

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 7 (655)**  
Июль 2013 г.

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

*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. Правдивец, В.Г. Себешев, 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 22.07.13. Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3761.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Гребенюк Г.И., Гаврилов А.А., Яньков Е.В.** Расчет и оптимизация неразрезной балки тонкостенного профиля ..... 3

**Мищенко А.В.** Особенности упругопластического деформирования однородных и слоистых рационально профилированных балок при запроектных воздействиях. Сообщение 1 .... 12

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Бузулуков В.И., Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Сыркина Н.П., Гарцева С.О.** Белковый пенообразователь для пенобетонов ..... 23

**Абдрахимов В.З., Колпаков А.В.** Экологические, теоретические и практические аспекты использования кальцийсодержащих отходов в производстве керамических материалов .... 28

**Никонов А.С., Панов Ю.Т.** Эксплуатационные свойства теплоизоляционного материала на основе отходов стекольной промышленности ..... 37

**ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**  
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

<b>Герасимов В.В., Коробова О.А., Левченко А.В., Бабакова А.В.</b> Онтологический подход в инжиниринге организационной безопасности строительного производства .....	41
<b>ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	
<b>Дегтярев-мл. В.В., Ершова Е.Е.</b> Исследование влияния положения цилиндров на дне канала с неразмываемым дном на поле скорости потока .....	48
<b>Дзюбенко Л.Ф., Сухно А.М.</b> Особенности формирования фильтрационного режима хвостохранилища на мерзлом трещиноватом основании .....	52
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Скуднева М.В.</b> Особенности развития абхазского жилища в конце XVIII — начале XX в. ....	59
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Гныря А.И., Титов М.М., Кузнецов С.М.</b> Моделирование надежности поворотного бункера для электроразогрева бетонных смесей .....	65
<b>Завалишин С.И., Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г.</b> Математические проблемы восстановления векторов перемещений по данным динамических обследований .....	72
<b>Логанина В.И., Круглова А.Н., Давыдова О.А.</b> Оценка достоверности контроля строительных материалов и изделий с учетом стабильности технологического процесса производства .....	77
<b>Шафрай К.А., Шафрай С.Д.</b> Особенности работы фланцевых соединений архитектурно-строительных конструкций. Внецентренное растяжение болтов .....	84
<b>Калугин Ю.Б.</b> Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс .....	93
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С.</b> Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии	103
<b>НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ</b>	
Новые подходы к расчету железобетонных конструкций .....	110

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.072.2

Г.И. ГРЕБЕНЮК, А.А. ГАВРИЛОВ, Е.В. ЯНЬКОВ

## РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕРАЗРЕЗНОЙ БАЛКИ ТОНКОСТЕННОГО ПРОФИЛЯ

Исследована неразрезная балка тонкостенного профиля, имеющая участки как с замкнутым, так и с открытым контуром. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния балки при статическом нагружении по рассматриваемой теории, учитывающей вторичные сдвиги. Получены частотные уравнения в виде уравнений трех моментов и трех бимоментов. Изучено влияние характеристик балки — материала и размеров сечения — на значения частот собственных колебаний. Разработаны алгоритмы и рассмотрен пример оптимизации балки при ограничениях по прочности и частотам собственных колебаний с использованием различных критериев оптимальности.

**Ключевые слова:** неразрезная балка, депланация, свободные колебания, частота колебаний, оптимизация, критерии оптимальности.

В некоторых случаях динамические воздействия на конструкции невелики, но при близости значений частот возбудителя колебаний и собственным частотам амплитуда колебаний возрастает, что может привести к разрушению. Поэтому важно как можно более точно найти частоты собственных колебаний, что в случае тонкостенных стержней невозможно без учета стесненности депланации сечений и сопровождающих ее вторичных сдвигов. Задачей исследования является определение характеристик собственных колебаний конструкции, расчет напряженно-деформированного состояния этой конструкции при статическом нагружении и дальнейшая оптимизация конструкции.

Объектом исследования служит прямолинейная неразрезная балка с бисимметричным сечением в виде тонкостенного профиля, имеющего участки как с замкнутым, так и с открытым контуром. Будем считать, что балка находится под действием только вертикальной статической нагрузки, которая в общем случае не проходит через центры сечений. Схема фрагмента балки и пример сечения приведены на рис. 1.

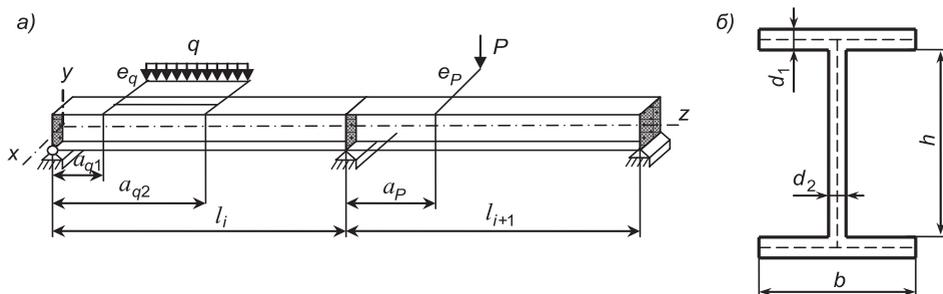


Рис. 1. Схема фрагмента балки (а) и пример сечения (б)

Для решения поставленной задачи применялись уравнения движения тонкостенного стержня с учетом вторичных сдвигов [1]. Основными методами расчета являются метод граничных элементов (начальных параметров) для стержней и применение условий непрерывности для неразрезных балок.

**Расчет балки на прочность при статическом нагружении.**

При расчете использовались ранее полученные уравнения движения тонкостенного стержня бисимметричного профиля [2], в которых были исключены части, связанные с инерцией осевых и угловых перемещений. В результате были получены уравнения трех моментов и трех бимоментов для определения опорных реакций:

$$M_{i-1}\chi_{M1}(l_i) + 2M_i(\chi_{M2}(l_i) + \chi_{M2}(l_{i+1})) + M_{i+1}\chi_{M1}(l_{i+1}) = -6EJ_1(\beta_{li}^L + \beta_{l(i+1)}^R), \quad (1)$$

$$B_{i-1}\chi_{B2}(l_i) + 2B_i(\chi_{B2}(l_i) + \chi_{B2}(l_{i+1})) + B_{i+1}\chi_{B1}(l_{i+1}) = -GJ_k(\psi_i + \psi_{i+1}), \quad (2)$$

где  $M_{1(i-1)}$ ,  $M_{1i}$ ,  $M_{1(i+1)}$ ,  $B_{i-1}$ ,  $B_i$ ,  $B_{i+1}$  — значения моментов и бимоментов в опорных сечениях;

$l_i$ ,  $l_{i+1}$  — длины соседних пролетов;

$\beta_{li}^L$ ,  $\beta_{l(i+1)}^R$ ,  $\psi_i$ ,  $\psi_{i+1}$  — выражения, зависящие от внешней нагрузки в пролетах;

$$\chi_{M1} = \left( \frac{6EJ_1k_{11}}{lG} - l \right); \quad \chi_{M2} = \left( \frac{3EJ_1k_{11}}{lG} + l \right); \quad \chi_{B1}(l_i) = \frac{1}{l_i} - \frac{chk l_i}{shkl_i} \cdot \frac{GJ_k}{EJ_3k};$$

$$\chi_{B2}(l_i) = \frac{1}{shkl_i} \cdot \frac{GJ_k}{EJ_3k} - \frac{1}{l_i}; \quad k = \sqrt{\frac{GJ_k}{EJ_3(J_k k_{33} + 1)}};$$

$E$ ,  $G$  — модули упругости при растяжении-сжатии и сдвиге;

$k_{11}$ ,  $k_{33}$  — коэффициенты формы сечения;

$J_1$ ,  $J_k$ ,  $J_3$  — осевой момент инерции, момент инерции при чистом кручении и секториальный момент инерции.

В дальнейшем производился расчет внутренних силовых факторов и напряжений в сечениях по известным формулам. В рассматриваемом случае, вследствие введенных гипотез изгиба и стесненного кручения, в опасных точках сечения реализуется частный случай ПНС. Согласно энергетической теории прочности эквивалентные напряжения равны:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_{\text{СТ}}^2 + \tau_{\text{К}}^2)}. \quad (3)$$

Задача расчета балки на прочность сводится к определению значений усилий в опасных сечениях балки, эквивалентных напряжений в опасных точках сечений и проверке условий прочности.

**Определения собственных частот колебаний балки.** Для изучения колебаний тонкостенной балки применялись уравнения движения прямолинейного тонкостенного стержня бисимметричного сечения с учетом вторичных сдвигов и инерции вращения сечений по [1]. Дифференциальные уравнения главных форм колебаний балки принимают вид

$$\begin{aligned}
\frac{d^4\xi(z)}{dz^4} + \frac{\rho\omega^2}{E} \left(1 + \frac{E}{G} Fk_{22}\right) \frac{d^2\xi(z)}{dz^2} + \frac{\rho F\omega^2}{EJ_2} \left(\frac{\rho J_2 k_{22}}{G} \omega^2 - 1\right) \xi(z) &= 0; \\
\frac{d^4\eta(z)}{dz^4} + \frac{\rho\omega^2}{E} \left(1 + \frac{E}{G} Fk_{11}\right) \frac{d^2\eta(z)}{dz^2} + \frac{\rho F\omega^2}{EJ_1} \left(\frac{\rho J_1 k_{11}}{G} \omega^2 - 1\right) \eta(z) &= 0; \\
\frac{d^4\theta(z)}{dz^4} + \frac{1}{2} \frac{\rho J_3 \omega^2 \left(J_k k_{33} + 1 + \frac{E}{G} J_p k_{33}\right) - GJ_k}{EJ_3 (J_k k_{33} + 1)} \frac{d^2\theta(z)}{dz^2} + \\
+ \frac{\rho J_p \omega^2}{EJ_3 (J_k k_{33} + 1)} \left(1 - \frac{\rho J_3 k_{33}}{G} \omega^2\right) \theta(z) &= 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_1$  — перемещения центра изгиба вдоль осей  $x$ ,  $y$  и углы поворота сечения вокруг этих осей;  
 $\theta$  — угол закручивания сечения;  
 $\rho$  — плотность материала;  
 $k_{22}$  — коэффициент формы сечения;  
 $J_1, J_2, J_p$  — осевые и полярный моменты инерции;  
 $\omega$  — частота колебаний.

Решение уравнений (4) для крутильно-депланационных колебаний стержня приведено в [3]. Изгибные колебания рассматриваются аналогично. Эти решения могут быть применены и для изучения колебаний неразрезной балки. Рассмотрим неразрезную балку, имеющую  $n$  пролетов, опирающуюся на  $(n + 1)$  шарниров, отвечающих условиям отсутствия прогибов и угла закручивания балки на опорах и отсутствия поворота опорного сечения в горизонтальной плоскости  $\xi = 0, \eta = 0, \theta = 0, \beta_2 = 0$ .

При изучении колебаний отдельных пролетов с учетом данных условий были получены частотные уравнения для изгибных колебаний в двух плоскостях и крутильно-депланационных колебаний в виде

$$\sin p_1 l_i \operatorname{sh} r_1 l_i \frac{(r_1^2 - p_1^2)(\lambda^2 - p_1^2 r_1^2)}{p_1 r_1 (\lambda - p_1^2)(\lambda + r_1^2)} - e^{\eta l_i} + 1 = 0; \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
&M_{i(i-1)} (p_2 \sin p_2 l_{i-1} + r_2 \operatorname{sh} r_2 l_{i-1}) \sin p_2 l_i \operatorname{sh} r_2 l_i + \\
&+ M_i ((r_2 \cos p_2 l_i \operatorname{sh} r_2 l_i + p_2 \sin p_2 l_i \operatorname{ch} r_2 l_i) \sin p_2 l_{i-1} \operatorname{sh} r_2 l_{i-1} + \\
&+ (r_2 \cos p_2 l_{i-1} \operatorname{sh} r_2 l_{i-1} + p_2 \sin p_2 l_{i-1} \operatorname{ch} r_2 l_{i-1}) \sin p_2 l_i \operatorname{sh} r_2 l_i) + \\
&+ M_{i+1} (p_2 \sin p_2 l_i + r_2 \operatorname{sh} r_2 l_i) \sin p_2 l_{i-1} \operatorname{sh} r_2 l_{i-1} = 0;
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
&B_{i-1} (p_3 \sin p_3 l_i - r_3 \operatorname{sh} r_3 l_i) \sin p_3 l_{i+1} \operatorname{sh} r_3 l_{i+1} + \\
&+ B_i ((p_3 \cos p_3 l_{i+1} \operatorname{sh} r_3 l_{i+1} - r_3 \sin p_3 l_{i+1} \operatorname{ch} r_3 l_{i+1}) \sin p_3 l_i \operatorname{sh} r_3 l_i + \\
&+ (p_3 \cos p_3 l_i \operatorname{sh} r_3 l_i - r_3 \sin p_3 l_i \operatorname{ch} r_3 l_i) \sin p_3 l_{i+1} \operatorname{sh} r_3 l_{i+1}) + \\
&+ B_{i+1} (p_3 \sin p_3 l_{i+1} - r_3 \operatorname{sh} r_3 l_{i+1}) \sin p_3 l_i \operatorname{sh} r_3 l_i = 0,
\end{aligned} \tag{7}$$

где  $p_j, r_j$  — функции частот колебаний  $\omega$ ;  $\lambda = \frac{\rho F k_{22}}{G} \omega^2$ .

Учитывая, что в принятой расчетной схеме изгиба балки в горизонтальной плоскости опорные шарниры выступают в роли жесткого защемления, уравнение (5) описывает колебания каждого пролета в горизонтальной плоскости, и для определения частот необходимо решить  $n$  таких уравнений. Уравнения (6) и (7) представляют собой уравнения трех моментов и трех бимоментов для свободных изгибных колебаний балки в

вертикальной плоскости и крутильно-депланационных колебаний. Для определения частот этих колебаний необходимо решить системы из  $(n - 1)$  уравнений каждого вида с учетом, что на крайних опорах изгибающий момент и бимомент равны нулю:

$$M_{1(0)} = M_{1(n)} = 0; \quad B_0 = B_n = 0.$$

На основе полученных аналитических выражений составлен алгоритм и разработано программное средство для расчета тонкостенных балок рассматриваемого вида при статическом нагружении и определения частот собственных колебаний.

