offered. Solutions of modeling problems on an extract of completely buried pile from a ground and pile driving are presented.

**Key words:** bar, friction, viscosity, dynamic loading, hard plastic deformation.

#### REFERENCES

1. Nikitin, L.V. Blow a rigid body on an elastic bar with an external dry friction [Text] / L.V. Nikitin // Izv. AN the USSR. MTT. — 1967. — V. 2, N 2. — P. 166–170.
2. Nikitin, L.V. Longitudinal oscillation of elastic bars in the presence of a dry friction [Text] / L.V. Nikitin // Izv. AN the USSR. MTT. — 1978. — V. 13, N 6. — P. 137–145.
3. Sмирнов, А.Л. Mathematical modeling of pile driving in a ground [Text] / А.Л. Смирнов // Dynamics of non-uniform environments and interaction of waves with elements of structures. Proceedings / Ed. by V.S. Nikiforovsky. — Novosibirsk : Institute of mining SB AS USSR, 1987. — P. 146–149.
4. Чеботарев, Г.П. Mechanics of ground, the bases and earthen constructions [Text] / Г.П. Чеботарев. — М. : Book house «LIBROKOM», 2009. — 616 p.

**УДК 69.059.14**

**Т.Л. СИМАНКИНА, Н.В. ШИРКО**

**ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА ЗДАНИЙ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ**

Представлены вопросы применения визуализации дефектов при определении физического износа здания на основании сравнения обследуемого объекта недвижимости с визуальными образами в виде 3D-моделей с использованием информационных технологий.

**Ключевые слова:** визуализация, техническое состояние здания, физический износ, деградационные процессы, дефект, 3D-модель, параметрическое моделирование.

Поддержание здания в работоспособном состоянии требует определенных затрат и технических решений при проведении своевременных ремонтно-восстановительных мероприятий, а также технического обслуживания. По данным статистики, в Петербурге в неудовлетворительном и ветхом техническом состоянии находится более половины нежилого и порядка 10 % жилого фонда. При этом важно учитывать, что понесенные затраты должны приносить экономическую выгоду в виде увеличения срока безаварийной эксплуатации объекта, т.е. улучшения качественных характеристик в течение запланированного срока. Исходя из этого неудовлетворительное состояние объекта ставит потенциального арендатора/покупателя перед естественным выбором: приобрести встроено помещение в новостройке без отделки или в старом фонде, но в не-пригодном состоянии.

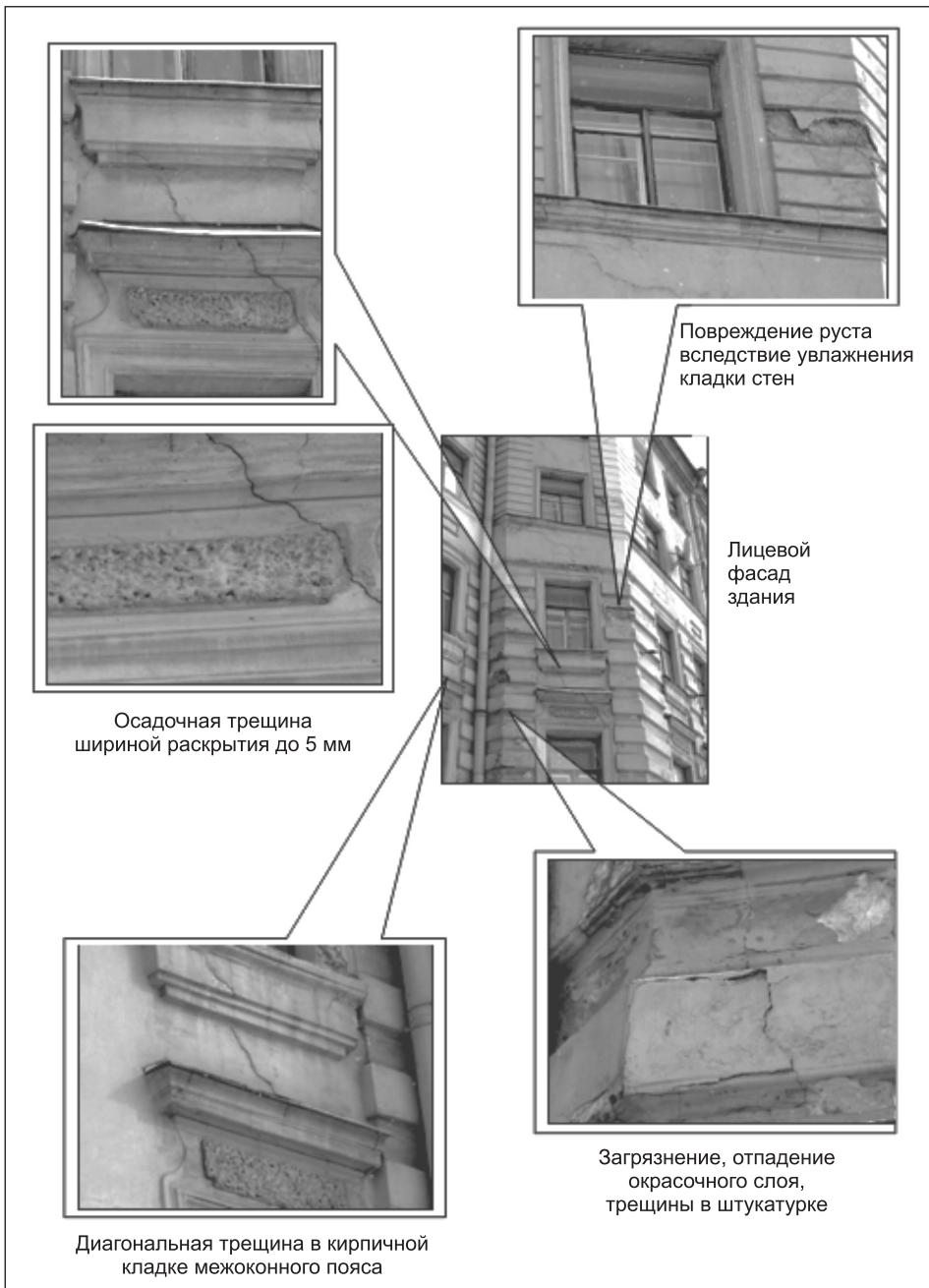
При определении технического состояния объекта недвижимости посредством визуального осмотра (экспертным методом) и сопоставления наблюдаемых дефектов с количественным выражением износа конструкции вне зависимости от типа обследуемого здания специалисты используют законы и нормативные документы [1–3].

Согласно методике, описанной в ведомственных строительных нормах [1], для конструктивных элементов возможен вариант определения износа в зависимости от срока их эксплуатации или же путем сопоставления наблюдаемых дефектов, описываемых в методике, с последующим «выбором» соответствующего износа.

На рис. 1 приведен пример определения физического износа кирпичных оштукатуренных стен [1], на основании чего делается вывод: износ стен принять равным 25 %.

Указанный документ был введен в 1987 году и не содержит информации о новых материалах, широко используемых в настоящее время в строительстве, что, несомненно, ограничивает возможности применения норматива на практике. Тем не менее эти нормы являются действующими и при отсутствии более совершенных утвержденных методик повсеместно используются специалистами.

Также очевидно, что описываемый выше метод расчета физического износа весьма субъективен, в частности, в силу субъективности сужде-



*Rис. 1. Фотографии обследуемого здания с обозначением дефектов*

ния эксперта и своей «нормативности» эта методика изначально не может учсть нетипичные условия эксплуатации объекта.

Существуют и иные разработки, основанные на многолетних наблюдениях и исследованиях, позволяющие определять физический износ всего объекта, зная его нормативный и действительный возраст [4, с. 207] (рис. 2). Приведенные графики могут быть хорошим пособием для определения ориентировочного износа объекта, но есть и существенный недостаток, связанный с невозможностью учета условий эксплуатации и качества строительства.

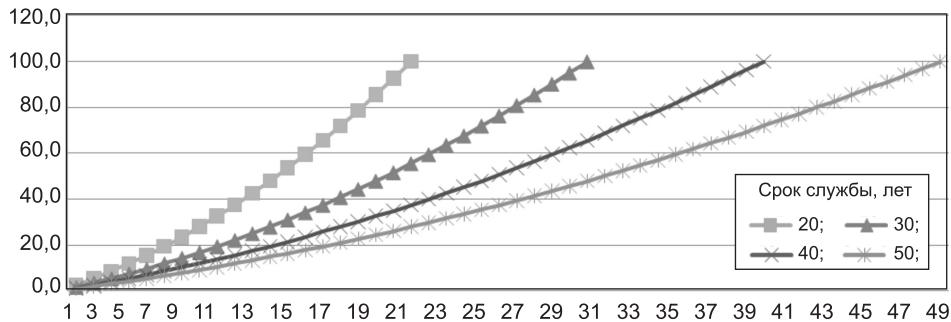


Рис. 2. Динамика износа зданий в процентах от срока эксплуатации

Таким образом, недостаток этой методики связан с возможностью использования ее только для объектов, эксплуатируемых в нормальных условиях, т.е. в соответствии с предусмотренными в нормах или проекте технологическими и бытовыми условиями. В противном случае расчет приведет к заведомо ложному результату.

Определить физический износ методом учета сроков жизни, согласно отечественной научной и методической литературе, достаточно просто [4, с. 315]:

$$F = \frac{\text{ДВ}}{\Phi\text{Ж}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $F$  — физический износ;

$\text{ДВ}$  — действительный возраст;

$\Phi\text{Ж}$  — срок физической жизни (нормативный).

На практике действительный возраст принимается с учетом условий эксплуатации и может быть как меньше, так и больше хронологического возраста. Следует заметить, что сегодня нет ни одного утвержденного нормативного документа, который позволил бы неоспоримо определить возраст объекта с учетом условий эксплуатации.