Для оценки влияния вторичных сдвигов производилось сравнение результатов расчетов по разработанному алгоритму с расчетами по теории, изложенной в [4]. В таблице приведено сравнение частот шести первых главных форм собственных колебаний для двухпролетной балки двутаврового сечения с длинами пролетов 1 и 2 м. Значения частот представлены в безразмерном виде:

$$\tilde{\omega} = \omega l \sqrt{\frac{\rho}{E}}.$$

На рис. 2 показаны зависимости частот второй и третьей собственных форм колебаний рассматриваемой балки от соотношения размеров

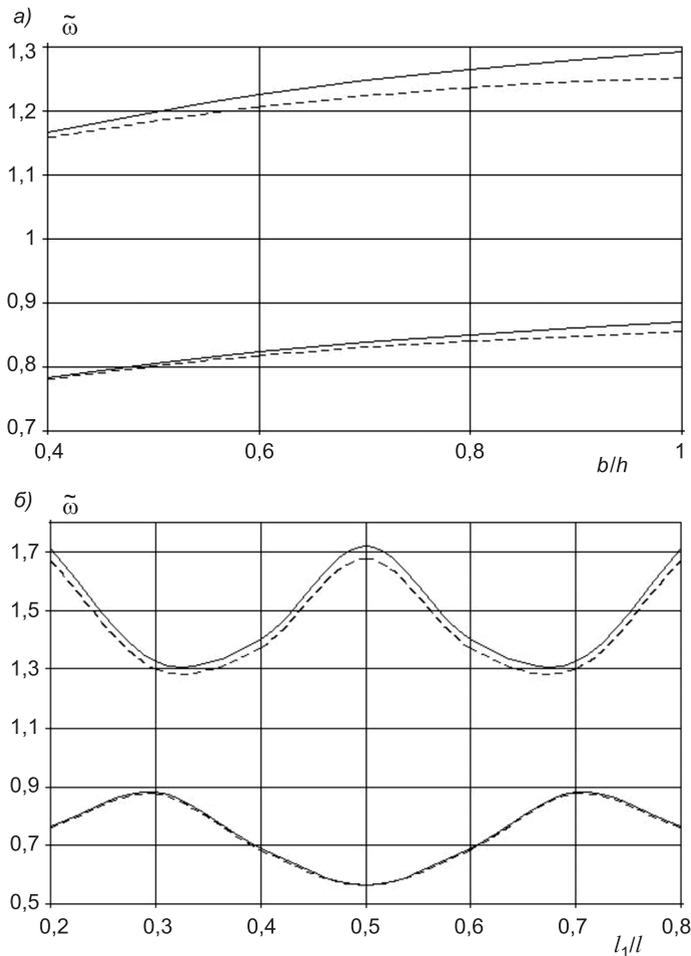


Рис. 2. Зависимость частоты собственных колебаний балки от относительных размеров сечения (а) и соотношения длин пролетов (б)

**Сравнение безразмерных значений частот  $\tilde{\omega}$  собственных колебаний**

Частоты	Формы колебаний					
	1	2	3	4	5	6
С учетом сдвигов	0,242	0,841	1,236	2,469	3,868	4,550
Без учета сдвигов	0,242	0,851	1,265	2,575	4,109	4,929
Относительное отклонение	0,000	0,012	0,023	0,043	0,062	0,083

сечения  $b/h$  и соотношения длин пролетов. Сплошная линия на графиках соответствует расчету без учета вторичных сдвигов, пунктирная — по теории, учитывающей вторичные сдвиги. При этом видно, что учет вторичных сдвигов достаточно существенно влияет на частоты колебаний, причем это влияние выше для высоких форм колебаний, и отклонение, например, для шестой из рассмотренных частот достигает 8,3 % (см. таблицу).

**Оптимизация балки.** В качестве объекта оптимизации выступает балка, изображенная на рис. 3.

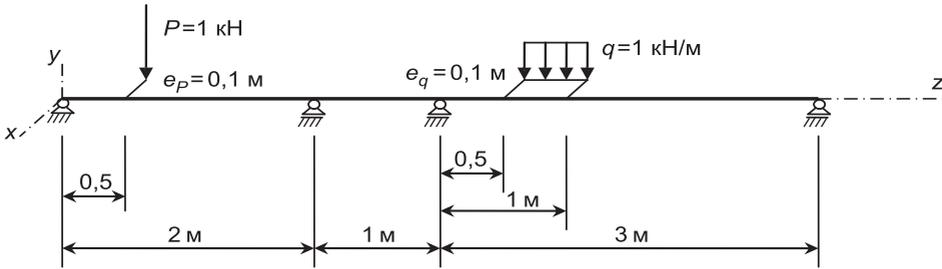


Рис. 3. Расчетная схема балки

Задача оптимизации балки ставится в форме задачи математического программирования: требуется найти  $\min f(X)$ ,  $X \in E^n$ , при ограничениях

$$g_j(X, P(X)) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad (8)$$

где  $f(X)$  — целевая функция, построенная на основе выбранного критерия оптимальности балки;

$X$  — вектор варьируемых параметров балки;

$P(X)$  — вектор параметров состояния балки;

$g_j(X, P(X)) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m$  — ограничения по прочности, частотам собственных колебаний и конструктивные ограничения.

В качестве варьируемых будем рассматривать размеры сечения балки (см. рис. 1):

$$X_1 = h; \quad X_2 = b; \quad X_3 = d_1; \quad X_4 = d_2.$$

Рассмотрены две постановки задачи оптимизации.

**1. Оптимизация по весовому критерию с ограничениями по прочности и частотам собственных колебаний.** Так как балка выполнена из одного материала (сталь) и имеет постоянное сечение, то весовым критерием является, по сути, площадь сечения балки, т.е.  $f_1(X) = X_1 X_4 + 2X_2 X_3$ .

Ограничения по прочности имеют вид:

$$\sigma_{\text{экв}i \text{ макс}}(X)/R - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{экв}i \text{ макс}}(X)$  — максимальное эквивалентное в сечениях  $i$ -го пролета;

$R$  — расчетное сопротивление материала (в рассматриваемом примере  $R = 200$  МПа).

Ограничения по частотам собственных колебаний приняты в виде:

$$\Delta \varpi_j / |\omega_i - \varpi_j| - 1 \leq 0, \quad i = 1, n; \quad j = 1, m, \quad (10)$$

где  $\omega_i, \varpi_j$  — частоты собственных колебаний балки и возбудителей колебаний;

$\Delta \varpi_j$  — величина полуинтервала для отстройки от резонанса по частоте  $\omega_j$ .

Учитываются конструктивные ограничения:

$$X_1 / 100 X_4 - 1 \leq 0; \quad X_2 / 30 X_3 - 1 \leq 0. \quad (11)$$

Принято:  $n = 10$ ;  $m = 2$ , в качестве частот возбудителей —  $\omega_1 = 152$  рад/с и  $\omega_2 = 305$  рад/с, которые соответствуют работе асинхронных электродвигателей. Величины недопустимых полуинтервалов для собственных частот на данном этапе исследований назначались согласно соотношению  $\Delta \varpi_j = 0,1 \varpi_j$ .

**2. Оптимизация по критерию максимального квадратичного отклонения собственных частот от резонанса.** В данной постановке задача оптимизации балки решается в два этапа.

**Э т а п 1.** Оптимизация по весовому критерию. Критерий оптимизации — площадь сечения. Варьируемые параметры — размеры сечения. Учитываются ограничения (9), (11). Для обеспечения большей возможности варьирования параметров сечения на этапе 2, в ограничениях по прочности используется заниженная на  $k, \%$ , величина расчетного сопротивления  $R$ .

**Э т а п 2.** Решение изопериметрической задачи. Согласно выбранному для данного этапа критерию оптимальности разыскивается

$$\min f_2(X) = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n (1/((\omega_i(X) - \tilde{\omega}_j)^2 + \alpha)) \right) \quad (12)$$

при ограничениях (9), (11), а также дополнительном ограничении-равенстве  $X_1 X_4 + 2X_2 X_3 = f_1(\tilde{X}^{*1})$ ,  $\tilde{X}^{*1}$  — решение на этапе 1 при  $\tilde{R} = R(100 - k)/100$ ,  $\alpha$  — регулирующий параметр.

Для решения формируемых условно-экстремальных задач использован метод подвижного внешнего штрафа<sup>1</sup> и разработанная на его основе библиотека решения задач математического программирования. Результаты решения задач оптимизации частично представлены на рис. 4 в виде графиков зависимости оптимальной площади сечения от величины внешней нагрузки: 1 — оптимизация по весовому критерию без учета ограничений по собственным частотам; 2 — оптимизация по весовому критерию (постановка 1); 3 — оптимизация по критерию максимального квадратичного отклонения собственных частот от резонансных значений (постановка 2,  $k = 20$ ).

На рис. 5 показан график значений вклада  $f_2(\omega)$  в критерий (12) как функции частоты собственных колебаний. Вертикальными пунктирными линиями отмечены частоты возбудителей и границы 10%-го диапазона, который используется при оптимизации по весовому критерию. Разрывная линия 1 соответствует выражению, не включающему регулирующий параметр  $\alpha$ ; линия 2 построена с использованием регулятора  $\alpha$ , что позволяет при поиске перемещаться без разрывов в пределах подобластей А, В, С.

<sup>1</sup> Гребенюк Г.И., Безделев В.В. Метод подвижного внешнего штрафа в задачах оптимального проектирования конструкций // Вопросы динамики и прочности в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. Омск: ОмПИ, 1983. С. 34–40.

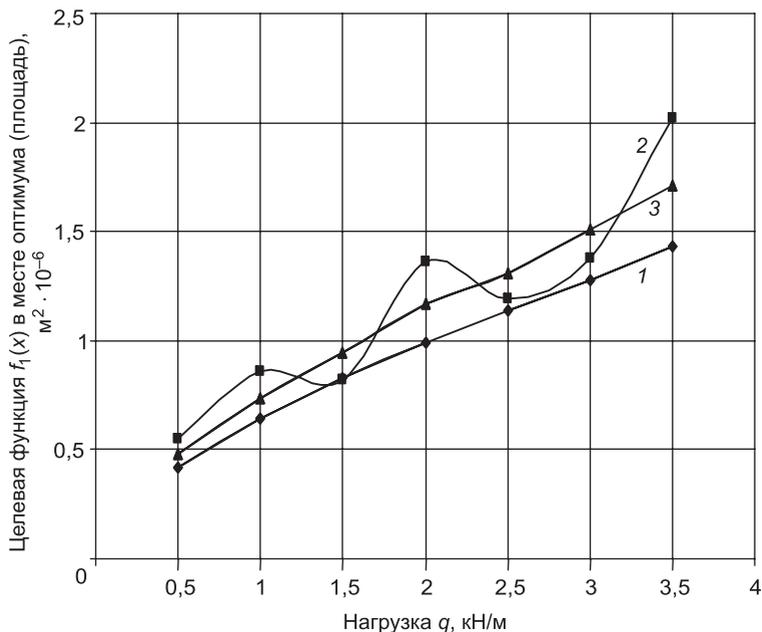


Рис. 4. Графики зависимости оптимальной площади сечения от величины внешней нагрузки  $q$

Расчеты позволили получить следующие результаты.

Значение  $\alpha$  практически не влияет на результаты оптимизации, и для удобства графического представления (см. рис. 5) величина  $\alpha$  была принята равной 800.

При  $q = 1$  кН/м в постановке 1:  $f_1(X^{*1}) = 0,0020207$  м²;  $X_1^{*1} = 0,2$  м;  $X_2^{*1} = 0,07392$  м;  $X_3^{*1} = 0,005608$  м;  $X_4^{*1} = 0,005958$  м. Активные собственные частоты (из первых десяти):  $\omega_2 = 118,46$ ;  $\omega_3 = 256,97$ ;  $\omega_4 = 434,80$ .

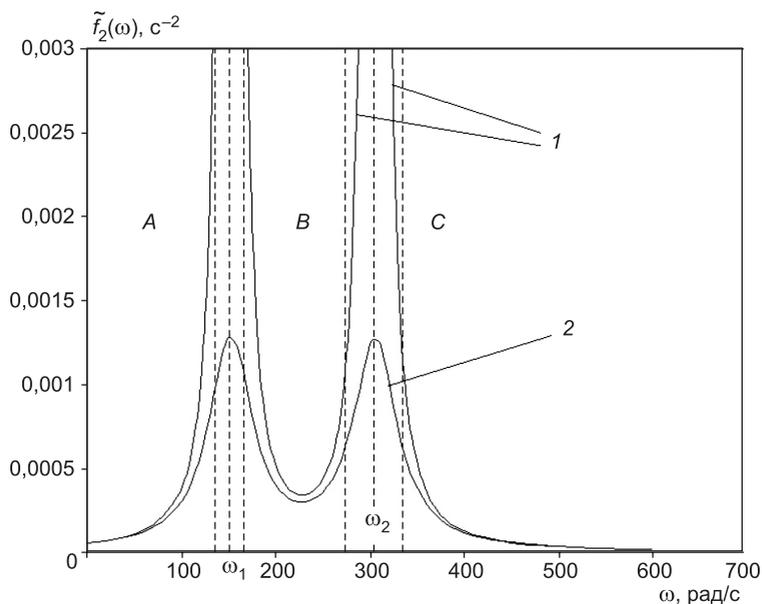


Рис. 5. Вклад  $\tilde{f}_2(\omega)$  в значение критерия (12) в зависимости от величины собственной частоты  $\omega$

В постановке 2:  $f_1(X^{*2}) = 0,0014913 \text{ м}^2$ ;  $X_1^{*2} = 0,146493 \text{ м}$ ;  $X_2^{*2} = 0,063901 \text{ м}$ ;  $X_3^{*2} = 0,01 \text{ м}$ ;  $X_4^{*2} = 0,001456 \text{ м}$ . Активные собственные частоты (из первых десяти):  $\omega_2 = 103,26$ ;  $\omega_3 = 226,49$ ;  $\omega_4 = 387,38$ .

Подставляя значения активных собственных частот в (12) и пренебрегая (в силу незначительности) влиянием остальных, получим:  $f_2(X^{*2}) \approx 78,6 \cdot 10^{-5} < f_2(X^{*1}) \approx 105,3 \cdot 10^{-5}$ . Таким образом, в данном случае постановка 2 оказалась предпочтительнее в оптимальном проекте и по значению весового критерия, и по степени отстройки от возможного резонанса.

Для оценки степени отклонения активных собственных частот от резонанса можно использовать критерий:

$$\delta = \min(\Delta_{\omega\theta}^{\text{л}}, \Delta_{\omega\theta}^{\text{п}}) / \Delta_{\omega\omega}, \quad (13)$$

где  $\Delta_{\omega\theta}^{\text{л}}$ ,  $\Delta_{\omega\theta}^{\text{п}}$  — расстояния от левой (меньшей) и правой (большей) активных собственных частот до частоты возбудителя;

$\Delta_{\omega\omega}$  — интервал между соседними активными собственными частотами.

В рассматриваемом случае (при двух возбудителях колебаний) оценки (13) по каждому из возбудителей и средние оценки оказались для оптимальных проектов следующими:

$$\begin{aligned} \text{Постановка 1. } \delta_1 &= \min(33,54; 104,57) / 138,11 = 0,243; \\ \delta_2 &= \min(48,43; 129,47) / 177,9 = 0,272; \delta_{\text{ср}}^{(1)} = 0,257. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Постановка 2. } \delta_1 &= \min(48,47; 74,49) / 122,96 = 0,394; \\ \delta_2 &= \min(78,51; 82,38) / 160,89 = 0,488; \delta_{\text{ср}}^{(2)} = 0,441. \end{aligned}$$

Средние оценки степени отклонения от возможного резонанса подтверждают ранее сделанный вывод о предпочтительности постановки 2.

**Выводы.** 1. Получены уравнения и разработаны алгоритмы определения напряженно-деформированного состояния и частот свободных изгибных и крутильно-депланационных колебаний неразрезной балки тонкостенного профиля с учетом вторичных сдвигов.

2. Выявлено, что при статическом нагружении влияние вторичных сдвигов на максимальные эквивалентные напряжения в сечениях незначительно, и этим воздействием для стержней открытого профиля можно пренебречь.

3. Показано, что влияние вторичных сдвигов на частоты колебаний существенно и в большей степени сказывается для высоких форм колебаний.

4. Рассмотрены два подхода к оптимизации тонкостенной неразрезной балки. В рамках первого подхода использован традиционный весовой критерий оптимальности; а в рамках второго — комбинация весового и нового критерия оптимальности, характеризующего степень отклонения собственных частот от частот возбудителей колебаний. На примере оптимизации трехпролетной балки показана эффективность второго подхода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корбут, Б.А. О динамической теории тонкостенных криволинейных стержней [Текст] / Б.А. Корбут, Г.В. Лазарева // Прикл. механика. — 1982. — Т. 18, № 5. — С. 98–104.
2. Гаврилов, А.А. Расчет на прочность неразрезных балок тонкостенного профиля с учетом вторичных сдвигов [Текст] / А.А. Гаврилов, Г.И. Гребенюк // Труды НГАСУ (Сибстрин). — Новосибирск, 2012. — № 2. — С. 46–50.
3. Гаврилов, А.А. Влияние геометрических характеристик тонкостенных стержней на значения частот свободных крутильно-депланационных колебаний [Текст] / А.А. Гаврилов, Г.И. Гребенюк // Проблемы оптимального проектирования соору-

- жений : Докл. 2-й Всерос. конф., Новосибирск, 5–6 апр., 2011 г. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2011. — С. 74–79.
4. Бычков, Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций [Текст] / Д.В. Бычков. — М. : Госстройиздат, 1962.

*ГРЕБЕНЮК Григорий Иванович, д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ГАВРИЛОВ Александр Александрович, асп.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ЯНЬКОВ Евгений Васильевич, канд. техн. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 14.06.13

**Grebenyuk Grigoriy Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gavrilov Alexandr Alexandrovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Yankov Evgeny Vasilievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **CALCULATION AND OPTIMIZATION OF A CONTINUOUS BEAM THIN-WALLED SECTIONS**

Investigated the continuous beam with a cross section in the form of a thin-profile, which has areas with both closed and open loop. Calculations of the stress-strain state of the beam under static loading by calculating the present theory of thin-walled, given to secondary changes. In the study of free vibrations of the beam was obtained frequency equation in the form of a three-moment equations and three-bimoment. The effect of the beam characteristics — material and section — on the values of natural frequencies. Algorithms and consider an example of optimization of the beam under the constraints on the strength and frequency of natural oscillations with the use of different criteria of optimality.

**Key words:** continuous beams, warping, free vibration, the oscillation frequency, optimization, criteria of optimality.

### REFERENCES

1. Korbut, B.A. On the dynamical theory of thin-walled curvilinear rods [Text] / B.A. Korbut, G.V. Lazareva // Applied mechanics. — 1982. — Vol. 18, N 5. — P. 98–104.
2. Gavrilov, A.A. Calculation of the strength of continuous beams of thin-walled profile with the secondary shifts [Text] / A.A. Gavrilov, G.I. Grebenuk // Proceedings NGASU (Sibstrin). — Novosibirsk, 2012. — N 2. — P. 46–50.
3. Gavrilov, A.A. The influence of the geometric characteristics of thin-walled at the frequencies of free-torsional vibrations [Text] / A.A. Gavrilov, G.I. Grebenuk // Problems of optimal design of structures: Reports of the 2nd All-Russian Conference. — Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2011. — P. 74–79.
4. Bychkov, D.V. Structural mechanics of thin-walled rod [Text] / D.V. Bychkov.— М. : Gosstroyizdat, 1962.

УДК 624.046.2

А.В. МИЩЕНКО

**ОСОБЕННОСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТЫХ  
РАЦИОНАЛЬНО ПРОФИЛИРОВАННЫХ БАЛОК  
ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ\*****Сообщение 1**

Исследовано упругопластическое деформирование рационально профилированных однородных и слоистых балок при действии нагрузок, превышающих расчетные. Рассмотрены балки с переменной высотой прямоугольного сечения. Наряду с балками, профилированными под заданную нагрузку, предложены балки, профилированные при заданном расходе материалов, обладающие повышенной прочностью и жесткостью в сравнении с призматическими балками.

**Ключевые слова:** рациональное профилирование, равнопрочность, слоистый стержень, несущая способность.

Задачи рационального и оптимального проектирования строительных конструкций, позволяющие обоснованно получать дополнительные резервы несущей способности и жесткости, снижения материалоемкости, традиционно относились к приоритетным задачам в области строительной механики. В последние десятилетия в связи с интенсивной разработкой новых конструктивных материалов и технологий их соединения область исследований закономерно распространяется и на класс композитных конструкций<sup>1</sup>, элементы которых выполнены из дисперсно-неоднородных материалов либо составлены из различных (однородных или неоднородных) фаз, принимающих в конструкции разнообразные геометрические формы: прямо- и криволинейных стержневых элементов (армированные системы), плоских и пространственных слоев (слоистые пластины, оболочки и стержни).

Применение критериев рациональности и оптимальности к таким конструкциям, как правило, приводит к выравниванию и приближению к предельным значениям компонент напряжения и деформации. Наряду с очевидными преимуществами рациональных конструкций, в числе которых снижение веса и стоимости материалов, возникает и ряд проблем. Например, вопросы, связанные с особенностями деформирования рациональных, в том числе равнопрочных, конструкций при действии нагрузок, превышающих расчетные (проектные). Работа строительных конструкций при запроектных воздействиях в настоящее время рассматривается как важнейшее направление строительной механики<sup>2, 3</sup>. Нередко выска-

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 14-01-90004.

<sup>1</sup> Альтенбах Х. Основные направления теории многослойных тонкостенных конструкций: Обзор // Механика композитных материалов. 1998. Т. 34. № 3. С. 333–348.

<sup>2</sup> Милейковский И.Е. Изучение процессов разрушения зданий, сооружений как новое направление в строительной механике // Исследования и разработки эффективных строительных конструкций, методов возведения зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. Белгород: БелГТАСМ, 1996. С. 154–162.

<sup>3</sup> Гениев Г.А., Колчунов В.И., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П., Клюева Н.В. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.

зывается мнение о том, что рациональные конструкции характеризуются почти одновременным наступлением предельного состояния по пространству конструкции и потому являются опасными и ненадежными в практике эксплуатации. Важны также проблемы технологичности и стоимости изготовления рациональных конструкций, обладающих усложненной геометрической формой по сравнению с традиционными.

В статье на примере балочных систем показано, что метод рационального проектирования, предложенный в [1], позволяет получать широкий класс однородных и слоистых конструкций, которые в сравнении с конструкциями, содержащими призматические (непрофилированные) стержни, наряду с получением экономии материалов могут обладать существенно большей прочностью и жесткостью как при упругом, так и упругопластическом деформировании при запроектных воздействиях.

На первом этапе выполняется решение обратной задачи, связанной с нахождением законов рационального профилирования упругой конструкции при заданном расчетном уровне нагрузок. На втором — конструкция подвергается дальнейшему упругопластическому деформированию нагрузками, превышающими расчетные, вплоть до исчерпания несущей способности.

**1. Рациональное профилирование балок.** Методы рационального проектирования произвольных плоских стержней и рам при различных статических, динамических и длительно действующих воздействиях изложены в [1]. Для исследуемых в данной статье балок представим их кратко в упрощенном виде.

Рассмотрим стержень, составленный из  $s$  однородных слоев, при обеспечении идеального межслойного контакта. Продольную ось совместим с координатной осью  $x$ , а оси симметрии поперечных сечений — с плоскостью  $yx$ , в которой к стержню приложены нагрузки. Геометрия и материал  $k$ -го слоя характеризуются: шириной  $b_k(x, y)$  и высотой  $h_k(x) = y_{k+1} - y_k$  в нормальном к оси  $x$  сечении, модулем продольной упругости  $E_k$ , расчетным сопротивлением  $R_k$ , пределом текучести  $\sigma_{s,k}$ , объемной плотностью  $\rho_k$ . Принимая распределение продольных деформаций в виде  $\varepsilon(x, y) = \varepsilon_0(x) - \kappa(x)y$  ( $\varepsilon_0$  и  $\kappa$  — деформация и кривизна оси стержня)\*, запишем выражения для продольной силы  $N$  и изгибающего момента  $M$  при упругом деформировании ( $\sigma_k = E_k \varepsilon$ ) в виде

$$\begin{cases} D_A \varepsilon_0 - D_S \kappa = N, \\ D_I \kappa - D_S \varepsilon_0 = M \end{cases} \quad (1)$$

с использованием мембранной, смешанной и изгибной жесткостных характеристик упругого сечения

$$[D_A, D_S, D_I](x) = \sum_{k=1}^s E_k \int_{y_k}^{y_{k+1}} b_k(x, y) [1, y, y^2] dy. \quad (2)$$

Система уравнений (1), записанная с учетом (2), в развернутом виде

\* Как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, это допустимо для относительно тонких стержней  $l/h > 8$ , в которых используемые в слоях материалы имеют одинаковый порядок физических характеристик.

$$\begin{cases} \varepsilon_{0*} \sum_{k=1}^s E_k b_k (y_{k+1} - y_k) - \kappa_* \sum_{k=1}^s E_k b_k (y_{k+1}^2 - y_k^2)/2 = N, \\ -\varepsilon_{0*} \sum_{k=1}^s E_k b_k (y_{k+1}^2 - y_k^2)/2 + \kappa_* \sum_{k=1}^s E_k b_k (y_{k+1}^3 - y_k^3)/3 = M, \end{cases}$$

дает два условия для нахождения двух геометрических функций из набора  $b_k, h_k$  ( $k = 1, \dots, s$ ). При записи данных уравнений используются предельные величины  $\varepsilon_{0*}(x), \kappa_*(x)$ , доставляющие принятому проектному критерию знак равенства в двух точках по поперечной координате  $y$ . В качестве такого критерия могут применяться условия прочности, ограничения деформаций, условия, выраженные через деформации, носящие иной физический смысл.

При рассмотрении балок двусоно-симметричного поперечного сечения, для которого  $D_S(x) = 0$ , получим разрешающее уравнение

$$\kappa_* \sum_{k=1}^s E_k b_k h_k (y_{k+1}^2 + y_{k+1} y_k + y_k^3) = 3M. \quad (3)$$

Координаты границ слоев  $y_{k+1} = y_k + h_k$  ( $k = 1, \dots, s$ ) выражаются через толщины слоев и  $y_1$  — привязку нижней границы первого (нижнего) слоя к отсчетной плоскости. Использование условия прочности  $|\sigma_k(x, y)| \leq \mu_\tau R_k$  дает предельную кривизну

$$\kappa_*(x) = \operatorname{sgn} \varepsilon(y_\xi) \mu_\tau(x, y_\xi) \frac{R_\xi}{E_\xi y_\xi(x)}, \quad (4)$$

при которой в наиболее опасной точке с координатой  $y_\xi$ , расположенной в материале с характеристиками  $R_\xi, E_\xi$ , условие прочности выполняется со знаком строгого равенства. Во всех иных точках слоистого сечения условие прочности имеет форму неравенства. Коэффициент  $\mu_\tau \leq 1$  согласно принятой теории прочности учитывает влияние касательных напряжений.

В случае профилирования балки посредством изменения ширины  $b_{k_1}(x)$  двух симметрично расположенных слоев из (3) получаем линейное уравнение, а при профилировании высоты сечения слоя  $h_{k_1}(x)$  — нелинейное, причем, входящая в него предельная кривизна (4) также может зависеть от  $h_{k_1}(x)$ .

С целью учета конструктивных ограничений на функции профилирования  $r \in [b, h]$  накладываются ограничения снизу

$$r(x) \geq r_{\min} > 0, \quad (5)$$

становящиеся активными в окрестностях шарнирных опор и в пролетах стержней на малонагруженных участках. В результате их применения стержень перестает быть непрерывно равнопрочным (в случае использования в качестве проектного критерия условия прочности) и может быть назван рационально профилированным в соответствии с принятым проектным критерием. В [1] для стержней произвольной слоистой структуры при изгибе с растяжением (сжатием) рассмотрены условия реализации критерия прочности в проектных задачах. Показано, что решение по длине стержня в общем случае носит кусочный характер, заключающийся в отделении друг от друга равнокритериальных участков соединительными вставками  $r(x) = r_{\min}$ .

Для замыкания задачи дополнительно к рассмотренным физическим соотношениям формулируются условия стандартной краевой задачи для изогнутого стержня с набором соответствующих граничных условий<sup>4</sup>.

**2. Упругопластическое деформирование.** Для общего случая нелинейного деформирования плоской рамной системы, составленной из слоисто-неоднородных стержней, в [2] приведены основные соотношения, выполнен пример расчета несущей способности упругопластической рамы со стержнями переменного сечения двутавровой формы, изготовленными из двух марок сталей. В [3] исследованы предельные состояния растянуто-изогнутого упругопластического слоистого стержня на основе билинейных диаграмм деформирования материалов.

Рассмотрим решение прямой задачи физически нелинейного деформирования балочных систем. Будем полагать, что материалы деформируются идеально упругопластически при отсутствии разгрузки. Перепишем закон деформирования в виде  $\sigma_k = \varepsilon \bar{E}_k(\varepsilon)$  с введением переменного секущего модуля  $\bar{E}_k$ , принимающего значение  $\bar{E}_k = E_k$  в упругой стадии и  $\bar{E}_k = \text{sgn}(\varepsilon) \sigma_{s,k} / \varepsilon$  в пластической. Это позволяет записать физические соотношения в квазилинейной форме (1) с переменными (секущими) жесткостными характеристиками

$$[\bar{D}_A, \bar{D}_S, \bar{D}_I](x, \varepsilon) = \sum_{k=1}^s \int_{y_k}^{y_{k+1}} \bar{E}_k(\varepsilon) b_k(x) [1, y, y^2] dy.$$

Выделяя в  $k$ -м слое области упругого  $h_{ke}$  и пластического  $h_{kp}$  деформирования, имеем

$$[\bar{D}_A, \bar{D}_S, \bar{D}_I](x, \varepsilon) = \sum_{k=1}^s \left( E_k \int_{h_{ke}(x, \varepsilon)} b_k(x) [1, y, y^2] dy + \sigma_{s,k} \int_{h_{kp}(x, \varepsilon)} \frac{\text{sgn}(\varepsilon) b_k(x)}{\varepsilon_0 - \kappa y} [1, y, y^2] dy \right),$$

где первое слагаемое в скобках — жесткости упругих, а второе — пластических областей слоистого сечения. В сечении каждого слоя указанные стадии деформирования могут присутствовать совместно или по отдельности. Граница  $y_s$  между ними устанавливается по условию  $\varepsilon_0 - \kappa y_s = \sigma_{s,k} / E_k$ .