В настоящее время существуют программные комплексы, позволяющие посредством параметрического моделирования создавать информационную визуализацию всего здания — 3D-модель, отображающую все его конструктивные элементы с заданной степенью детализации.

Анализ возможностей подобных программ позволяет заметить отсутствие в них процессов старения, износа, разрушения зданий и их элементов. Поэтому назрела необходимость в создании методики, которая бы имела визуализацию деградационных процессов и позволяла путем сравнения обследуемого объекта недвижимости с визуальными образами в виде моделей зданий или отдельных конструктивных элементов с характерными дефектами наиболее точно определить его физический износ. Например, для определения физического износа кирпичного жилого дома особой группы капитальности последовательность действий может быть следующей (рис. 3).

Приведенная последовательность действий применена для здания в целом, однако целесообразнее рассматривать все типы конструктивных элементов по отдельности, используя возможности существующих программ.

Здание разбивается на отдельные элементы (модули). Для каждого модуля определяется степень износа. Поскольку разные модули могут подвергаться различной степени влияния внешних факторов, то их износ может быть неравномерным.

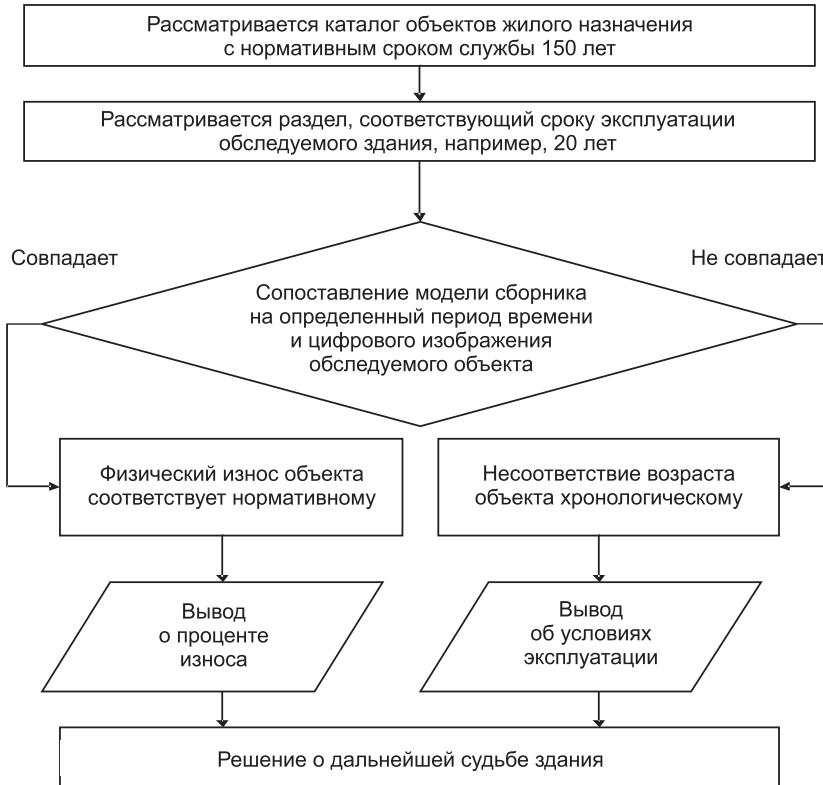


Рис. 3. Последовательность действий при сравнении обследуемого объекта недвижимости с визуальными образами

Исходя из экспертных данных<sup>1</sup>, полученных в результате обработки большого числа объектов, найдены, например, определенные зависимости математических ожиданий плотности трещин на 1 м ширины здания, их длины, глубины от степени износа наружных стен, используемые для процедуры визуализации.

Математическое ожидание длины трещин можно аппроксимировать в первом приближении линейной зависимостью от износа (связанного с рассматриваемым временным промежутком):

$$M(L) = 1,3U, \quad (2)$$

где  $M(L)$  — длина трещины, см;

$U$  — износ рассматриваемого модуля здания, помноженный на 100, %.

Величина математического ожидания длины трещин может служить удобным индикатором фактического износа здания и существенно отличаться от нормативного.

Математическое ожидание плотности расположения вертикальных трещин на 1 м ширины здания может быть описано следующей зависимостью:

$$M(P) = 0,57\sqrt{U}, \quad (3)$$

где  $M(P)$  — плотность расположения вертикальных трещин на 1 м ширины здания, шт.

<sup>1</sup> Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий: Атлас схем и чертежей. Томск: ЦНТИ, 1990. 316 с.

Процессы повреждения наружных стен в глубину происходят по степенной зависимости от износа. Модель, описывающая данные процессы, представим в виде

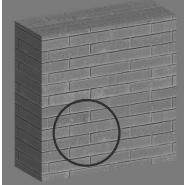
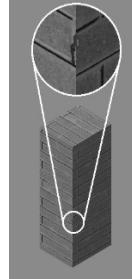
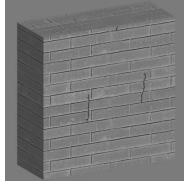
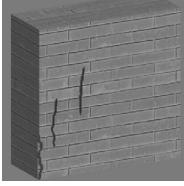
$$M(G) = 0,25 \cdot 10^{-3} U^{1,65}, \quad (4)$$

где  $M(G)$  — математическое ожидание доли глубины повреждения от толщины стены в 38 см.

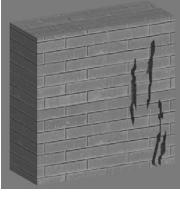
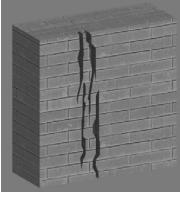
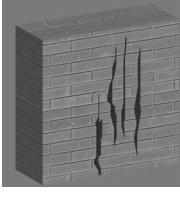
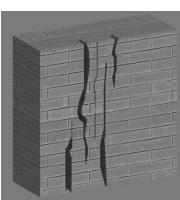
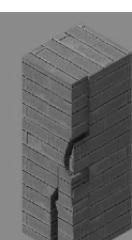
Анализируя последнюю зависимость, можно заметить, что в первую половину срока службы здания рассмотренный дефект нарастает медленно и это не столь критично. Однако во второй половине срока нарастание дефекта происходит лавинообразно и очень важно в этот период тщательно контролировать ситуацию и принимать своевременно меры для повышения несущей способности здания.

Примеры визуализации описанных формул (2)–(4) представлены в таблице.

#### Соотношение дефект-износ-срок эксплуатации для кирпичной стены (380 мм)

3D-модель элемента		Износ, %	$M(L)/M(P)/M(G)$ (мат. ожидание глубины для стены в 38 см) при величине износа, см		Действительный возраст, лет (при нормальных условиях)
лицевая сторона стены (фрагмент 1 × 1 м)	разрез стены по трещине (в увеличенном масштабе)		min	max	
1	2	3	4	5	6
		0–10	0/0/0 (0)	13,0/1,8/ 0,011 (0,42)	0–10
		11–20	14,3/1,9/ 0,013 (0,50)	26,0/2,5/ 0,035 (1,33)	11–20
		21–30	27,3/2,6/ 0,38 (1,44)	39,0/3,1/ 0,68 (2,60)	21–30

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6
		31–40	40,3 / 3 / 0,72 (2,74)	52,0 / 3,6 / 0,11 (4,18)	31–40
		41–50	53,3 / 3,6 / 0,11 (4,35)	65,0 / 4,0 / 0,16 (6,04)	41–50
		51–60	66,3 / 4,1 / 0,16 (6,24)	78,0 / 4,4 / 0,21 (8,16)	51–60
		61–70	79,3 / 4,5 / 0,22 (8,39)	91,0 / 4,8 / 0,28 (10,52)	61–70

При мечания: 1. Математическое ожидание плотности расположения трещин  $M(P)$  не обязательно может иметь целое значение; например,  $M(P) = 1,8$  шт. Это говорит о том, что одна трещина всей своей длиной расположена в рассматриваемом «квадрате» стены, а другая может только начинаться или заканчиваться в нем.

2. Для простоты восприятия и наглядности в статье приведены графические модели, соответствующие серединам диапазона физического износа.

3. При сопоставлении 3D-модели с оцениваемым элементом не должна приниматься во внимание направленность трещин, так как цель исследования — не выявление причин возникновения дефектов, а лишь определение влияния их появления на общее состояние объекта.

Визуализация параметров износа позволит: наиболее точно определять физический износ зданий и сооружений, устанавливать реальный «возраст» объекта с учетом эксплуатации, своевременно выявлять добросовестность эксплуатирующих компаний (собственников, арендаторов)

по отношению к эксплуатируемым объектам и осуществлять необходимые мероприятия в соответствии с выявленной степенью износа здания, а также обеспечивать достоверность информации для покупателей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ВСН 53–86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий [Текст].
2. ВСН 57–88(р). Положения по техническому обследованию жилых зданий [Текст].
3. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [Текст].
4. Грибовский, С.В. Оценка стоимости недвижимости : учеб. пособие [Текст]. — М. : Маросейка, 2009. — 432 с.

*СИМАНКИНА Т.Л., канд. техн. наук, доц.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ШИРКО Н.В., асп.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 28.06.11

**Simankina T.L.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Saint-Peterburg State University of Architecture and Engineering, Russia

**Shirko N.V.**, post-graduate student, Saint-Peterburg State University of Architecture and Engineering, Russia

#### **ESTIMATION OF PHYSICAL DETERIORATION OF BUILDINGS WITH APPLICATION OF VISUAL MODELLING OF DEFECTS**

The article presents the application of visualization of defects in determining the physical deterioration of buildings based on a comparison of the subject property with the visual images in the form of 3D-models using information technology.