При рассмотрении балок двусосно-симметричного поперечного сечения получим

$$\varepsilon_0(x) = 0, \quad \kappa(x) = \frac{M(x)}{\bar{D}_I(x, \varepsilon)}, \quad (6)$$

$$\bar{D}_I(x, \varepsilon) = \sum_{k=1}^s \left( E_k \int_{h_{ke}(x, \varepsilon)} b_k(x, y) y^2 dy - \frac{\sigma_{s,k}}{\kappa} \int_{h_{kp}(x, \varepsilon)} \text{sgn}(\varepsilon) b_k(x, y) y dy \right). \quad (7)$$

Для однородных балок прямоугольного сечения, положив в (6), (7)  $s = 1$ ,  $b_k(y) = \text{const}$ ,  $y_2 = -y_1 = h/2$ , уравнение моментов запишем в виде

$$2 / 3 E b(x) y_s^3 \kappa + \sigma_s \text{sgn}(\kappa) b(x) (y_2^2 - y_s^2) = M(x), \quad (8)$$

<sup>4</sup> Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л. Математические методы в строительной механике. М.: АСВ, 2008. 336 с.

откуда при известном моменте может быть найдена ордината границы пластической зоны

$$y_s = \sqrt{3[y_2^2 - M / (b\sigma_s)]}. \quad (9)$$

В слоистой балке уравнение моментов (6) с учетом (7) может быть представлено одной из следующих форм

$$D_{Ie}\kappa + M_p = M \quad \text{или} \quad \chi D_I \kappa = M, \quad (10)$$

где  $D_{Ie}(x, \varepsilon) = \sum_{k=1}^s E_k \int_{h_{ke}(x, \varepsilon)} b_k(x) y^2 dy$  — суммарная изгибная жесткость упругих областей слоистого сечения;

$M_p(x, \varepsilon) = - \sum_{k=1}^s \sigma_{s,k} \int_{h_{kp}(x, \varepsilon)} \text{sgn}(\varepsilon) b_k(x) y dy$  — суммарный момент напряжений, действующих в пластических областях;

$\chi(x, \varepsilon) = (D_{Ie} + \kappa^{-1} M_p) / D_I \leq 1$  — поправочный коэффициент к полной изгибной жесткости  $D_I$ , учитывающий наличие в сечении зон пластичности.

Все три указанные величины вычисляются через интегралы с переменными границами, зависящими от текущего значения кривизны.

Организуя итерационный процесс с параметром  $c = 1, 2, \dots$  последовательного уточнения жесткостных характеристик  $\bar{D}_I^{[c]}$ , пластических моментов  $M_p^{[c]}$  или коэффициентов  $\chi^{[c]}$  в (10), в пределах итерационного шага расчет балки выполним в форме метода сил (в традиционных обозначениях)

$$\delta^{[c]} X^{[c]} + \Delta_F^{[c]} = 0, \quad X^{[c]} = [X_1^{[c]}, \dots, X_n^{[c]}]^T, \quad \delta_{ij}^{[c]} = \int_l \frac{M_i M_j}{\chi^{[c]} D_I} dx,$$

$$\Delta_{iF}^{[c]} = \int_l \frac{M_i M_F}{\chi^{[c]} D_I} dx, \quad \chi^{[c]} = \frac{D_{Ie}^{[c-1]} + M_p^{[c-1]} / \kappa^{[c-1]}}{D_I}, \quad \chi^{[0]} = 1.$$

В системах с лишними связями при значительном развитии пластических деформаций уточнение коэффициентов  $\chi$ , организованное по схеме простой итерации, дает расходящийся процесс. С целью устранения расходимости применяется самообучающийся алгоритм [4], основанный на регулировании длины итерационного шага в направлении вектора невязок (компонент дискретной функции  $\chi(x)$ ).

Рассмотрим особенности упругопластического деформирования и предельных состояний, характерных для балочных систем различных классов, среди которых: однородные и слоистые, призматические и профилированные. Общая расчетная схема балок показана на рис. 1, а при  $l_1 = 2$  м,  $l_2 = 5$  м,  $l_3 = 1$  м,  $y_2 = -y_1 = h/2$ .

**3. Однородные балки постоянного прямоугольного сечения** (рис. 1, а, в). Примем следующие исходные данные:  $b = 50$  мм,  $h = 300$  мм,  $R = 245$  МПа,  $\sigma_s = 245$  МПа,  $E = 206$  ГПа.

Предельная упругая (расчетная) нагрузка, найденная по критерию прочности  $|\sigma(x, y)| \leq R$ , составила  $q_r = 93,6$  кН/м, а максимальные напряжения в сечениях  $b$ ,  $m$ ,  $c$  — 191, 172 и 245 (МПа).

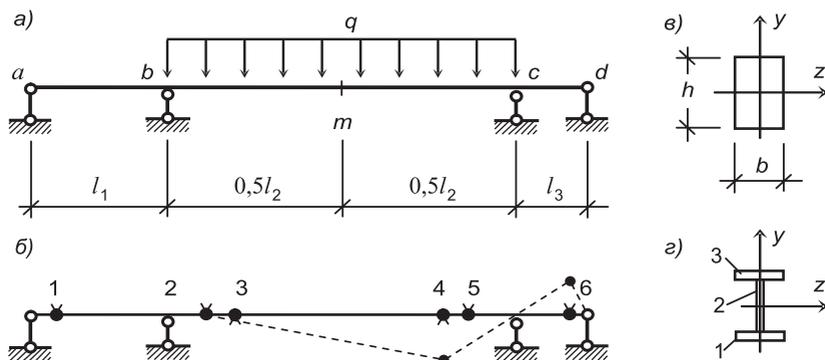


Рис. 1. Расчетная схема балки

Далее по методике, изложенной в п. 2, выполнены расчеты состояний балки при упругопластическом деформировании при действии нагрузок  $q > q_r$ . На рис. 2 для верхней симметричной половины балки изображены границы  $y_s(x)$  зон пластических деформаций, возникающих при  $q = 110, 130, 150, 160, 168$  (кН/м). Первоначально пластические деформации появляются и развиваются в окрестности опоры  $c$ , затем, при  $q > 121$  кН/м — около опоры  $b$ . После нагрузки, равной 133 кН/м, пластичность возникает и в пролете  $bc$ . По мере нагружения в балке происходит перераспределение усилий. Так, отношения модулей изгибающих моментов в сечениях  $b, m, c$  при нагрузках 93,6; 130; 160; 168 (кН/м) составили 0,78:0,70:1; 0,81:0,73:1; 0,94:0,86:1; 0,99:0,94:1 соответственно. В предельном по прочности состоянии при развитии в сечениях  $b, m, c$  пластических шарниров данное отношение выравнивается. Разгрузка материала в пластических зонах не наблюдалась.

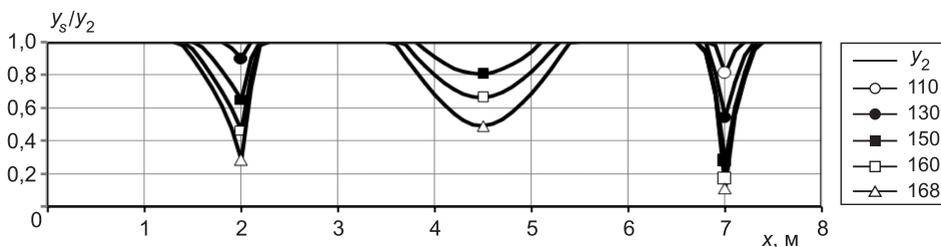


Рис. 2. Границы  $y_s$  зон пластических деформаций в однородной призматической балке при различных уровнях нагрузки (кН/м)

Предельная нагрузка, найденная с помощью теорем предельного равновесия, равна 176,4 кН/м. Для неоднородных плоских рам общего вида схема пластического механизма и предельная нагрузка могут быть определены на основе формализованного матричного метода<sup>5</sup>.

В табл. 1 и на графиках деформирования (рис. 3) для трех проектов балок, обсуждаемых ниже, приведены данные о расчетных  $q_r$  и предельных  $q_u$  нагрузках, массе материала  $G$ , прогибе  $v_m$  в середине пролета  $bc$ . Относительные показатели введены по отношению к соответствующим величинам призматической балки (проект № 0).

В неравнопрочных балках прямоугольного сечения с лишними связями, для которых характерно наличие выраженной фазы перераспределения усилий при упругопластическом деформировании, коэффициент пре-

<sup>5</sup> Мищенко А.В. Предельное равновесие слоистых стержневых систем // Докл. АН ВШ РФ. 2004. № 7. С. 28–33.

Относительные показатели  $Hq$ - и  $Hg$ -проектов профилированных балок

№ проекта	Профилируемая величина	$q_{ri} / q_{r0}$	$q_{ui} / q_{r0}$	$G_i / G_0$	$v_{mi} / v_{m0}$
0	$h = \text{const}$	1,00	1,88	1,00	1,00
1 ( $Hq$ -проект)	$h = \text{var}$	1,00	1,43	0,63	2,37
2 ( $Hg$ -проект)	$h = \text{var}$	2,53	3,81	1,00	0,58

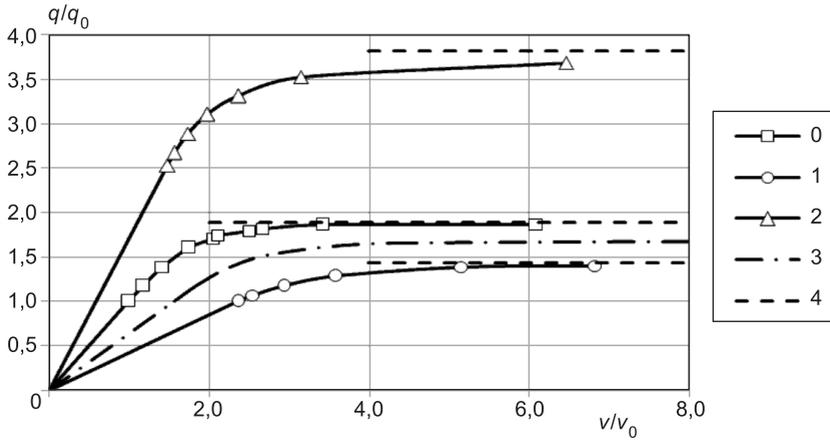


Рис. 3. Графики сопротивления деформированию балок:

(0) — призматической, (1) — с профилированной высотой  $h(x)$  при нагрузке  $q_{r1} = q_{r0}$  ( $Hq$ -проект), (2) — то же при  $G_1 = G_0$  ( $Hg$ -проект); (3) — кусочно-линейное профилирование высоты балки при  $q_{r3} = q_{r0}$ ; (4) — предельные пластические нагрузки

вышения предельной нагрузки по отношению к расчетной составляет 1,88, в отличие от статически определимых, где данный коэффициент равен 1,5.

**4. Однородная балка прямоугольного сечения с рационально профилированной высотой  $h(x)$**  (см. рис. 1, а, в). Форма профилирования балки, загруженной расчетной нагрузкой  $q_r = 93,6$  кН/м, показана на рис. 4 (линия 1). В соответствии с ограничением (5) при  $h_{\min} = 70$  мм балка имеет четыре призматических участка  $h(x) = h_{\min}$  небольшой протяженности в окрестности крайних опор и в пролете  $bc$ , обеспечивающих ее прочность по эквивалентным напряжениям энергетической теории. За исключением этих участков рационально профилированная балка является непрерывно равнопрочной по двуточечному критерию. По отношению к призматической балке ее масса снижена на 37 %, а деформативность при расчетной нагрузке увеличилась на 137 % (см. табл. 1).

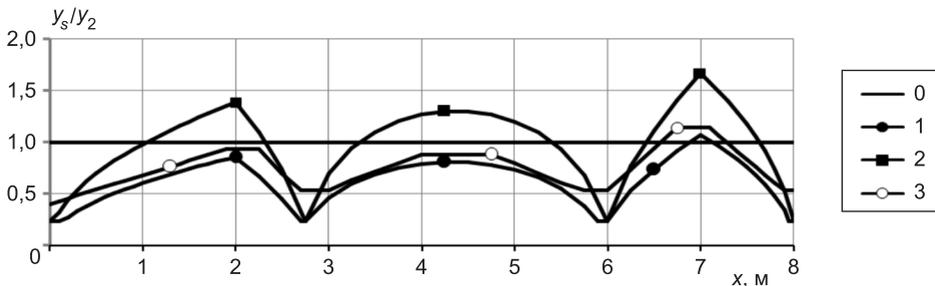


Рис. 4. Формы профилирования высоты балок: призматической (0), рациональной при заданной нагрузке  $q_r$  —  $Hq$ -проект (1), рациональной при заданной массе  $G_0$  —  $Hg$ -проект (2), кусочно-линейная аппроксимация  $Hq$ -проекта (3)

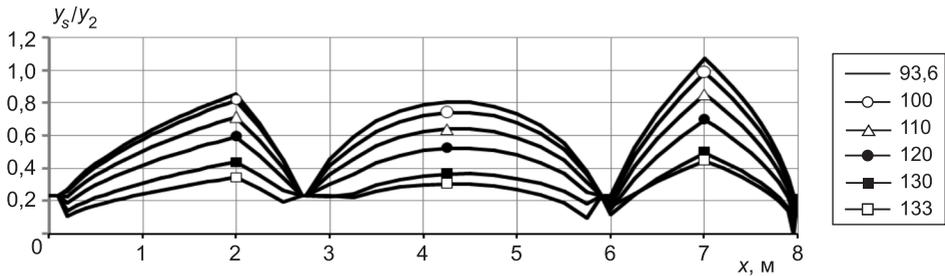


Рис. 5. Границы  $y_s$  зон пластических деформаций в однородной балке с профилированной высотой  $h = 2y_2$  под заданную нагрузку  $q_r$

Процесс деформирования при действии нагрузок, превышающих расчетную, отражает график 1 на рис. 3 и схемы трансформации границ  $y_s(x)$  зон пластических деформаций на рис. 5. Спецификой рационально профилированной балки является появление пластических деформаций сразу во всех сечениях расчетных участков при нагрузках  $q > q_r$  (см. рис. 5).

Для получения границы пластической зоны представим (9) в виде

$$y_s = y_2 \sqrt{3 [1 - M / (b\sigma_s y_2^2)]} \quad (11)$$

и подставим в подкоренное выражение форму рационального профиля балки

$$y_2(x) = \sqrt{\frac{3 M_r(x)}{2 b\sigma_s}}, \quad (12)$$

которая может быть найдена с использованием (9) при условиях  $y_s = y_2$ ,  $M = M_r$ , где  $M_r(x)$  — изгибающий момент, действующий в сечении с координатой  $x$  при расчетной нагрузке  $q_r$ .

Моменты представим в виде  $M(q, x) = ql^2 \overline{M}(q, x)$  с введением безразмерной координатной функции формы  $\overline{M}(q, x)$ , при нелинейном деформировании зависящей также и от уровня нагрузки. В результате выражение пластической границы (11) при действии произвольной нагрузки примет вид

$$y_s(q, x) = y_2(x) \sqrt{3 - \frac{2q}{q_r} f_M(q, x)}. \quad (13)$$

Здесь  $f_M(q, x) = \overline{M} / \overline{M}_r$  — функция отношения форм изгибающих моментов при заданной и расчетной нагрузках. Она принимает значение  $f_M = 1$  в линейно деформируемых системах и при упругопластическом деформировании систем без лишних связей. Для оценки ее отклонения от единицы (степени непропорциональности нагружения) введем критерий

$$D_f(q) = \sqrt{\frac{1}{l} \int_l [f_M(q, x) - 1]^2 dx}.$$

Его значение при действии нагрузки  $q = (1 - \xi)q_r + \xi q_u$  с коэффициентом  $\xi = 0,92$  составило 0,61 для призматической и 0,11 — для балки с профилированной высотой. Как видно, рациональное профилирование балки снижает эффект перераспределения усилий при нелинейном деформировании. На этом основании при умеренном развитии пластичности

( $\xi < 0,8$ ) правомерно принятие  $f_M(q, x) \approx 1$ , что приводит к геометрическому подобию функции профилирования  $y_2(x)$  и упругопластической границы  $y_s(x)$  согласно выражению

$$\left(\frac{y_s}{y_2}\right)^2 = 3 - \frac{2q}{q_r}. \quad (14)$$

На основе формулы (14) может быть выполнен приближенный расчет границы пластической зоны на профилируемых участках в балке прямоугольного сечения.

И формула (13), и вычислительный эксперимент показывают, что по мере роста нагрузки происходит локализация пластических деформаций на границах призматических вставок с профилируемыми участками (сечения 1–6 на рис. 1, б) и в предельном состоянии здесь развиваются пластические шарниры. Минимальной нагрузке  $q_u = 133,9$  кН/м соответствует пластический механизм, показанный пунктиром на рис. 1, б.

Несмотря на то что пластические деформации начинаются сразу после превышения нагрузкой значения  $q_r$ , в силу наличия призматических вставок, профилированная балка имеет существенный запас несущей способности, равный 1,43. Но все же в данной балке, профилированной под заданную нагрузку  $q_r$  ( $Hq$ -профилирование), предельная нагрузка ниже на 24 %, чем в призматической балке (см. табл. 1), что обычно относят к недостаткам равнопрочных конструкций. Однако такое утверждение нельзя признать корректным по той причине, что рассмотренная балка является рациональной и рекомендуется к использованию при нагрузках  $q \leq q_r$ . Основным ее преимуществом является существенное снижение массы — на 37 %. Вместе с тем, очевидно, что сэкономленный материал (частично или полностью) может быть использован для дополнительного усиления балки с применением тех же принципов рационального профилирования. Ясно, что в случае частичного использования этого материала будет получен проект более прочный и легкий по отношению к проекту призматической формы.

Для нахождения профиля таких дополнительно усиленных балок могут быть применены два эквивалентных подхода. В первом из них при сохранении прежнего значения расчетного сопротивления материала  $R$  прикладывается нагрузка  $q_{r2} > q_r$ , а во втором при нагрузке  $q_{r2} = q_r$  балка проектируется на пониженное напряжение  $R_2 \leq R$ . В первом случае необходимо контролировать значение нагрузки, а во втором — расчетного сопротивления, по условию  $G_2 \leq G_r$ . В пределе, при использовании всего сэкономленного материала  $G_2 = G_r$ , полученный проект назовем  $Hg$ -профилированным.

Очертание  $Hg$ -профилированной балки показано на рис. 4 (линия 2). Особенностью и существенным преимуществом данного проекта является повышенная прочность и жесткость. Так, расчетная упругая нагрузка составила  $q_{r2} = 2,53q_r$ , предельная —  $q_{u2} = 2,02q_{u0}$ , а прогиб —  $v_{m2} = 0,58v_{m0}$ . Упругопластическое деформирование отражает график 2 на рис. 3. Повышение прочности и жесткости объясняется рациональным распределением заданной массы материала по пространству балки, что позволяет повышать ее эксплуатационные и экономические показатели.

На рис. 6 приведен график зависимости расчетной упругой нагрузки для профилированной балки в зависимости от массы израсходованного материала. На нем отмечены две точки: нижняя соответствует балке, имеющей расчетную нагрузку  $q_r = q_{r0}$  ( $Hq$ -проект), а верхняя — балке с массой, равной массе  $G_0$  призматической балки ( $Hg$ -проект). Таким образом, для множества точек на кривой, заключенных между указанными точками, расчетная нагрузка и масса находятся в интервалах  $q_r \in [1; 2,55]q_{r0}$ ,  $G \in [0,64; 1]G_0$ . Данные множества точек идентифицируют **рекомендуемые проекты** балок, у которых масса ниже, а расчетная нагрузка выше, чем у призматических.

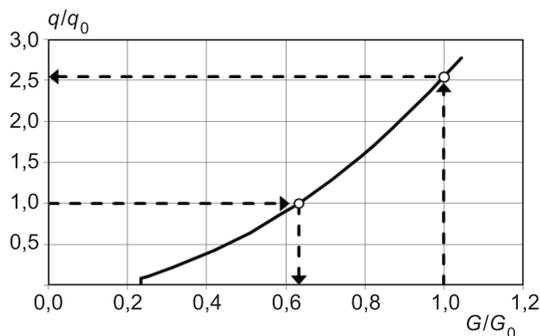


Рис. 6. Зависимость расчетной нагрузки от массы материала профилированной балки  
 $q_0$ ,  $G_0$  — расчетная нагрузка и масса призматической балки

Исследование упругопластического деформирования однородных балок с переменной шириной и неоднородных балок двутаврового сечения рассмотрено в сообщении 2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немировский, Ю.В. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем : моногр. [Текст] / Ю.В. Немировский, А.В. Мищенко, И.Т. Вохмянин. — Новосибирск : НГАСУ, 2004. — 488 с.
2. Мищенко, А.В. Нелинейное деформирование и несущая способность слоистых стержневых систем [Текст] / А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2005. — Т. 11, № 3. — С. 427–445.
3. Немировский, Ю.В. Влияние выбора материалов и структуры конструкции на пластическое деформирование и разрушение слоистых стержневых систем [Текст] / Ю.В. Немировский, А.В. Мищенко // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, ч. 1. — С. 180–183.
4. Мищенко, А.В. Итерационный способ решения нелинейных систем на основе анализа траектории сходимости процесса [Текст] / А.В. Мищенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1988. — № 4. — С. 20–23.

МИЩЕНКО Андрей Викторович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: mavr@hnet.ru  
 Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 27.06.13

Mishchenko Andrey Victorovich, candidate of technical sciences, assistant professor, E-mail: mavr@hnet.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### SPECIFICITY ELASTO-PLASTIC DEFORMATION OF THE HOMOGENEOUS AND LAYERED RATIONALLY PROFILING BEAMS ON EXCEEDING THE DESIGNED INFLUENCE

#### Report 1

Elasto-plastic deformation rationally profiling homogeneous and layered beams on exceeding the designed influence are research. Take up the beams having the variable width of

rectangle and double-T cross-sections. Along with beams, are profiling on the given force, suggest the beams, are profiling on the given volume material. Such beams offers the increased of strength and rigidity be compare with prismatic beams.

Key words: rationally profiling, equal-strength, layered rod, load capacity.

#### REFERENCES

1. Nemirovsky, Yu.V. Rational and optimal design of layered rod structures [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.V. Mishchenko, I.T. Vokhmyanin. — Novosibirsk : NSACEU, 2004. — 488 p.
  2. Mishchenko, A.V. Nonlinear deflection and load capacity of layered rod structures [Text] / A.V. Mishchenko, Yu.V. Nemirovsky // *Mechanics of Composite Materials and Structures*. — 2005. — Vol. 11, N 3. — P. 427–445.
  3. Nemirovsky, Yu.V. Influence of choice materials and constructions structure on plastic deformation and destruction of layered rods and rods system [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.V. Mishchenko // *Physical Mesomechanic*. — 2004. — Vol. 7, pt. 1. — P. 180–183.
  4. Mishchenko, A.V. Iteration solution algorithm of nonlinear systems based on analyse of process convergence curve [Text] / A.V. Mishchenko // *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. — 1988. — N 4. — P. 20–23.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:666.973.6

**В.И. БУЗУЛУКОВ, В.Д. ЧЕРКАСОВ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ,  
Н.П. СЫРКИНА, С.О. ГАРЦЕВА**

### **БЕЛКОВЫЙ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ПЕНОБЕТОНОВ\***

Разработаны условия получения белкового пенообразователя из вторичных продуктов производства этилового спирта для использования в производстве пенобетонных материалов.

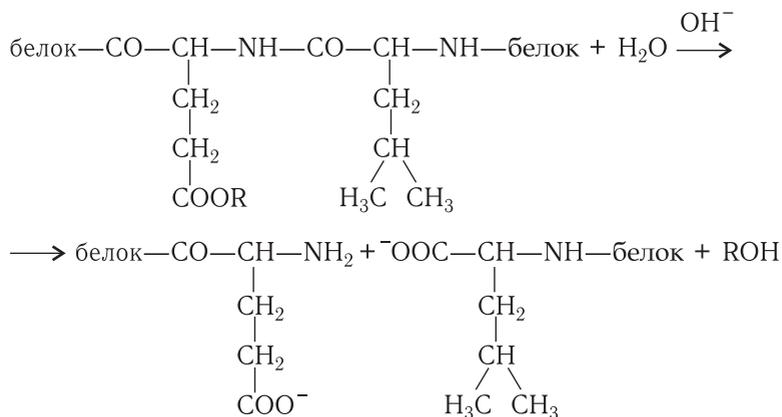
Ключевые слова: послеспиртовая барда, щелочной гидролиз, пенообразователь, пенообразующие свойства, адсорбция, пенобетоны.

В настоящее время, в общем объеме производимых строительных материалов на цементном вяжущем значительно возросла доля пенобетона различного назначения, в связи с чем увеличились и объемы пенообразователей, используемых при их производстве. Наиболее приемлемыми, с точки зрения производственно-технологических, санитарно-гигиенических и экологических требований, остаются пенообразователи, полученные из белоксодержащих веществ животного происхождения, сырьевая база которых весьма ограничена.

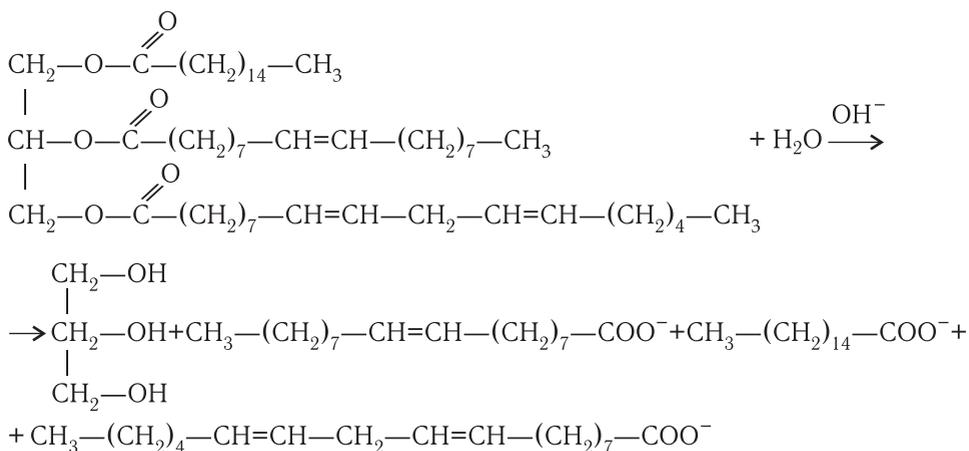
С целью расширения сырьевой базы, а также ассортимента производимых относительно недорогих и экологически безопасных пенообразователей, в настоящей работе приведены результаты исследований по получению белкового пенообразователя из вторичных продуктов производства этилового спирта. Исходным сырьем была послеспиртовая барда, выпускаемая в виде жидкой (ТУ 9296-249-00008064–98) и сухой (ГОСТ Р53098–2008) барды. Ежегодно на предприятиях спиртовой отрасли России в виде отходов образуется около 10 млн т жидкой барды [1], часть которой используется, преимущественно зимой, в качестве корма для крупного рогатого скота, а в летний период сбрасывается в реки и овраги или в пруды-накопители, нанося огромный вред окружающей среде. В то же время, спиртовая барда содержит около 27 % протеинов от массы сухих веществ, которые могут служить исходным сырьем для получения поверхностно-активных веществ строительного назначения. Состав барды существенно зависит от исходного сырья. Так, содержание сухих веществ в жидкой зерновой барде составляет 7–8 %, картофельной — 5 %, меласной — 7,5–10 % [2]. Сухие вещества барды состоят из белков, целлюлозы, декстринов, жира, минеральных и других веществ. Благодаря азотистым веществам дрожжей, содержание белков в сухом веществе барды примерно в 2 раза выше, чем в исходном зерновом сырье. Белковые пенообразователи получают, как правило, путем частичного гидролиза белоксодержащего сырья в присутствии различных щелочей.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания, проект № 7.5055.2011.

Катализируемый ионами гидроксила гидролиз фрагмента белка, образованного, например, глутаминовой кислотой и лейцином, содержание которых в растительных белках наибольшее, можно представить в виде следующей схемы:



Как видно из этой схемы, при неполном гидролизе белков в присутствии ионов гидроксила образуются растворы, преимущественно анионоактивных ПАВ. Гидролиз жиров (глицеридов), содержание которых в полспиртовой барде (ПСБ) около 6,5 мас. % (по сухому веществу), будет идти по следующей схеме:



Таким образом, в процессе гидролиза образуются вещества, имеющие дифильный характер и, следовательно, обладающие поверхностно-активными свойствами.

В спиртовой промышленности ПСБ поставляют потребителям как в виде водной суспензии, так и в виде сухого порошка. В связи с этим были выявлены наиболее оптимальные условия получения пенообразователя из жидкой и сухой ПСБ. Варьировались такие параметры, как температура, продолжительность процесса гидролиза, содержание сухих веществ в водной суспензии и количество гидролизующего компонента. В качестве щелочного компонента испытаны гидроксиды калия, натрия и кальция. Свойства полученного раствора пенообразователя оценивались по таким параметрам, как содержание сухих веществ, кратность, устойчивость и стойкость полученной из этого раствора пены.

В результате исследований установлены наиболее оптимальные соотношения компонентов и условия получения пенообразователя:

- а) вода : ПСБ (жидкое) : гидроксид натрия (по массе) — 100,0 : 6,4 : 2,6;  
б) вода: ПСБ (сухое) : гидроксид натрия (по массе) — 100,0 : 10,0 : 1,8;  
продолжительность гидролиза — 160 мин при температуре среды 93–95 °С.