**Key words:** visualization, technical deterioration of the building, physical deterioration, processes of degradation, defect, 3D-model, parametrical modeling.

#### REFERENCES

1. VSN 53–86 (р). Appraisal rules of physical deterioration of residential buildings [Text].
2. VSN 57–88 (р). Positions on technical inspection of residential buildings [Text].
3. SP 13-102-2003. Rules of inspection of bearing building designs of buildings and constructions [Text].
4. Gribovskiy, S.V. Valuation of real estate : The manual [Text]. — M. : Maroseyka, 2009. — 432 p.

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.078.2.014

Л.В. ЕНДЖИЕВСКИЙ, А.В. ТАРАСОВ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ПРИ РАЗНЫХ СООТНОШЕНИЯХ ИХ ТОЛЩИН

Проведены экспериментальные и численные исследования многорядных сдвигостойчивых болтовых соединений разных по толщине стальных пластин. Анализ полученных результатов направлен на выявление особенностей напряженно-деформированного состояния и поиск конструктивных решений для повышения несущей способности подобных соединений.

**Ключевые слова:** многорядные болтовые сдвигостойчивые соединения, тонкостенные оцинкованные профили, нахлесточные болтовые соединения.

Рассмотрено многорядное болтовое соединение двух пластин при переменных соотношениях их толщин, например нахлесточное соединение стального оцинкованного листа толщиной до 1,5 мм и стального листа толщиной 4 мм. Такое конструктивное решение применено в узловом соединении, предложенном в [1]. В [2, 3] исследована работа многорядного болтового соединения пластин с одинаковыми или соизмеримыми размерами по толщине. По предположению авторов, разномасштабность толщин конструктивных элементов приведет к изменению работы фрикционного соединения и снижению его несущей способности.

Экспериментальным исследованиям подверглись пять типов образцов нахлесточных многорядных болтовых соединений двух пластин размерами  $400 \times 420 \times t_i$ , мм. Количество образцов каждого типа составило не менее пяти.

#### *Общие исходные данные.*

Болты класса прочности 5.8 выполнены по ГОСТ 7798–70 без цинкового покрытия. Высокопрочные болты класса 8.8 с цинковым покрытием выполнены по DIN 933, соответствующему ГОСТ 7805–70, ISO 4017 (рис. 1, поз. 1); соединения многорядные (4–5 рядов вдоль усилия); стальные пластины-фасонки  $t_1 = 4$  мм,  $R_y = 240$  МПа,  $E = 210$  ГПа (поз. 2); стальной оцинкованный лист  $t_2 = 1,2$  мм,  $R_y = 230$  МПа,  $E = 210$  ГПа (поз. 3). Прочностные характеристики используемой стали в пластинах проверены на соответствие нормативным требованиям. Напряжение болтов в сдвигостойчивых соединениях составляло 11,5 тс, а контроль осуществлялся динамометрическим ключом по моменту закручивания. Обработка болтов и соединяемых при помощи них пластин специальным образом не проводилась, за исключением очистки их щетками от пыли и грязи.

© Енджеевский Л.В., Тарасов А.В., 2011

*Отличительные характеристики.*

Тип 1.  $t_2 = 1,2$  мм, соединение с неконтролируемым натяжением болтов класса прочности 5.8 (5 рядов); шайбы плоские, нормальные.

Тип 2.  $t_2 = 1,2$  мм, соединение с контролируемым натяжением болтов класса прочности 8.8 (5 рядов); шайбы плоские, с уширенным полем.

Тип 3.  $t_2 = 1,2$  мм, соединение с контролируемым натяжением болтов класса прочности 8.8 (5 рядов); шайбы плоские, с уширенным полем; с использованием накладки (рис. 1, поз. 4).

Тип 4.  $t_2 = 1,5$  мм, соединение с контролируемым натяжением болтов класса прочности 8.8 (5 рядов); шайбы плоские, с уширенным полем; с использованием накладки.

Тип 5.  $t_2 = 1,5$  мм, соединение с контролируемым натяжением болтов класса прочности 8.8 (4 ряда); шайбы плоские, с уширенным полем; с использованием накладки.

В образцах 3-, 4- и 5-го типов использованы стальные накладки 4 размерами  $50 \times 250 \times 4$  мм, установленные между шайбами с уширенным полем 5 и оцинкованной стальной пластиной 2. Для соединений с контролируемым натяжением (сдвигостойчивых) применены шайбы с уширенным полем для того, чтобы увеличить площадь передачи усилий от болта к детали. С той же целью применена накладка 4. Предполагается, что такое решение позволит повысить несущую способность данного соединения за счет изменения схемы передачи обжимающих усилий от болтов к соединяемым деталям. В образцах типа 1 и 2 болтовое соединение выполнено без использования накладок. Нумерация болтов, соединяющих детали 2 и 3, принята сверху вниз (1, 2...5).

Свободные края пластин соединены со стальными траверсами 6 толщиной 8 мм. Траверсы предназначены для закрепления образцов в зажимах силовой установки и более равномерного распределения усилий. Для уменьшения влияния эксцентрикитета между соединяемыми пластинами под траверсу оцинкованной пластины установлена дополнительная пластина 7 толщиной 4 мм. В качестве силовой установки использована разрывная машина Instron. При загружении траверс, зафиксированных в зажимах разрывной машины, нагрузка передается к образцу и стремится сдвинуть пластины, соединенные между собой болтами, относительно друг друга.

Для регистрации напряженного состояния многоболтового соединения использовались тензорезисторы типа КФ5П1-10-100-А-12, подключенные к тензометрической системе ММТС-64.01, которая в автоматическом режиме переводит полученные с датчиков данные в напряжения. Тензорезисторы установлены в наиболее характерных местах образов таким образом, чтобы фиксировать напряжения в области каждого болта. Распределение напря-

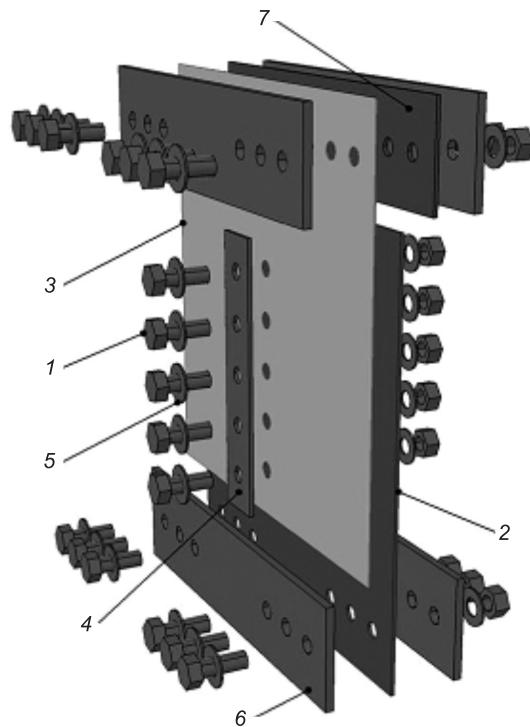
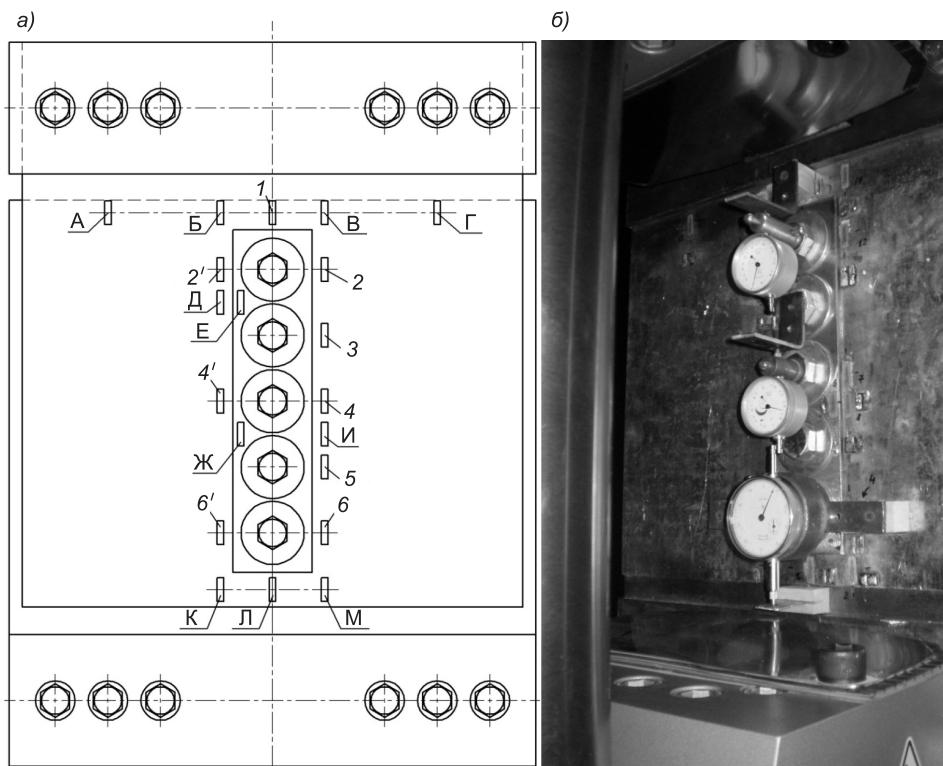


Рис. 1. Принципиальная схема сборки образцов

жений вдоль ряда болтов фиксировали тензорезисторы, установленные с обеих сторон каждого болта. Кроме регистрации напряжений в непосредственной близости от отверстий установлены датчики вдоль траверс для изучения распределения нагрузки, прикладываемой к образцу (рис. 2, а).