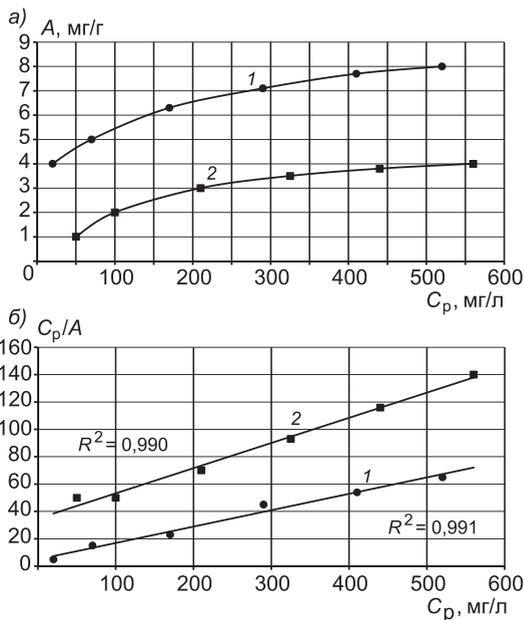
Остаток щелочи в гидролизате нейтрализовывали серной кислотой, доводя рН среды до 8,0 ед. Выбор серной кислоты обусловлен тем, что образующийся сульфат натрия, как известно, является ускорителем схватывания цементных систем, в то время как соли других кислот в основном негативно влияют на свойства конечной продукции. Содержание сухих веществ в гидролизате (по массе) составило при использовании сухой ПСБ — 7,5 %, жидкой ПСБ — 7,1 %. В качестве стабилизатора пены был использован раствор сульфата железа (II). Полученный таким образом пенообразователь, разбавленный водой до 3%-й концентрации (по сухому веществу), имеет кратность 14 ед., водоотделение 0 %, устойчивость более 20 ч.

Кратность определяли как отношение объема пены к объему водного раствора пенообразователя; стойкость — как количество вытекшего раствора из пены за 1 ч (в процентах к исходному количеству взятого для испытания объема пенообразователя); устойчивость — в соответствии ГОСТ 6948–81. Сравнение пенообразующих свойств гидролизатов, полученных из сухой и жидкой ПСБ, показало, что они обладают практически одинаковыми свойствами при равных концентрациях растворов. При получении пенообразователя, с экономической точки зрения, предпочтительнее использовать дешевую жидкую ПСБ.

При изучении влияния содержания сухих веществ в растворе гидролизата на его пенообразующие свойства установлено, что с повышением их концентрации пенообразующая активность возрастает и достигает своего максимального значения при 25 г/л. В этой же области концентраций оказалось и значение ККМ раствора гидролизата, определенное методом электропроводности и методом наибольшего давления пузырька. Исследование свойств веществ, содержащихся в гидролизате, методами УФ- и ИК-спектроскопии показало, что они имеют преимущественно белковую природу: наличие характерной полосы поглощения в области 265 нм, полос Амид-I (1653 см<sup>-1</sup>) и Амид-II (1569 см<sup>-1</sup>) [3]. Установлено, что однократное замораживание-размораживание раствора гидролизата не оказывает влияния на его пенообразующие свойства и качество получаемой пены.

Качество используемых пенообразователей в пенобетонной технологии главным образом определяется взаимодействием функциональных групп молекул пенообразователя с функциональными группами поверхности частиц цемента и наполнителей. С целью выяснения влияния таких взаимодействий на поведение пенообразующих белковых веществ гидролизата в цементных системах, были изучены процессы сорбции этих веществ из водных растворов поверхностью частиц цемента и цеолита, отличающихся зарядом поверхности. На рисунке представлены зависимости величины адсорбции белковых веществ на выбранных адсорбентах от остаточной концентрации белков в контактном растворе.

Из рисунка, а видно, что с увеличением концентрации белковых веществ их адсорбция возрастает, но вид изотерм адсорбции не меняется. При этом в идентичных условиях большая адсорбция происходит на цементных частицах. Полученные изотермы подчиняются уравнению Ленгмюра (см. рисунок, б). Вычисленные значения максимальных величин адсорбции в расчете на единицу массы составили: 8,2 мг/г для цемента и 5,5 мг/г для цеолита. Разли-



Изотермы адсорбции белковых веществ поверхностью:

1 — цемента; 2 — цеолита

молекул при их диссоциации в воде по сравнению с водородными связями, возникающими между пептидной группой  $-\text{CO}-\text{NH}-$  молекул белка и поверхностью адсорбента [4]. Несмотря на разницу в максимальных величинах адсорбции, их численные значения невелики по сравнению с адсорбцией негидролизированных белков [4], что свидетельствует о слабой адсорбции белковых продуктов гидролизата на выбранных адсорбентах. По-видимому, это характерно для белковых ПАВ, обладающих преимущественно пенообразующими свойствами. Изменение концентрации белковых продуктов в ходе адсорбции определяли спектрофотометрическим методом. Величину адсорбции вычисляли по разнице концентраций белков в растворе до и после адсорбции.

Для того чтобы использовать гидролизат в качестве пенообразователя для получения пенобетона, кроме кратности и устойчивости пены, нужно выяснить ее совместимость с цементной системой, которая оценивается коэффициентом стойкости пены в цементном тесте. Лабораторные испытания показали малую усадку цементной массы в присутствии щелочного гидролизата, а коэффициент стойкости пены в цементном тесте оказался равным 0,90, т. е. качество пены хорошее.

Предварительные опыты по влиянию полученного пенообразователя и известного пенообразователя «Пеностром» на прочность пенобетона при сжатии плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  показали идентичные результаты. Следует отметить, что использование в качестве гидролизующего агента гидроксида кальция позволяет получить из гидролизата ПСБ более высокочастотную пену, но менее устойчивую в цементном тесте.

Таким образом, на основании вышеизложенных данных можно заключить, что из послеспиртовой барды путем ее щелочного гидролиза можно получить пенообразователь, который по своим пенообразующим свойствам может использоваться в производстве неавтоклавных пенобетонов.

чие в значениях максимальной величины адсорбции можно объяснить тем, что в процессе гидролиза ПСБ в присутствии ионов гидроксидов, как отмечено выше, преимущественно образуются анионоактивные ПАВ, которые в водном растворе заряжены отрицательно. Поверхность цемента и продукты его гидратации заряжены положительно, что обусловлено адсорбцией ионов кальция, поэтому и величина максимальной адсорбции выше. Поверхность же цеолита, наоборот, в водном растворе заряжена отрицательно.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что на процессы адсорбции фрагментов гидролизированных молекул белков большее влияние оказывает знак заряда, образующийся в концевой части

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ненайденко, Г.Н. Послеспиртовая барда в качестве органического удобрения [Текст] / Г.Н. Ненайденко, О.С. Журба, В.Д. Шереверов // Ликероводоч. пр-во и виноделие. — 2008. — № 7. — С. 12–15.
2. Яровенко, В.Л. Технология спирта [Текст] / В.Л. Яровенко, В.А. Маринченко, В.А. Смирнов. — М. : Колос, 2002. — 465 с.
3. Овчинников, Ю.А. Новые методы анализа аминокислот, пептидов и белков [Текст] / Ю.А. Овчинников. — М. : Мир, 1974. — 253 с.
4. Чухрай, Е.С. Особенности изотерм адсорбции белков на кремнеземных адсорбентах [Текст] / Е.С. Чухрай, Л.С. Атякшева, О.С. Пилипенко // Журн. физ. химии. — 2011. — Т. 85, № 5. — С. 979–986.

*БУЗУЛУКОВ Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: buzulukov-v@mail.ru*

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

*ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: cherkasov-vd@yandex.ru*

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

*ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Иванович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: emeljanovai@list.ru*

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

*СЫРКИНА Наталья Петровна, инж.*

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

*ГАРЦЕВА Светлана Олеговна, студ.*

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

Получено 09.06.13

**Buzulukov Victor Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: buzulukov-v@mail.ru, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Cherkasov Vasilij Dmitrievich**, corresponding member of RAACS, doctor of technical sciences, professor; E-mail: cherkasov-vd@yandex.ru, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Emeljanov Alexey Ivanovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: emeljanovai@list.ru, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Syrkina Natalia Petrovna**, engineer, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

**Garceva Svetlana Olegovna**, student, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

## PROTEINACEOUS FROTHER FOR FOAM CONCRETES

Carried out to develop the conditions of production of a protein foam-products of ethanol production for use in the manufacture of foam concrete materials.

Key words: distillers grains, alkaline hydrolysis, a foaming agent, foaming properties, adsorption, foam concrete.

## REFERENCES

1. N e n a j d e n k o, G.N. Distillers grains as organic fertilizer [Text] / G.N. Nenajdenko, O.S. Jurba, V.D. Shereverov // Liquors production and wine making. — 2008. — N 7. — P. 12–15.
2. Y a r o v e n k o, V.L. Technology in alcohol [Text] / V.L.Yarovenko, V.A. Marinchenko, V.A. Smirnov. — M. : Kolos, 2002. — 465 p.
3. O v c h i n n i k o v, Yu.A. New methods for the analysis of amino acids, peptides and proteins [Text] / Yu.A. Ovchinnikov. — M. : World, 1974. — 253 p.
4. C h u k h r a y, E.S. Features of the adsorption isotherms of proteins on silica adsorbents [Text] / E.S. Chukhray, L.S. Atyakшева, O.S. Pylypenko // J. phys. chemi. — 2011. — Vol. 85, N 5. — P. 979–986.

УДК 691.42:666.31

В.З. АБДРАХИМОВ, А.В. КОЛПАКОВ

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Для сокращения времени сушки кирпича в качестве отощителя целесообразно использовать кальцийсодержащие отходы черной металлургии и карбонатный шлак, а в качестве глинистого компонента — межсланцевую глину (отход добычи горючих сланцев). Лучшие показатели имеет керамический кирпич, в состав которого входили кальцийсодержащие нанотехногенные материалы. Карбонатный шлак техногенного происхождения с наноразмерностью от 100 до 200 нм повышает марку кирпича до М200.

**Ключевые слова:** отходы черной металлургии, карбонатный шлак, наноразмерность, керамический кирпич, межсланцевая глина, промышленные отходы, экология, температура обжига, физико-механические показатели.

Производство керамических материалов — одна из самых материалоемких отраслей народного хозяйства, поэтому рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором ее успешного развития в условиях проводимой экономической реформы. В связи с этим использование в керамических материалах отходов производств приобретает особую актуальность<sup>1</sup>.

Цель работы: получение керамического кирпича из отходов производств без применения природного традиционного сырья.

Для производства керамического кирпича в качестве отощителя использовались отходы черной металлургии, а в качестве глинистого компонента — межсланцевая глина. Химические составы сырьевых материалов представлены в табл. 1, 2.

В исследуемых компонентах повышенное содержание оксида кальция: в глинистом более 10 %, а в отощителях более 35 %. Наибольшее содержание оксида кальция в карбонатном шлаке (46,5 %, см. табл. 1). Кроме того, как видно из табл. 2, в межсланцевой глине повышенное содержание углерода, что будет способствовать обжигу керамического материала изнутри<sup>1</sup>.

Отощающие материалы вводят в керамические массы для уменьшения усадки и деформации изделий при сушке<sup>2</sup>. С увеличением содержания отощающих материалов облегчается перемещение влаги из глубинных слоев к поверхности, сокращаются продолжительность и стоимость сушки.

Особый интерес представляют сведения, касающиеся использования в керамических массах в качестве отощителя металлургических шлаков отходов черной металлургии. Техногенное сырье с повышенным содержа-

<sup>1</sup> Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов Д.В., Абдрахимов А.В. Применение техногенного сырья в производстве кирпича и черепицы. СПб.: Недра, 2004. 126 с.

<sup>2</sup> Абдрахимов В.З. Вопросы экологии и утилизации техногенных отходов в производстве керамических композиционных материалов. Самара: Самар. акад. гос. и муницип. упр., 2010. 160 с.

Таблица 1

**Химический состав сырьевых материалов, мас. %**

Отход	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	П.п.п.
Металлургический шлак от выплавки серого чугуна (г. Челябинск)	38,35	11,40	0,55	38,39	7,69	1,29	1,88	—
Металлургический шлак от выплавки белого чугуна (г. Магнитогорск)	36,34	14,50	0,61	40,11	5,26	1,66	—	—
Шлак от выплавки чугуна (г. Нижний Тагил)	32,32	19,38	1,01	39,05	6,07	1,00	—	—
Шлак от выплавки ферросплавов (г. Серов)	34,24	9,40	0,48	45,18	8,87	0,98	—	—
Карбонатный шлам	20,50	1,24	1,53	46,50	7,05	0,20	—	21,08
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	0,42	9–20

Таблица 2

**Поэлементный анализ сырьевых материалов, мас. %**

Отход	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Металлургический шлак от выплавки серого чугуна	—	51,12	0,10	2,70	5,86	14,35	—	0,09	25,60	0,09
Металлургический шлак от выплавки белого чугуна	—	50,13	0,12	1,82	7,45	13,60	—	0,08	26,70	0,10
Шлак от выплавки чугуна	—	49,67	0,09	2,03	9,97	12,08	—	0,05	26,00	0,11
Шлак от выплавки ферросплавов	—	49,12	0,07	3,07	4,83	12,80	—	0,04	30,00	0,07
Карбонатный шлам	—	43,70	—	0,52	0,06	5,00	—	—	50,60	0,07
Межсланцевая глина	7,73	50,06	0,46	1,04	7,20	17,66	1,83	1,75	10,53	3,35

нием оксида кальция (CaO > 35 %) помимо уменьшения чувствительности глин к сушке интенсифицирует процессы обжига кирпича (снижает температуру обжига)<sup>2</sup>.

Известно, что CaO, несмотря на высокую температуру плавления, в глинодержащих массах является сильным плавнем вследствие образования с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> сравнительно легкоплавких соединений<sup>2</sup>. При температурах около 1000 °С взаимодействие между CaO и глинистыми веществами незначительно, при более высоких температурах реакция интенсифицируется, образуются уплотняющие легкоплавкие соединения эвтектики и стекла.