Также были установлены индикаторы часового типа точностью 0,01 мм для регистрации величины взаимного сдвига соединенных пластин, изменения расстояния между осями второго и третьего болтов вследствие продольной деформации образца на участке между первым болтом и траверсой, через которую осуществлялось загружение образца (рис. 2, б).



*Рис. 2. Расположение датчиков и приборов на образцах*  
а — принципиальная схема расположения тензорезисторов; б — расстановка индикаторов часового типа

При испытании образцов нагрузка прикладывалась поэтапно с переменным шагом от 500 кг (со скоростью 250 кг/мин) в начале испытания, до 100 кг (со скоростью 50 кг/мин) — в конце. Нагружение образцов выполнялось до значения, соответствующего характерному искривлению пластины толщиной 1,2...1,5 мм в области болтов, с ее последующим разрывом и потерей несущей способности соединения в целом. Показания индикаторов записывались в журнал испытаний после каждого этапа приложения нагрузки. Регистрация данных с тензометрической системы выполнялась в непрерывном режиме.

Целью исследования является изучение особенностей работы, податливости и перехода в запредельное состояние многорядного сдвигогустойчивого соединения листов оцинкованной и неоцинкованной стали, отличающихся по толщине 2,5–3,5 раза, а также определение целесообразности использования стальных накладок, установленных между шайбами и поверхностью оцинкованной стальной пластины.

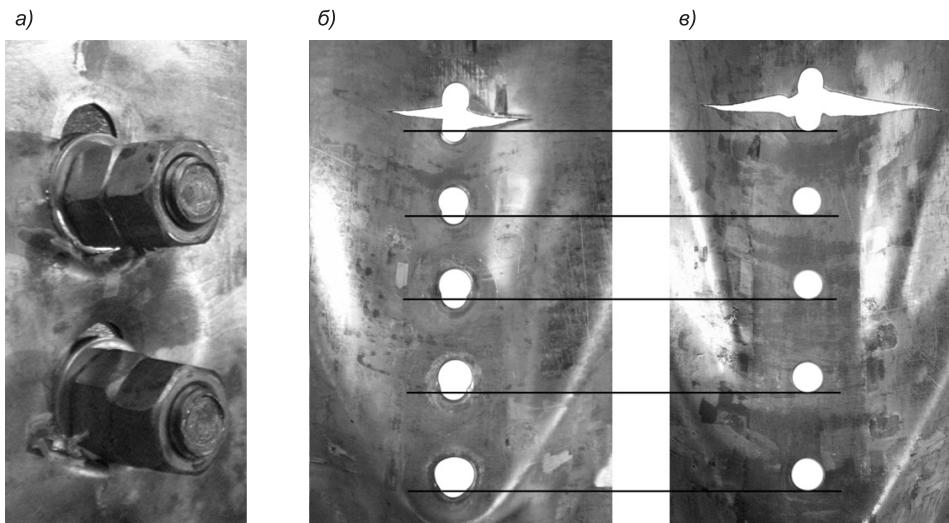


Рис. 3. Фрагменты пластин толщиной 1,2 мм после испытания  
а — образец первого типа; б — образец второго типа; в — образец третьего типа

За предельное состояние принято преодоление сил трения, возникающих по контактным плоскостям соединяемых деталей (при котором происходит взаимный сдвиг элементов и усилия сдвига передаются на торцевые поверхности кромок отверстий многоболтового соединения), либо начало текучести металла образца.

В результате выполненных испытаний установлено, что потеря несущей способности образцов первого типа происходила при нагрузке 4,4 тс и характеризовалась значительным сдвигом пластин относительно друг друга и началом смятия кромок болтовых отверстий пластины толщиной 1,2 мм (рис. 3, а). Дальнейший сдвиг соединения происходил без значительного увеличения нагрузки. Это видно на рис. 4, где приведены зависимости смещения нижней грани тонкой пластины 1 относительно траверсы пластины-фасонки 6 от нагрузки на образец.

При расчете соединения второго типа по [4] расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом с усилием натяжения 11,5 тс и коэффициентом трения соединяемых поверхностей  $\mu = 0,25$ , составляет 2,3 тс. Учитывая п. 11.12 [4], согласно которому распределение продольной силы между болтами следует принимать равномерным, несущая способность всего соединения должна составлять 11,5 тс. В физическом же эксперименте при нагрузке на образцы второго типа 6...7 тс наблюдается смена харак-

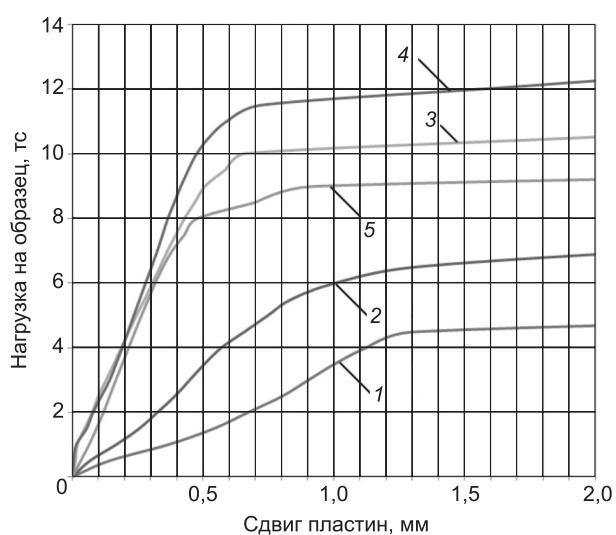


Рис. 4. Зависимость взаимного сдвига пластин от нагрузки на образцы первого—пятого типов

тера роста деформаций тензорезистора, расположенного между первым болтом и траверсой, относительно тензорезистора (рис. 5), который находится напротив первого болта в соединении. Это объясняется тем, что силы трения в области первого болта не могут воспринимать возникающие усилия при нагрузке более 6 тс и в соединении происходит смена характера распределения напряжений между болтами.



Рис. 5. Графики напряжений в образцах второго типа  
1–6 — номера тензорезисторов

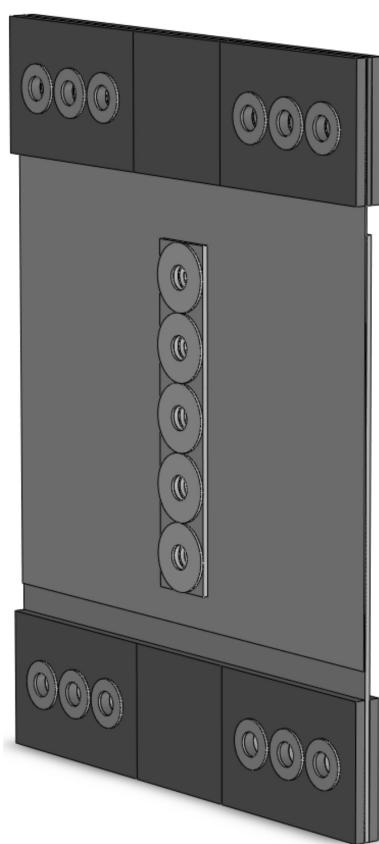


Рис. 6. Модель одного из образцов, созданная в программном комплексе SolidWorks 2010

По показаниям индикаторов зафиксировано, что величина взаимного сдвига пластин при нагрузке на образец, равной 6 тс, составляет 1 мм (см. рис. 4). При увеличении нагрузки на 1 тс (от 6 до 7 тс) пластины сдвигаются относительно друг друга еще на 1,2 мм и общий сдвиг составляет 2,2 мм, что подтверждает вывод, сделанный выше на основании показаний тензорезисторов. Таким образом, это можно считать преодолением сил трения, возникающих по контактным плоскостям соединяемых деталей, и окончанием работы болтового соединения как сдвигогустойчивого. При этом происходит смятие торцевых поверхностей кромок болтовых отверстий (см. рис. 3, б). Разрывы пластины толщиной 1,2 мм происходил при нагрузке 11 тс. Несущая способность образцов второго типа составила 6 тс, что не соответствует расчету по [4].

Данные, полученные в физическом эксперименте, подтверждены численными исследованиями, выполненными с помощью САПР SolidWorks 2010. Модели образцов создавались объемными элементами, геометрические размеры и условия закрепления которых соответствовали физическим образцам (рис. 6). Шаг сетки принят соизмеримым с радиусом болта.

Отличительная особенность расчетной схемы от реальных образцов заключается в использовании виртуальных соединителей, заменяющих крепеж путем симуляции их влияния на модель. Виртуальный соединитель имитирует геометрические и прочностные характеристики болта, а также его предварительное натяжение по осевому усилию или моменту закручивания. Коэффициент закручивания болтов принят равным 0,18<sup>1</sup>.

Использование виртуальных соединителей в отличие от моделирования болтов как отдельных элементов модели позволяет значительно разгрузить расчетную схему, на порядок уменьшить количество конечных элементов и снизить требования к характеристикам ЭВМ, что ускоряет процесс решения задач.

В образцах третьего типа, где использована стальная накладка, установленная между шайбами и листом стали толщиной 1,2 мм, удалось достичь более высоких значений нагрузок, соответствующих потере несущей способности соединения. Из графиков (см. рис. 4) видно, что «срыв» сдвигостойчивого соединения 3-го типа не происходит вплоть до нагрузки на образец, равной 10 тс. При увеличении нагрузки происходит смещение пластин относительно друг друга с последующим разрывом тонкого стального листа в области первого болта. Отметим, что сдвиг и разрушение соединения не сопровождаются смятием торцевых поверхностей болтовых отверстий, что подтверждает визуальный осмотр испытанных образцов (см. рис. 3, в).

Согласно установленным критериям потери несущей способности соединений, образцы третьего типа выходят из строя из-за начала текучести металла напротив первого болтового отверстия при нагрузке 6,5 тс. Таким образом, несущая способность образцов третьего типа ограничена прочностными характеристиками металла тонкого листа и площадью его поперечного сечения.