Гранулометрический состав отходов черной металлургии представлен в табл. 3, а плотность, температура начала и полного плавления — в табл. 4. В отходах цветной металлургии в основном присутствуют фрак-

Таблица 3

**Гранулометрический состав отходов черной металлургии, %**

Компонент	Содержание фракций, мм				
	< 0,315	0,315–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	> 2,5
Металлургический шлак от выплавки серого чугуна	11,8	25,9	29,8	28,7	3,8
Металлургический шлак от выплавки белого чугуна	10,5	24,7	25,7	32,8	6,3
Шлак от выплавки чугуна	11,8	25,8	27,3	31,1	4,0
Шлак от выплавки ферросплавов	12,1	24,8	26,7	32,8	3,6

**Плотности, температуры начала и полного плавления отходов  
черной металлургии (шлаков)**

Компонент	Плотность, г/см <sup>3</sup>			Огнеупорность, °С	
	истинная	средняя	насыпная	начало плавления	полное плавление
Металлургический шлак от выплавки серого чугуна	2,9–3,1	2,4–2,7	1,9–2,2	1200–1220	1250–1270
Металлургический шлак от выплавки белого чугуна	2,95–3,15	2,45–2,70	1,95–2,25	1200–1250	1270–1280
Шлак от выплавки чугуна	3,0–3,3	2,7–2,8	2,1–2,3	1230–1250	1270–1300
Шлак от выплавки ферросплавов	2,8–3,0	2,2–2,4	1,8–2,0	1210–1230	1270–1300

ции размером 0,63–1,25 и 1,25–2,50 мм (более 50 %). Содержание крупных фракций размером более 2,5 мм в исследуемых компонентах незначительно. Отсутствие крупных фракций в отходах черной металлургии позволит исключить в технологической схеме производства кирпича грубое дробление (измельчение), что будет способствовать созданию энерго-, ресурсосберегающей технологии.

Рентгенофазовый состав исследуемых сырьевых компонентов проводился на дифрактометре ДРОН-6 с использованием СоК $\alpha$ -излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град./мин.

На дифрактограмме порошка металлургического шлака от выплавки серого чугуна (рис. 1, а) отмечается присутствие характерных интенсивных линий кварца ( $d/n = 0,181; 0,334$  и  $0,424$  нм), псевдоволластонита ( $d/n = 0,199$  и  $0,570$  нм), монтичеллита ( $d/n = 0,256$  нм) и анортита ( $d/n = 0,321$  и  $0,483$  нм).

Как было выше отмечено, в металлургическом шлаке от выплавки серого чугуна повышенное содержание оксидов кальция (СаО — 38,39 %, см. табл. 1) и магния (MgO — 7,69 %, см. табл. 1). Известно, что повышенное содержание в материалах СаО способствует образованию  $\alpha$ -СаО · SiO<sub>2</sub> (псевдоволластонит) и при наличии Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — СаО · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub> (анортит), а повышенное содержание СаО и MgO — СаО · MgO · SiO<sub>2</sub> (монтичеллит)<sup>2</sup>.

На дифрактограмме порошка металлургического шлака от выплавки белого чугуна (рис. 1, б) присутствуют характерные интенсивные линии кварца ( $d/n = 0,181; 0,245$  и  $0,334$  нм), псевдоволластонита ( $d/n = 0,199; 0,280; 0,437$  и  $0,570$  нм), монтичеллита ( $d/n = 0,383$  нм) и анортита ( $d/n = 0,483$  нм).

На дифрактограмме порошка шлака от выплавки чугуна (рис. 1, в) отмечается присутствие характерных интенсивных линий кварца ( $d/n = 0,181$  и  $0,334$  нм), псевдоволластонита ( $d/n = 0,199$  и  $0,570$  нм), муллита ( $d/n = 0,270$  нм) и анортита ( $d/n = 0,321; 0,420$  и  $0,483$  нм).

В шлаках от выплавки чугуна, в отличие от металлургических шлаков от выплавки серого и белого чугуна, монтичеллит не образуется, а формируется муллит. Образование муллита, видимо, связано с повышенным содержанием в шлаках от выплавки чугуна оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–19,38 %, см. табл. 1).

На дифрактограмме порошка шлака от выплавки ферросплавов (рис. 1, г) отмечаются характерные интенсивные линии кварца ( $d/n = 0,181; 0,245$  и  $0,334$  нм), псевдоволластонита ( $d/n = 0,199; 0,342;$

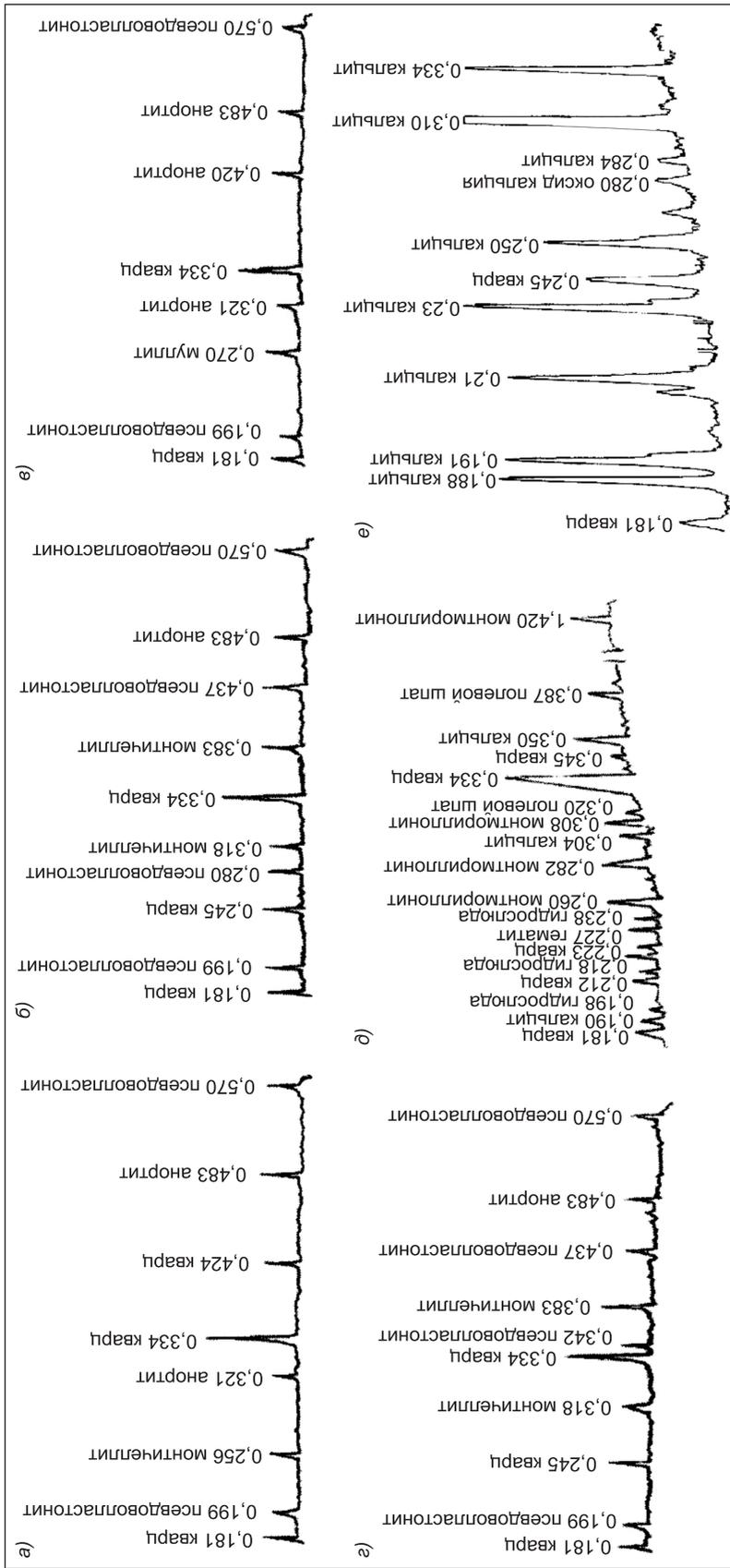


Рис. 1. Рентгенограммы компонентов

а — металлургический шлак от выплавки серого чугуна; б — металлургический шлак от выплавки белого чугуна; в — шлак от выплавки чугуна; г — шлак от выплавки ферросплава; д — межсланцевая глина; е — карбонатный шлак

0,437 и 0,570 нм), монтичеллита ( $d/n = 0,318$  и  $0,383$  нм) и анортита ( $d/n = 0,483$  нм).

На дифрактограмме порошка межсланцевой глины (рис. 1, *д*) присутствуют интенсивные линии кварца ( $d/n = 0,181$ ;  $0,223$ ;  $0,334$  и  $0,345$  нм), кальцита ( $d/n = 0,190$ ;  $0,304$  и  $0,350$  нм), гидрослюды ( $d/n = 0,198$ ;  $0,218$  и  $0,238$  нм), монтмориллонита ( $d/n = 0,260$ ;  $0,282$ ;  $0,308$  и  $1,420$  нм), гематита ( $d/n = 0,227$  нм) и полевого шпата ( $d/n = 0,320$  и  $0,387$  нм).

На дифрактограмме порошка карбонатного шлама (рис. 1, *е*) отмечаются характерные интенсивные линии кварца ( $d/n = 0,181$  и  $0,245$  нм), кальцита ( $d/n = 0,188$ ;  $0,191$ ;  $0,210$ ;  $0,230$ ;  $0,250$ ;  $0,284$ ;  $0,310$  и  $0,334$  нм), оксида кальция ( $d/n = 0,280$  нм).

Ранее в работе [1] было показано, что для повышения морозостойкости и снижения усадки кирпича в керамические массы целесообразно вводить карбонатный шлам, микроструктура которого представлена на рис. 2, *а, б*. Данные шламовые отходы отличаются от высокодисперсных порошкообразных материалов природного и техногенного происхождения наноразмерностью, которая находится в пределах от 80 до 3000 нм и зависит от условий образования<sup>2</sup>. Наличие карбоната кальция в тонкодисперсном состоянии делает сырье менее чувствительным к сушке, т.е. уменьшает трещинообразование кирпича [1].

Для анализа размера частиц исследуемого карбонатного шлама был проведен металлографический анализ на микроскопе МИН-8М при увеличении в 200 раз. Частицы карбонатного шлама растворялись в спирте, наносились на стекло и фотографировались. Для того чтобы определить

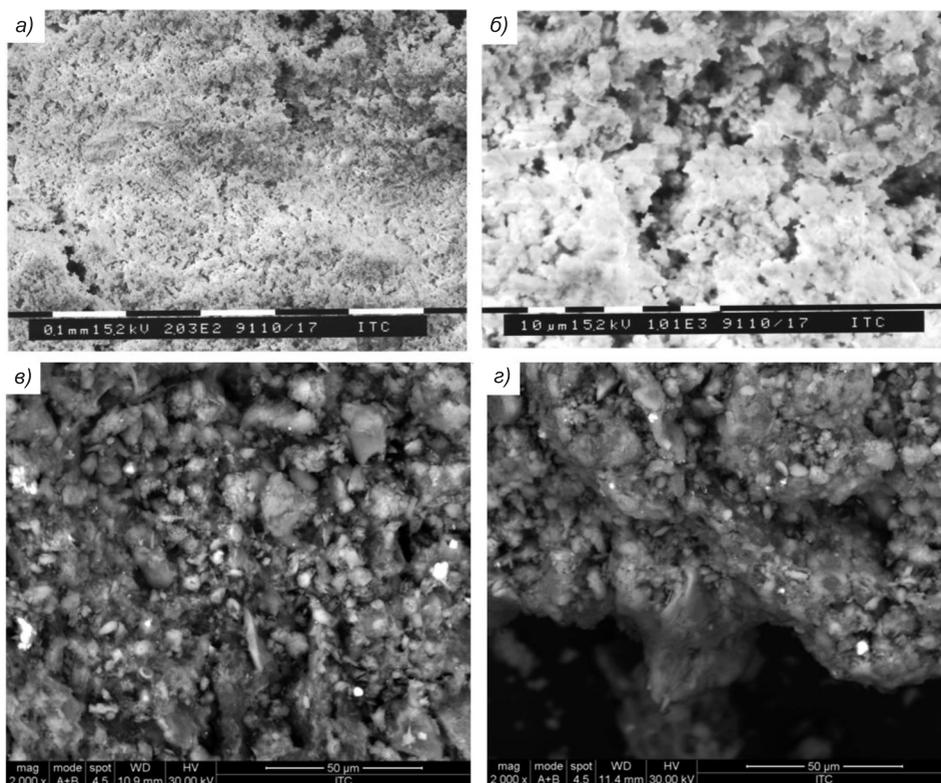


Рис. 2. Микроструктура образцов карбонатного шлама (*а, б*) и межсланцевой глины (*в, г*)  
Увеличение: *а* —  $\times 500$ , *б* —  $\times 1000$ , *в* —  $\times 2000$ , *г* —  $\times 2000$

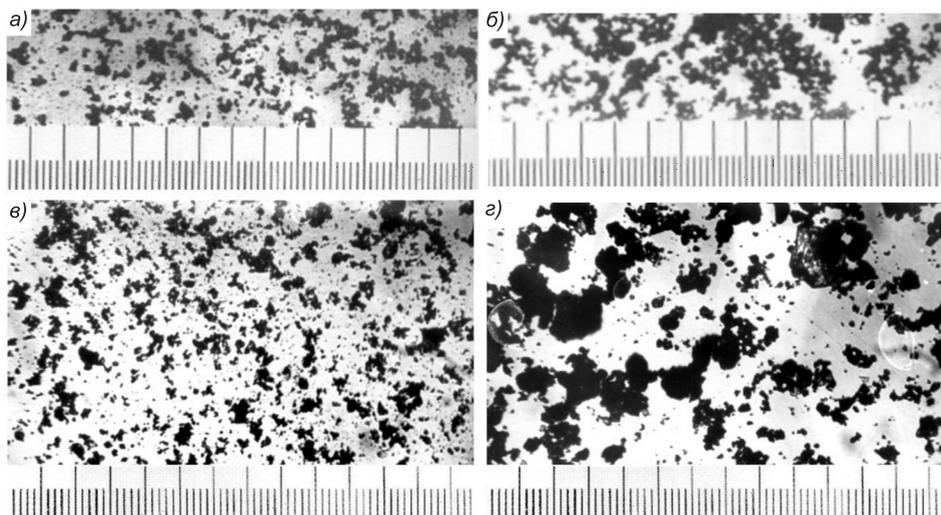


Рис. 3. Металлографический анализ карбонатного шлама (а, б) и межсланцевой глины (в, з)

точно размеры частиц, было заснято несколько участков объекта. Используя шкалу объекта микрометра (1 дел. = 0,001 мм), можно определить средний размер частиц карбонатного шлама. Средний размер частиц 0,0001–0,0003 мм (0,1–0,3 мкм, рис. 3).

В качестве глинистого компонента для производства керамического кирпича применялась межсланцевая глина<sup>3</sup>, которая образуется при добыче горючих сланцев. По числу пластичности она относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. На рис. 1, д представлена рентгенограмма межсланцевой глины, на рис. 2, в, з — ее микроструктура. Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюда, монтмориллонита и кальцита.

Для анализа размера частиц исследуемой межсланцевой глины, как и для карбонатного шлама, был проведен металлографический анализ на микроскопе МИН-8М при увеличении в 200 раз (рис. 3, в, з). В образцах много крупных включений (размером более 2–5 мкм).

В работе [2] было указано, что введение в составы керамических масс кальцийсодержащих металлургических шлаков до 25 % улучшает физико-механические показатели кирпича, а дальнейшее увеличение его содержания приводит к снижению показателей. Таким образом, исследования [2] показали, что оптимальное количество кальцийсодержащих металлургических шлаков в составах керамических масс должно составлять 25 %.