Для увеличения несущей способности соединения было принято решение увеличить толщину оцинкованного листа стали с 1,2 до 1,5 мм.

Результаты испытаний образцов четвертого типа показали, что увеличение толщины оцинкованного листа 2 на 0,3 мм повысило несущую способность соединения с 6,5 до 7 тс, а разрыв пластины толщиной 1,5 мм происходил при нагрузке 15 тс.

В результате анализа данных, полученных с тензометрической системы, установлено, что значения напряжений в пластине толщиной 1,5 мм напротив последнего болта имеют небольшие значения. Однако физическое исключение этого болта снизило несущую способность соединения пятого типа до 6 тс и повысило податливость приблизительно на 10 %. Разрыв тонкой пластины происходил при нагрузке 11 тс.

По результатам испытаний установлено, что применение сдвигостойчивого соединения во 2-м типе образцов позволяет повысить несущую способность узлов сопряжения элементов из стали толщиной 1,2 и 4 мм на 36 % по сравнению с болтовыми соединениями первого типа, работающими на срез и местное смятие. За счет использования накладок под шайбы болтов в исследованных образцах третьего типа несущая способность сдвигостойчивого болтового соединения увеличивается на

<sup>1</sup> Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). М.: ЦИПП Госстрой СССР, 1989.

16 % и составляет 7 тс, уменьшая его деформативность и податливость относительно образцов первого и второго типа.

В ходе численных исследований в расчетных схемах толщина одной из соединяемых пластин принята постоянной, равной 4 мм. Толщина присоединяемой к ней пластины варьировалась от 1,2 до 4 мм. В ходе расчетов были выполнены исследования 56 различных типов образцов. В число этих исследований входят расчеты образцов с разными условиями преднатяжения болтов и коэффициентами трения поверхностей деталей.

Пластина 2 жестко зафиксирована по нижней грани, что имитирует неподвижный зажим разрывной машины. На пластину 3 в верхней ее части действуют ограничения от смещения в направлении оси, перпендикулярной поверхности детали. Нагрузка на образец направлена вертикально вверх, а ее распределение по ширине верхней грани пластины принято неравномерным исходя из данных физических экспериментов.

Установлено, что напряжения, а также характер их распределения в тонкой и более толстой пластинах значительно различаются. Это объясняется разностью толщин соединяемых деталей. В то время как тонколистовая деталь в наиболее нагруженных областях имеет значения напряжений, близкие к расчетному сопротивлению стали, более толстая пластина (4 мм) оказывается недогруженной и максимальные напряжения в ней не превышают 70 МПа.

Характер распределения напряжений вдоль ряда болтов в данном случае зависит от толщины (разности толщин) соединяемых деталей, их коэффициента трения и предварительного натяжения болта. В классическом понимании нахлесточного многорядного болтового соединения одинаковых по толщине элементов распределение напряжений в пластинах происходит однотипно по отношению к прикладываемой нагрузке (рис. 7). При этом напряжения в обеих пластинах в области среднего болта равны ( $\sigma_3 = \sigma'_3$ ).

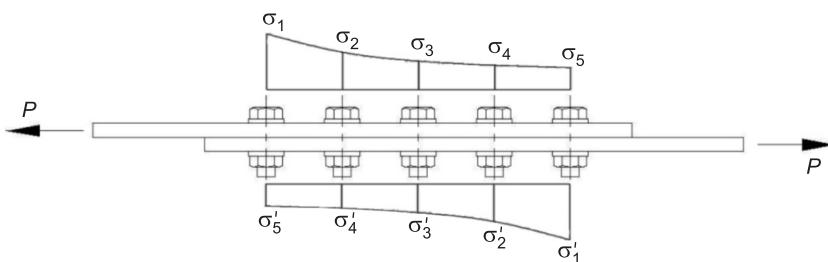


Рис. 7. Распределение напряжений в многорядном соединении, где  $\sigma_1 \dots \sigma_5$  и  $\sigma'_1 \dots \sigma'_5$  — напряжения в пластине в области соответствующего болта

Для сравнения характера распределения напряжений в тонкой пластине и более толстой пластине-фасонке вдоль ряда болтов введем коэффициент  $K_i$ , который характеризует напряжения в области каждого болта:

$$K_i = (\sigma_i / \sum_{n=1}^i \sigma_n) 100 \%,$$

где  $\sigma_i$  — напряжение в рассматриваемой пластине в области  $i$ -го болта.

В данной работе под напряжением в области болта ( $\sigma_i$ ) понимается напряжение в пластине на расстоянии одного диаметра болта от края от-

верстия в направлении, перпендикулярном оси действия нагрузки на образец.

В таблице во всех типах соединений наиболее нагружен первый болт. Необходимо отметить влияние накладки на распределение напряжений между болтами — она позволяет более эффективно включать в работу средние болты и разгрузить тонкую пластину 2. Так, например, в соединении пластин толщинами  $t_1 = 4$  мм и  $t_2 = 1,2$  мм без накладки степень включения в работу деталей в области второго и третьего болтов отличается на 160 % (24,5 и 9,4 %). В аналогичном соединении с использованием накладки напряжения отличаются не более чем на 42,5 % (16 и 22,8 %).

**Значения коэффициента  $K_i$  при  $t_1 = 4$  мм,  $t_2 = 3$  мм, %**

№ болта	Пластина		Пластина		Пластина		Пластина	
	3	2	3	2	3	2	3	2

*Образец без накладки*

1	38,2	4,9	33,5	2,3	30,6	3,1	30,2	2,8
2	24,5	9,4	26,5	12,6	28,9	12,7	29,9	13,1
3	18,1	20,1	20,3	20,7	22	21,4	23,2	22
4	13,2	28,6	14,3	29,4	14,5	29,4	14,4	28,4
5	5,9	37	5,4	34,9	4,1	33,5	2,3	33,8

*Образец с накладкой*

1	44,7	5,5	40,2	5,5	37,8	5,6	33	7,5
2	21,7	17	23,1	16	22,6	15,1	23,8	22,4
3	16	22,8	17,9	22,8	17,1	22,7	20,7	31,8
4	12	28,2	13	27,1	15,6	26,5	13,2	39,6
5	5,6	26,6	5,7	28,5	6,9	30,1	4,4	39,3

Установлено, что чем больше разность толщин соединяемых элементов, тем сильнее отличается характер распределения напряжений в пластинах вдоль болтов. Область, в которой разница напряжений в обеих пластинах близка к нулю, смешена от геометрического центра соединения в отличие от частного случая, приведенного на рис. 7. В образцах с применением накладки при  $t_2 \leq 2$  мм это выражено в гораздо меньшей степени. При уменьшении разности толщин соединяемых деталей напряжения в пластинах приближаются к симметричному виду.

Немаловажно то, что в соединениях с накладкой снижение напряжений в тонкой пластине 2 со стороны наиболее нагруженной области сопровождается повышением напряжений в толстой пластине 3 со стороны наименее нагруженной области. Это приводит к более рациональному использованию многорядного соединения.

В сдвигостойчивом соединении толщины соединяемых элементов имеют особое значение. Тонколистовая сталь под действием внешних нагрузок более подвержена депланации, что оказывает существенное влияние на несущую способность сдвигостойчивого соединения. Локальные, даже незначительные искривления плоскости соприкосновения деталей вблизи болтов приводят к уменьшению площади контакта. В данных условиях накладка, установленная на поверхности тонколистовой детали

под шайбами болтов, сдерживает депланацию и способствует сохранению площади контакта при внешних воздействиях на соединение. Подтверждение этому можно найти не только в результатах физического эксперимента, которые показали, что применение накладки повышает сдвигостойчивость и несущую способность соединения, но и в численных испытаниях.

**Выводы.** 1. На основании физических экспериментов несущая способность многорядных соединений составила: для образцов первого типа — 4,4 тс; второго — 6 тс; третьего — 6,5 тс; четвертого — 7 тс; пятого — 6 тс.

2. Экспериментально и численно подтверждено, что применение стальной накладки, установленной под шайбами на поверхности тонкой стальной пластины, повышает сдвигостойчивость и несущую способность многорядного болтового соединения.

3. Разница толщин соединяемых пластин изменяет как в качественном, так и в количественном отношении распределение усилий между болтами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Енджиевский, Л.В. О совершенствовании строительных конструкций с применением холодногнутых профилей из тонколистовой оцинкованной стали в элементах каркаса здания [Текст] / Л.В. Енджиевский, А.В. Тарасов // Сб. тр. III Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 80-летию НГАСУ (Сибстрин). — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. — С. 79–86.
2. Коротких, А.В. Особенности работы одноболтовых и многоболтовых фрикционных сдвигостойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Там же. — С. 66–73.
3. Боровская, Я.С. Распределение усилий по крепежным элементам металлокомпозиционных соединений [Текст] / Я.С. Боровская, В.И. Гришин, С.М. Наумов // Тр. ЦАГИ. — Вып. 2669 : Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений : сб. ст. к 100-летию со дня рождения проф. С.П. Стрелкова. — М., 2005. — С. 190–198.
4. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст] : введ. в действие 01.01.1982. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 126 с.

ЕНДЖИЕВСКИЙ Л.В., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН; E-mail: end-lev@yandex.ru

Инженерно-строительный институт СФУ, г. Красноярск

ТАРАСОВ А.В., асп.; E-mail: al.vl.tarasov@gmail.com

Инженерно-строительный институт СФУ, г. Красноярск

Получено после доработки 22.07.11

**Endzhievsky L.V.**, doctor of technical sciences, corresponding member of RAACS; E-mail: end-lev@yandex.ru, Institute of Engineering and Building of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Tarasov A.V.**, post-graduate student; E-mail: al.vl.tarasov@gmail.com, Institute of Engineering and Building of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

#### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCHES BOLTED ASSEMBLY OF STEEL PLATES AT DIFFERENT PARITIES OF THEIR THICKNESS

Experimental and numerical researches of multiple-strand frictional bolt assemblies of steel plates different in the thickness. The analysis of the received results is directed on

revealing of features of deflected mode and search of constructive decisions for increase of bearing ability of the similar construction units.

**Key words:** multiple-strand frictional bolt assembly, the thin-walled zinced profiles, lap-bolted joint.

#### REFERENCES

1. Endzhievsky, L.V. About perfection of building constructions with application cold-formed profiles of thin-walled zinced steel in elements of building frame [Text] / L.V. Endzhievsky, A.V. Tarasov // The collection of works of III All-Russia scientific and technical conf. devoted to 80 anniversary NSUACE (Sibstrin). — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2010. — P. 79–86.
  2. Korotkih, A.V. Features of work one bolt and multiple-strand bolt friction joints of the thin-walled zinced profiles [Text] / A.V. Korotkih, A.N. Kretinin, I.I. Krylov // Ibit. — P. 66–73.
  3. Borovskaja, Ya.S. Distribution of efforts on fixing composite metal elements connections [Text] / Ya.S. Borovskaja, V.I. Grishin, S.M. Naymov // Works of the Central Aerohydrodynamic Institute, edition 2669 : Durability, oscillations and a resource of aviation designs and constructions: The collection of articles to the 100 anniversary from the date of a birth of professor S.P. Strelkova. — M., 2005. — P. 190–198.
  4. Construction rules and regulations II-23-81\*. Steel constructions [Text] : Operates since 01.01.1982. — M. : State Building of USSR, 1990. — 126 p.
-

УДК 624.131.4

С.Н. ЛАВРОВ, Л.В. НУЖДИН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДИЛАТОМЕТРОМ РД-100  
С ТРАДИЦИОННЫМИ СПОСОБАМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ

Изложены результаты сопоставительных испытаний по определению модуля деформации дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром с традиционными способами испытаний: штампами, лопастными прессиометрами и в компрессионных приборах. Отмечены хорошая сходимость получаемых результатов и целесообразность применения расклинивающих дилатометров для полевого определения модуля деформации в массиве дисперсных грунтов.

Ключевые слова: дисперсные грунты, модуль деформации грунтов, расклинивающий дилатометр, статистический анализ.

Наиболее доступны и широко распространены в практике инженерно-геотехнических изысканий лабораторные методы испытаний. Однако при опробовании дисперсных и особенно так называемых «слабых» грунтов, обладающих высокой чувствительностью и изменчивостью свойств, возникают большие трудности. Существующие способы отбора образцов грунта не позволяют гарантировать сохранность их природного состояния и структуры, что особенно важно для исследования прочностных и деформационных свойств. Обеспечить минимальное нарушение естественного состояния грунтового массива можно только при помощи полевых методов исследований, которые существенно повышают достоверность и качество получаемых результатов.

Тем не менее существующие традиционные способы оценки сжимаемости дисперсных грунтов в полевых условиях во многом не отвечают требованиям современного строительного комплекса, имеют ограниченную область применения, сложны и трудоемки в использовании либо недостаточно надежны в эксплуатации. Поэтому наряду с работами по совершенствованию и стандартизации существующих методов и оборудования весьма актуальна проблема создания, обоснования и внедрения принципиально новых, экономичных и надежных способов и технических средств полевого определения модуля деформации грунтов, которые позволяют быстро получать достоверную и качественную информацию о грунтовом массиве.

Одно из перспективных направлений дальнейшего развития полевых методов исследований грунтов — разработка приборов релаксационного типа. Авторским коллективом треста «ЗапСибТИСИЗ» предложено устройство для определения модуля деформации дисперсных грунтов в полевых условиях — расклинивающий дилатометр РД-100 (рис. 1) [1–3]. Прибор позволяет реализовать на практике метод релаксации напряже-

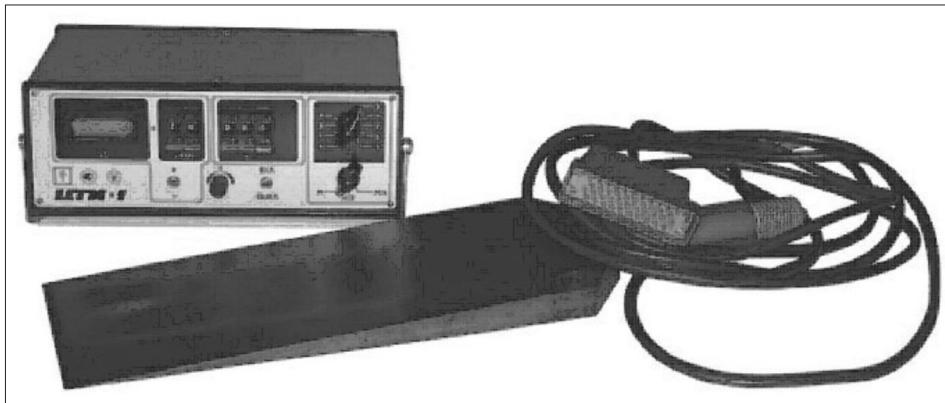


Рис. 1. Расклинивающий дилатометр РД-100

ний (метод контролируемых перемещений), когда исследуемый грунт деформируется заданными ступенями перемещений, а возникающие при этом напряжения фиксируются как независимая от исследователя величина.

Для создания контролируемых перемещений грунта используется индентор клиновидной формы. При его погружении в грунт происходит плавное деформирование окружающего грунта на известные величины, а напряжения, соответствующие этим деформациям, измеряются находящимся в корпусе индентора датчиком давления. По результатам выполненных численных расчетов и экспериментальных исследований<sup>1-3</sup> были установлены конструктивные параметры клиновидного индентора: ширина  $b = 100$  мм, высота  $h = 400$  мм, угол раскрытия рабочих граней  $\alpha = \pm 2^\circ$ . Для измерения контактных давлений, возникающих в грунте при внедрении индентора в его тело по центру одной из рабочих граней встроен датчик с чувствительной мембраной толщиной  $\delta = 1,0$  мм.

Принятые геометрические размеры клиновидного индентора обеспечивают линейное деформирование окружающего грунта на большей части рабочих граней индентора, а напряжения, измеряемые датчиком давления, интерпретируются в рамках линейно-деформируемой модели. Для вычисления дилатометрического модуля деформации грунтов используется модифицированная формула Шлейхера, которая учитывает реальные размеры датчика давления, расположенного в средней зоне рабочей грани индентора:

<sup>1</sup> Писаненко В.П. К вопросу о напряженном состоянии грунтового массива вокруг клиновидного и конического инденторов [Текст] / В.П. Писаненко, А.М. Карапулов, С.Н. Лавров // Инженерно-геологические условия, основания и фундаменты транспортных сооружений в Сибири: межвуз. сб. науч. тр. — Новосибирск : НИИЖТ, 1991. — С. 35–43.

<sup>2</sup> Лавров С.Н. Решение пространственной задачи об упругопластичном деформировании грунта при внедрении клиновидного индентора [Текст] / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, А.М. Карапулов, В.П. Писаненко // Механіка ґрунів та фундаменто-будування: збірник наукових праць. — Київ : НДІБК, 2000. — Вип. 53, кн. 1. — С. 163–168.

<sup>3</sup> Лавров С.Н. Упругое решение пространственной задачи о напряженно-деформированном состоянии грунта при внедрении клиновидного дилатометра [Текст] / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, А.М. Карапулов, В.П. Писаненко // Геотехника: наука и практика : сб. науч. тр. — СПб. : СПбГАСУ, 2000. — С. 138–143.

$$E = \frac{\pi(1-\nu^2)\omega dq_\alpha}{2S_\alpha \arcsin \frac{d}{b}}, \quad (1)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;

$\omega$  — коэффициент, учитывающий жесткость и форму рабочих граней индентора;

$d$  — ширина чувствительной мембраны датчика давления;

$q_\alpha$  — контактное давление по показаниям датчика давления;

$S_\alpha$  — перемещение грунта по центру датчика давления;

$b$  — ширина рабочей грани индентора.

Для исследования сжимаемости дисперсных грунтов дилатометр вдавливается с постоянной скоростью в грунтовый массив без предварительного бурения скважины и через определенные интервалы погружения (например, через 5, 10 или 20 см) с помощью регистрирующей аппаратуры фиксируются значения модуля деформации грунтов.

Расклинивающий дилатометр РД-100 имеет простую конструкцию и достаточно технологичен в эксплуатации. Отсутствие подвижных частей придает устройству высокую эксплуатационную надежность, а технологический процесс, ориентированный только на статическое вдавливание клиновидного индентора, позволяет использовать стандартное оборудование, применяемое для инженерно-геотехнических изысканий. Конструкция дилатометра позволяет использовать его для оценки и других механических свойств грунтов. В частности, в настоящее время идет доработка конструкции дилатометра и проводятся его полевые испытания по определению модуля динамических деформаций (модуля упругости) грунта<sup>4, 5</sup>.

Для оценки точности дилатометрического метода определения модуля деформации грунтов выполнены широкие сопоставительные испытания с традиционными способами исследования сжимаемости грунтов. Работы по сопоставлению проходили в два этапа. На первом этапе проводился точечный статистический анализ частных значений, для чего эксперименты выполнялись на опытных полигонах, где в пределах одного слоя проводились параллельные исследования сжимаемости грунтов различными методами. В последующем, по мере проведения сопоставительных экспериментов на отдельных производственных площадках, выполнялось накопление сравнительных данных для более доказательного двухмерного статистического анализа.

Для проведения экспериментов было выбрано два опытных полигонов. Выбор площадок определялся генетическим разнообразием грунтов, их относительной однородностью и контрастностью разновидностей в пределах класса дисперсных грунтов. На полигонах выполнялось бурение технических скважин с отбором проб грунта ненарушенного сложения (монолитов) в объеме, достаточном для получения представительной выборки по расчленению разреза и назначению нормативных и расчетных характеристик грунтов. По отобранным монолитам в лаборатории были определены физико-механические характеристики грунтов, которые ис-

<sup>4</sup> Нуждин Л.В. Численный анализ напряженного состояния грунта при колебаниях индентора для обоснования конструкции динамического расклинивающего дилатометра [Текст] / Л.В. Нуждин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 20–28.

<sup>5</sup> Nuzhdin L.V. Testing of the weak and non-cohesive soil deformation properties in-situ [Text] / L.V. Nuzhdin, M.L. Nuzhdin // Environmental Geotechnics: Proc. of 6ICEG. — V. 2. — New Delhi: Tata McGraw Hill, 2010. — P. 1568–1573.

пользовались для описания инженерно-геологических условий опытных полигонов.

Полигон № 1 расположен в г. Новосибирске в пределах поймы р. Оби. В его геологическом строении принимают участие верхнечетвертичные аллювиальные отложения р. Оби ( $a Q_{IV}$ ), представленные песками и супесями. Аллювиальные отложения залегают на палеозойских гранитах ( $P_Z$ ). На поверхности имеется почвенно-растительный слой. Грунтовые воды находятся на глубине 5,0 м. Экспериментальные исследования проводились в песках пылеватых неоднородных средней плотности и малой степени водонасыщения (слой 2), залегающих с поверхности или сразу под почвенно-растительным слоем на глубине до 4,1 м.

Полигон № 2 находится на станции Мочище Новосибирского района. В геоморфологическом отношении он расположен в пределах Приобского плато. В геологическом строении принимают участие верхнечетвертичные эолово-делювиальные отложения краснодубровской свиты ( $vd II kd$ ), представленные суглинками и супесями. На поверхности отмечается почвенно-растительный слой. Грунтовые воды залегают на глубине 6,5 м. Экспериментальные исследования проводились в суглинке средней степени водонасыщения полутвердом непросадочном (слой 3), залегающем с глубины 2,5 м мощностью 3,5 м.

По каждому инженерно-геологическому слою, в пределах которого выполнялись опыты, определялись значения модуля деформации непосредственно в полевых условиях с помощью штампа, лопастного прессиометра и расклинивающего дилатометра, а также в лабораторных условиях на компрессионных приборах. Полевые исследования выполнялись на расстоянии, не превышающем 5 м от технической скважины. Сопоставимые опыты проводились в непосредственной близости (не более 2 м) друг от друга, что позволяет отнести их к одинаковым условиям. При выполнении работ анизотропные свойства грунтов не исследовались, в связи с чем корректирующие поправки на деформационную анизотропию в расчетах модуля деформации не применялись.

Испытание грунтов расклинивающим дилатометром РД-100 производилось в соответствии с рекомендациями [4]. Для обработки опытных данных использовалась модифицированная формула Шлейхера (1) без применения каких-либо корректирующих коэффициентов. На опытном полигоне № 1 исследование пылеватых песков было выполнено в двух точках, в интервале глубин 2,0...4,0 м. На полигоне № 2 исследование полутвердых суглинков выполнялось в трех точках, в интервале глубин 2,6...6,0 м.

Испытание грунтов штампом производилось в соответствии с требованиями ГОСТ 20276-99. Для сопоставительных испытаний использовался плоский круглый штамп площадью 600 см<sup>2</sup>. Опыты выполнялись в специально пробуренных скважинах диаметром 325 мм. В пределах исследуемых грунтов было выполнено по шесть испытаний штампом (на глубинах 1,8...4,0 м на полигоне № 1 и на глубинах 3,2...5,8 м на полигоне № 2). В качестве упора и регистратора информации использовалась канатно-рычажная установка КРУ-600 в комплекте с измерительными приборами ИЧ-50 и набором тарированных грузов.

Испытания грунтов выполнялись с использованием механического лопастного прессиометра ЛПМ-15. Погружение его в грунт осуществлялось в предварительно пробуренные скважины диаметром 108 мм. На каждом полигоне выполнено по шесть опытов, равномерно распределенных по глубине исследуемого слоя. При обработке результатов испытаний учитывались поправки, полученные в результате калибровочных

процедур. Несмотря на высокую неоднородность песков, имевших слоистую структуру, значения модуля деформации по лопастному прессиометру изменяются в довольно узких пределах, что указывает на высокую сглаживающую способность лопастной прессиометрии.

Для лабораторного исследования сжимаемости грунтов на опытном полигоне № 1 была пройдена дудка диаметром 900 мм, из которой на намеченных глубинах вручную в жесткие обоймы отбирались пять образцов пылеватого песка ненарушенного сложения. На полигоне № 2 при помощи тонкостенного задавливаемого грунтоноса ГЗТ-1 было отобрано 8 монолитов из скважины диаметром 168 мм. Испытания грунтов выполнялись на компрессионных приборах КПр-1 в соответствии с требованиями ГОСТ 12248–96. Для расчета модуля деформации грунтов по результатам компрессионных испытаний использовались теоретические значения коэффициента  $\beta$ , учитывающего невозможность бокового расширения образца грунта в одометре, который принимался для пылеватых песков полигона № 1 равным 0,74, а для полутвердых суглинков полигона № 2 – 0,62. Расчет модуля деформации производился в интервале нагрузок 0,1...0,2 МПа.

Следует отметить, что значения модуля деформации, полученные по результатам компрессионных испытаний пылеватых песков на полигоне № 1 ( $E = 3,3 \dots 12,4$  МПа), не характерны для слабосжимаемых грунтов. Это еще раз доказывает, что, несмотря на тщательность и осторожность отбора, транспортировки и подготовки образцов грунта, природная структура песков все же частично нарушается и лабораторные испытания не должны применяться для оценки их механических свойств. В этой связи результаты лабораторных исследований пылеватых песков полигона № 1 были исключены из рассмотрения при дальнейшем сопоставлении данных.

Статистический анализ частных значений модуля деформации грунтов, полученных различными способами в пределах каждого инженерно-геологического слоя, выполнялся в соответствии с требованиями ГОСТ 20522–96. Результаты сопоставительных испытаний, выполненных на опытных полигонах № 1 и № 2, и показатели их изменчивости при статистической обработке приведены в таблице.

#### Результаты статистической обработки данных по опытным полигонам

Наименование грунта	Статистический показатель	Модуль деформации $E$ , МПа			
		РД-100	Штамп	ЛПМ-15	КПр-1
Песок пылеватый Полигон № 1	$E_{\min}$	14,2	15,8	16,5	3,3
	$E_{\max}$	34,2	27,6	21,4	12,4
	$\bar{E}$	24,1	23,0	18,3	—
	$\sigma$	$\pm 5,3$	$\pm 4,3$	$\pm 1,6$	—
	$v$	0,22	0,19	0,09	—
	$n$	20	5	6	6
Суглинок полутвердый Полигон № 2	$E_{\min}$	5,0	7,0	4,9	4,3
	$E_{\max}$	10,0	12,0	6,9	7,6
	$\bar{E}$	7,2	8,7	6,2	5,8
	$\sigma$	$\pm 0,84$	$\pm 1,7$	$\pm 0,79$	$\pm 1,34$
	$v$	0,12	0,20	0,13	0,23
	$n$	52	6	6	8

Полученные для конкретных инженерно-геологических условий полигонов № 1 и № 2 результаты хорошо согласуются между собой, что позволяет перейти к установлению корреляционных связей между значениями модуля деформации, определенными различными методами. Для построения уравнений регрессии и выявления связи между результатами дилатометрического и традиционных методов определения модуля деформации грунтов кроме информации по опытным полигонам были также использованы дополнительные сведения, полученные на производственных объектах ОАО «Стройизыскания», ООО «Новосибирский инженерный центр», треста «ОрелТИСИЗ», ФГУП Красноярский «ВНИПИЭТ» и др.

Статистический анализ результатов выполнялся в два этапа. На первом этапе проводился статистический анализ частных значений, полученных различными способами в пределах выделенного инженерно-геологического элемента. Средняя послойная величина модуля деформации грунтов в случае соответствия параметров изменчивости требованиям ГОСТ 20522–96 использовалась при последующем статистическом анализе. На втором этапе для установления достоверности и тесноты взаимосвязи сравниваемых величин выполнялся двухмерный статистический анализ. Средние послойные значения модуля деформации, определенные по данным дилатометрических испытаний, сопоставлялись с аналогичными параметрами, полученными одним из традиционных методов исследований. Результаты статистического анализа определялись аналитическим уравнением регрессии и коэффициентом корреляции  $r$ . При сопоставлении результатов исследований каких-либо ограничений в отношении однообразия грунтовых условий не делалось. Достаточно сказать, что в сопоставительные выборки вошли даже техногенные грунты, представленные тонкодисперсными золами.

Всего к сопоставлению было привлечено следующее количество частных значений модуля деформации грунтов:

- штампом — 161 натурный эксперимент;
- лопастным прессиометром — 118 полевых испытаний;
- компрессионным прибором — 200 лабораторных определений;
- расклинивающим дилатометром — 1834 полевых определений.

Основной объем штамповых испытаний выполнялся в скважинах с помощью круглых плоских абсолютно жестких штампов площадью 600 см<sup>2</sup>. Часть опытов (20 экспериментов) была выполнена в шурфах с использованием круглых штампов площадью 2500 см<sup>2</sup>. При статистической обработке результатов рассматривались различные уравнения регрессии, включающие показательную, экспоненциальную, гиперболическую, логарифмическую и параболическую функции. Наиболее тесную и оправданную связь между дилатометрическими  $E_{\text{рд}}$  и штамповыми  $E_{\text{шт}}$  значениями модуля деформации показала линейная регрессия с коэффициентом корреляции  $r = 0,95$ :

$$E_{\text{рд}} = 0,886 E_{\text{шт}} + 1,28 \text{ [МПа].} \quad (2)$$

Результаты сопоставления и статистической обработки значений модуля деформации в виде линейной регрессии, связывающей дилатометрические и штамповые данные, показаны в графической форме на рис. 2, а.

Поведение грунта при применении лопастных прессиометров конструкции профессора Л.С. Амаряна наиболее близко соответствует

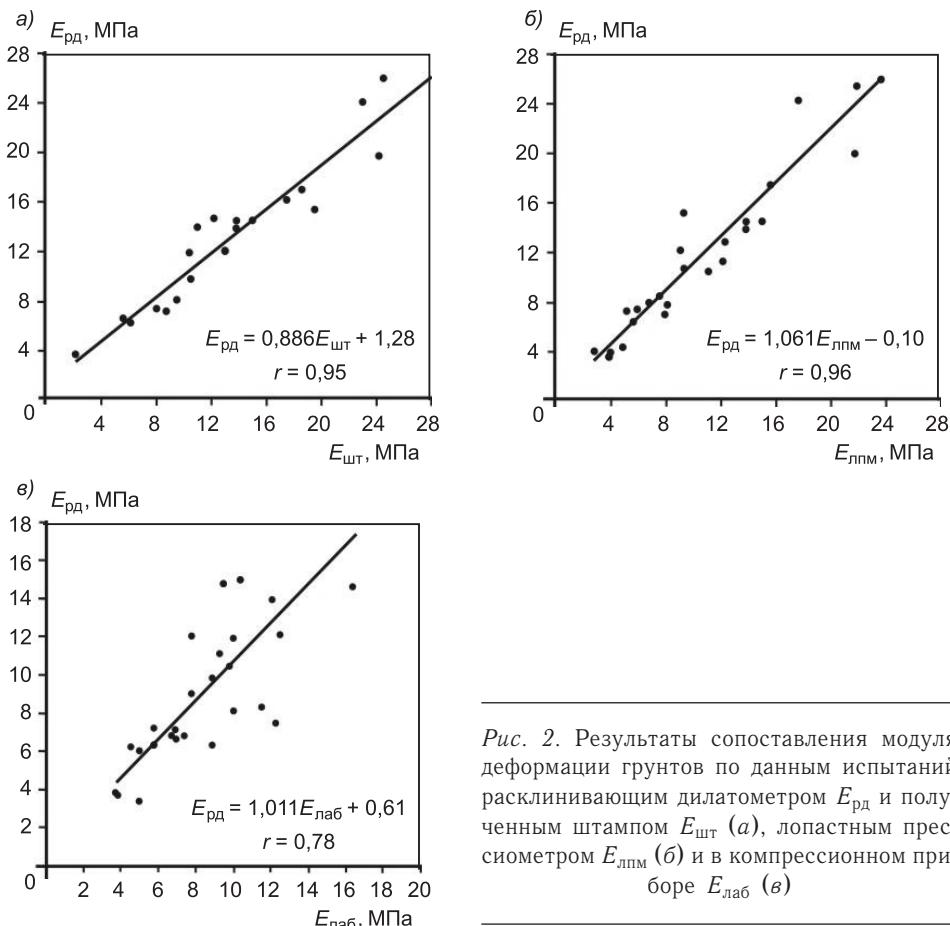


Рис. 2. Результаты сопоставления модуля деформации грунтов по данным испытаний расклинивающим дилатометром  $E_{\text{pd}}$  и полученным штампом  $E_{\text{шт}}$  (а), лопастным прессиометром  $E_{\text{лпм}}$  (б) и в компрессионном приборе  $E_{\text{лаб}}$  (в)

условиям работы индентора расклинивающего дилатометра. Сопоставление с лопастными прессиометрами позволяет в наиболее чистом виде определить основное отличие испытаний дилатометром от других методов, связанное с релаксационным характером его работы. Обработка результатов прессиометрических испытаний по ГОСТ 20276–99 производилась без учета корректирующего коэффициента  $K_1$ . При статистической обработке материалов сопоставления тоже были рассмотрены различные уравнения регрессии. Лучшая связь, как и при сравнении со штампами, описывается линейной регрессией с коэффициентом корреляции  $r = 0,96$ :

$$E_{\text{pd}} = 1,061E_{\text{лпм}} - 0,10 \text{ [МПа].} \quad (3)$$

Результаты сопоставления в графическом виде приведены на рис. 2, б.

Лабораторные испытания грунтов на сжимаемость в стандартных одометрах компрессионного прибора КПр-1 по монолитам природного сложения выполнялись преимущественно в грунтах с достаточно высокой структурной прочностью, позволяющей отбирать пробы с ненарушенным природным сложением и влажностью. Порядок обработки результатов измерений соответствовал ГОСТ 12248–96. Выполненные расчеты по подбору статистически оптимальной корреляционной зависимости между дилатометрическими  $E_{\text{pd}}$  и лабораторными  $E_{\text{лаб}}$  значениями модуля

деформации тоже привели к линейной регрессии с коэффициентом корреляции  $r = 0,78$ :

$$E_{\text{рд}} = 1,011 E_{\text{лаб}} + 0,61 \text{ [МПа].} \quad (4)$$

В графическом виде результаты сравнения представлены на рис. 2, в.

Анализ материалов сопоставления подтверждает тесную связь результатов дилатометрических испытаний и полевых методов исследования грунтов штампами ( $r = 0,95$ ) и лопастными прессиометрами ( $r = 0,96$ ). Имеющиеся расхождения с данными компрессионных испытаний ( $r = 0,78$ ) дополнительно свидетельствуют о нарушении структуры грунтов, происходящем в процессе опробования и подготовки образцов к лабораторным испытаниям. По результатам сравнения дилатометрических и прессиометрических испытаний сделан вывод о необходимости введения корректирующего коэффициента в расчетную формулу (1) для определения модуля деформации по результатам испытания грунтов расклинивающим дилатометром в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20276–99.

Проведенные сопоставительные исследования широкой номенклатуры дисперсных грунтов позволяют рекомендовать использование метода расклинивающей дилатометрии для прямого определения модуля деформации грунтов в полевых условиях при проведении инженерно-геотехнических изысканий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 1758158 (СССР), МКИ Е 02 D 1/00. Прессиометр [Текст] / В.П. Писаненко, С.Н. Лавров : Опубл. 30.08.92; Бюл. № 32.
2. Л а в р о в, С.Н. Опыт применения расклинивающей дилатометрии для исследования деформационных свойств грунтов [Текст] / С.Н. Лавров, В.П. Писаненко // Геотехника-99 : сб. мат. междунар. научно-практ. конф. — Пенза, 1999. — С. 91–94.
3. П и с а н е н к о, В.П. Полевые испытания деформационных свойств грунтов методом контролируемых перемещений [Текст] / В.П. Писаненко, С.Н. Лавров // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1990. — № 5. — С. 130–133.
4. Рекомендации по определению деформационных свойств грунтов расклинивающим дилатометром РД-100 [Текст] / ПНИИСИС. ЗапСиБТИСИЗ. — М. : ПНИИСИС, 1991. — 31 с.

ЛАВРОВ С.Н., доц.; E-mail: lavrovsn@list.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

НУЖДИН Л.В., канд. техн. наук, проф.; E-mail: nuzhdin-ML@rambler.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 27.07.11

**Lavrov S.N.**, assistant professor; E-mail: lavrovsn@list.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Nuzhdin L.V.**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: nuzhdin-ML@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### COMPARATIVE ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS USING A RD-100 DILATOMETER AND TRADITIONAL METHODS TO DEFINE SOILS DEFORMATION MODULUS

Describes the results of comparative tests aimed to determine the soils deformation modulus of disperse soils using a wedge-shaped dilatometer and traditional test methods using test plates, paddle-type pressure meters and compression devices. It established good correlation of the obtained results and practicability of wedging dilatometers used to determine soils deformation modulus in disperse soil body in the field conditions.

**Key words:** disperse soils, soils deformation modulus, wedging dilatometer, statistical analysis.

#### REFERENCES

1. A.s. 1758158 USSR, MKI E 02 D 1/00. Pressiometer [Text] / V.P. Pisanenko, S.N. Lavrov : Publ. 30.08.1992 ; Bul. N 32.
  2. L a v r o v, S.N. Experience in application of wedging dilatometry to study soil deformation properties [Text] / S.N. Lavrov, V.P. Pisanenko // Geotechnics-99 : Digest of the Materials of Intern. Academic and Research Conf. — Penza, 1999. — P. 91–94.
  3. P i s a n e n k o, V.P. Field Tests of Soils Deformation Properties Using Controlled Displacement Method [Text] / V.P. Pisanenko, S.N. Lavrov // News of High Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1990. — N 5. — P. 130–133.
  4. Recommendations on Soils Deformation Properties Determination Using a RD-100 Wedging Dilatometer [Text] / PNIIIS, ZapSibTISIZ. — M. : PNIIIS, 1991. — 31 p.
-

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
  - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. 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") или диске 3,5". Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Стг 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, инициалы, 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 иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

**6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.**

**7. Формулы следуют набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. *Русские и греческие буквы* и индексы, а также *цифры*, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются *прямым шрифтом*. *Латинские буквы* набирать *курсивом*. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).**

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2011 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)

**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 2-е полугодие 2011 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 — 1260 р.

Цена отдельного номера — 210 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами  
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 7 (631) 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*