Для изучения влияния отходов черной металлургии и карбонатного шлама на физико-механические показатели кирпича были исследованы составы, приведенные в табл. 5.

Составы керамических масс готовили пластическим способом формования при влажности шихты 22 %. Сформованные кирпичи высушивались до остаточной влажности не более 8 %. Высушенный кирпич при ускоренной сушке (36 ч, вместо 52) не имел трещин, что свидетельствует

<sup>3</sup> Колпаков А.В., Абдрахимов В.З. Исследование коэффициента вспучивания и фазового состава на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой и бейделлитовой глины // Строительство и реконструкция. 2012. № 5. С. 50–58.

Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, %				
	1	2	3	4	5
Металлургический шлак от выплавки серого чугуна	25				
Металлургический шлак от выплавки белого чугуна		25			
Шлак от выплавки чугуна			25		
Шлак от выплавки ферросплавов				25	
Карбонатный шлак					25
Межсланцевая глина	75	75	75	75	75

о снижении чувствительности шихты к сушке при использовании в составах керамических масс отходов черной металлургии. Чувствительность к сушке всех пяти составов более 200 с, т.е. составы не чувствительны к сушке. Высушенный кирпич обжигался при температуре 1050 °С.

При обжиге керамического кирпича образуется алюмосиликатный расплав, который в соответствии с современными представлениями состоит из простых катионов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  и т.д.) и сложных анионных комплексов типа  $Si_xAl_yO_z$  [2, 3]. Кремний и алюмоокислородные анионы, будучи крупными агрегатами, образуют большие и малоподвижные комплексы, вследствие чего алюмосиликатные расплавы имеют высокую вязкость [2, 3]. Катионы  $Ca^{++}$  способствуют частичному переходу  $AlO_4$  в  $AlO_6$  и не создают условий возникновению комплексов групп  $AlO_4$  и  $SiO_4$  [1]. Поскольку некоторая часть  $CaO$ , введенная с металлургическим шлаком, переходит в расплав, размер и сложность комплексных анионов уменьшается. Изменение строения расплава сопровождается усилением спекания. Однако при повышении содержания металлургического шлака в массе более 25 % спекание вновь начинает ухудшаться. Это объясняется тем, что увеличение содержания  $CaO$  в массе значительно интенсифицирует кристаллизацию анортита (рис. 4) [2, 4].

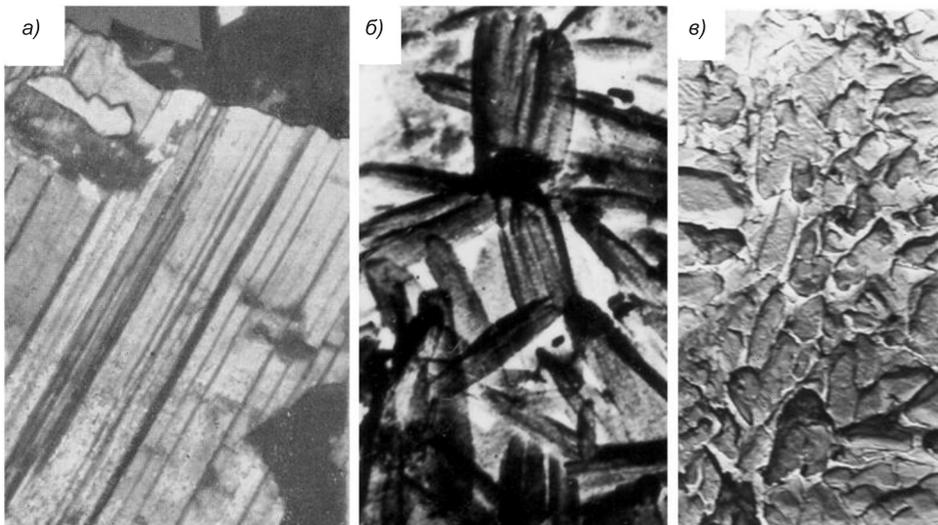


Рис. 4. Включения анортита

*a* — крупный кристалл в виде табличек с полисинтетическими двойниками; *b* — анортит удлиненно-призматической формы; *v* — короткопризматический анортит  
Увеличение: *a* —  $\times 600$ ; *b* —  $\times 12000$ ; *v* —  $\times 15000$

Физико-механические показатели кирпича приведены в табл. 6. Кирпичи, полученные из представленных составов без применения традиционных природных материалов и обожженные при температуре 1050 °С, имеют марку не ниже М150, что позволяет из этого кирпича строить здания выше пяти этажей. Наиболее оптимальным составом является состав № 5, содержащий карбонатный шлам.

Таблица 6

**Физико-механические показатели образцов**

Показатель	Состав				
	1	2	3	4	5
Водопоглощение, %	10,5	9,8	9,9	10,5	9,2
Предел прочности при сжатии, МПа	15,4	16,8	17,7	15,2	20,8
Предел прочности при изгибе, МПа	2,2	2,5	2,7	2,2	3,1
Морозостойкость, циклы	38	42	45	33	98

Карбонатный шлам водоумягчения с дисперсностью 80–200 нм — один из представителей нанотехногенного сырья. Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды и уменьшению объема капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности керамической массы.

Таким образом, для снижения чувствительности шихты к сушке, сокращения времени сушки кирпича-сырца в качестве отошителя при производстве кирпича без применения природных традиционных сырьевых материалов целесообразно использовать кальцийсодержащие отходы черной металлургии, а в качестве глинистого компонента — межсланцевую глину (отход добычи горючих сланцев). Лучшие показатели имеет керамический кирпич, в состав которого входили кальцийсодержащие нанотехногенные материалы. Карбонатный шлам техногенного происхождения с наноразмерностью от 100 до 200 нм повышает марку кирпича до М200.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахимов, В.З. Экологические и технологические принципы использования золошлакового материала и карбонатного шлама для производства высокомарочного кирпича в Самарской области [Текст] / В.З. Абдрахимов. — Самара : Самар. гос. архитектурно-строит. ун-т, 2009. — 164 с.
2. Абдрахимов, В.З. Экологические и практические аспекты совместного использования отходов черной металлургии и энергетики [Текст] / В.З. Абдрахимов // Энергия : экономика, техника, экология. — 2011. — № 10. — С. 34–39.
3. Куколев, Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов [Текст] / Г.В. Куколев. — М. : Высш. шк., 1965. — 364 с.
4. Литвинова, Т.И. Петрография неметаллических включений [Текст] / Т.И. Литвинова, В.П. Пирожкова, А.К. Петров. — М. : Металлургия, 1972. — 184 с.

*АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru*

*Самарская академия государственного и муниципального управления КОЛПАКОВ Александр Викторович, асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru*  
*Самарская академия государственного и муниципального управления*

Получено после доработки 03.06.13

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia  
**Kolpakov Alexandr Viktorovich**, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

## **ECOLOGICAL, THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF CALCIUM-CONTAINING WASTE USING IN PRODUCTION OF CERAMIC MATERIALS**

It is advisable to use calcium-containing waste of ferrous metallurgy and carbonate sludge as nonplastic material to shorten the drying bricks and to use intershale clay (miming waste of oil shale) as a clayey component. A ceramic brick which calcium-containing nanotechnogenic materials were used in composition has the best properties. Carbonate sludge of technogenic origin with nanoscale dimensionality from 100 to 200 nm increases the grade of brick to M200.

**Key words:** waste of ferrous metallurgy, carbonate sludge, nanoscale dimensionality, ceramic brick intershale clay, industrial waste, ecology, burning temperature, physical and mechanical properties.

### REFERENCES

1. Abdrakhimov, V.Z. Ecological and technological principles of cinder material and carbonate sludge use to produce of high-strength brick in Samara Region [Text] / V.Z. Abdrakhimov. — Samara : Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2009. — 164 p.
2. Abdrakhimov, V.Z. Ecological and practical aspects of combined use of ferrous metallurgy and power industry waste [Text] / V.Z. Abdrakhimov // Energy : economy, technique, ecology. — 2011. — N 10. — P. 34–39.
3. Kukolev, G.V. Silicon chemistry and physical chemistry of silicates [Text] / G.V. Kukolev. — M. : High School, 1965. — 364 p.
4. Litvinova, T.I. Petrology of nonmetallic inclusions [Text] / T.I. Litvinova, V.P. Pirozhkova, A.K. Petrov. — M. : Metallurgia, 1972. — 184 p.

УДК 691.619:699.86

А.С. НИКОНОВ, Ю.Т. ПАНОВ

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Разработан комбинированный газообразователь для получения теплоизоляционного материала на основе отходов стекольной промышленности с пониженной плотностью, изучены его эксплуатационные свойства.

**Ключевые слова:** неорганический теплоизоляционный материал, отходы стекольной промышленности, морозостойкость, коэффициент теплопроводности, прочность.

В решении проблем энергосбережения, ставшей наиболее актуальной в настоящее время, а также для повышения эффективности использования помещений промышленного и коммунального фонда, немаловажную роль играет утепление ограждающих конструкций зданий, сооружений, трубопроводов и промышленных установок. Строительная отрасль испытывает острую нехватку в современных теплоизоляционных материалах. В строительстве и реконструкции энергосберегающего жилья крайне необходимы новые эффективные, долговечные, а самое главное безопасные теплоизоляционные материалы. Одним из таких материалов является пеностекло — высокопористый, неорганический, теплоизоляционный материал, получаемый спеканием тонкоизмельченного стекла в присутствии газообразователя и целевых добавок, при температуре 750 °С [1].

Применяемые утеплители на основе полимеров и минеральных волокон имеют ряд недостатков и уступают пеностеклу по безопасности и долговечности. Минераловатные утеплители подвержены активному воздействию влаги, имеют низкую гидрофобность, повышенный коэффициент сорбционной влажности, что значительно снижает срок службы теплоизоляционного слоя. Они характеризуются изменением геометрических форм в период эксплуатации ограждающей конструкции [2]. Утеплители на основе полимерных материалов обладают высоким коэффициентом теплопроводности, но подвержены термической деструкции и распаду при высокой температуре, что приводит к полному разрушению материала за короткий период эксплуатации. Кроме того, они характеризуются высоким классом горючести, а продукты горения особо токсичны [3].

Производимое за рубежом черное пеностекло имеет запах сероводорода, что значительно ограничивает его применение в жилищном строительстве. Наличие запаха связано с использованием в процессе получения пеностекла газообразователя углеродного типа (сажа, кокс, антрацит). Минимальная плотность этого материала 200 кг/м<sup>3</sup>.

На кафедре полимерных материалов Владимирского государственного университета был разработан неорганический теплоизоляционный

материал с плотностью 80–100 кг/м<sup>3</sup> на основе измельченного стекла. Целью данной работы являлось изучение эксплуатационных свойств пористого теплоизоляционного материала с кажущейся плотностью до 80 кг/м<sup>3</sup>.

В работе использовался стеклобой отходов листового стекла, размолотого в вибрационной мельнице до удельной поверхности 5000–8000 см<sup>2</sup>/г и имеющего постоянный химический состав, %: SiO<sub>2</sub> — 71,25; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 1,87; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,29; CaO — 8,0; MgO — 3,25; Na<sub>2</sub>O — 15,64, что способствует снижению объемов брака при производстве. Применение измельченного стеклобоя наряду с вопросом тепловой изоляции решает весьма актуальную задачу утилизации постоянно растущих объемов отходов стекольной промышленности.

Композиция для вспенивания готовилась путем смешения и дополнительного измельчения необходимого количества ингредиентов в вибрационной мельнице. Вспенивание осуществлялось в муфельной печи при температуре 720±10 °С.

Экспериментальным путем установлено (табл. 1), что применение в качестве газообразователя индивидуальных веществ не позволяет получить пеностекло низкой плотности и с качественной структурой. Так, использование карбоната кальция в виде тонко измельченного мела дает возможность получить материал с плотностью до 500 кг/м<sup>3</sup>, а применение нитрата натрия — около 200 кг/м<sup>3</sup>. В то же время использование в качестве газообразователя смеси этих двух веществ позволило получить материал с плотностью до 80 кг/м<sup>3</sup> с равномерной мелкоячеистой структурой со средним размером пор 0,9 мм.

По нашему мнению, низкая кажущаяся плотность объясняется тем, что при получении пеноматериала выделение газа происходит в широком

Таблица 1

**Влияние вида и количества газообразователей на свойства пеностекла**

Газообразователь	Кол-во, мас.ч.	t разлож., °С	Свойства пеностекла	
			прочность, МПа	плотность, кг/м <sup>3</sup>
<i>Известная композиция [4]</i>				
С (углерод), %				
1	1,24	700–800	3,0	400
2	2,52		1,8	250
3	3,82		1,5	170
<i>Исследуемые композиции</i>				
NaNO <sub>3</sub> (нитрат натрия), %				
1	1,24	400	—	200
2	2,52			145
3	3,82			120
CaCO <sub>3</sub> (мел), %				
1	1,24	800	—	470
2	2,52			430
3	3,82			415
CaCO <sub>3</sub> +NaNO <sub>3</sub> , %				
1,8+0,4	1:0,22	400–800	1,2	110
1,6+0,6	1:0,37		1,0	80
1,2+1	1:0,83		1,4	130

интервале температур, от 400 до 800 °С. При этом, как видно из табл. 1, оптимальным является использование 2,2 массовых частей смеси газообразователей при их соотношении (мас.ч.)  $\text{CaCO}_3 : \text{NaNO}_3 = 1 : 0,37$ . Предварительные эксперименты показали, что разработанный теплоизоляционный материал обладает высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами.

Реальное использование предполагает изучение ряда других показателей, в первую очередь очередь морозостойкости.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента теплопроводности от количества циклов испытаний на морозостойкость. Во всем исследуемом диапазоне плотностей при 100 циклах испытаний на морозостойкость коэффициент теплопроводности повышается не более чем на 25 %. При этом прочность исследуемого материала (рис. 2) снижается на 14–16 %, что значительно меньше аналогичных показателей для такого широко распространенного теплоизоляционного материала [3].

Некоторые свойства разработанного материала в сравнении с производимым материалом представлены в табл. 2.

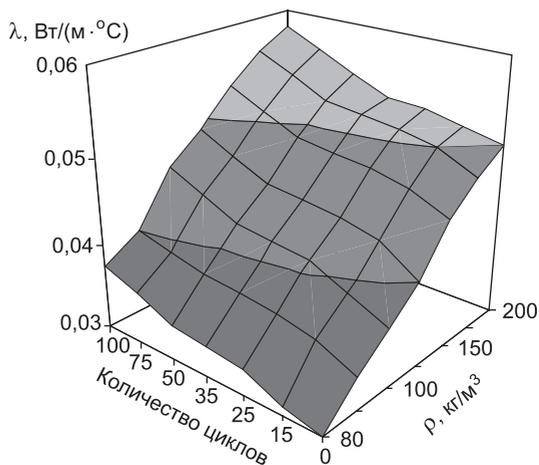


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности от количества циклов испытаний морозостойкости

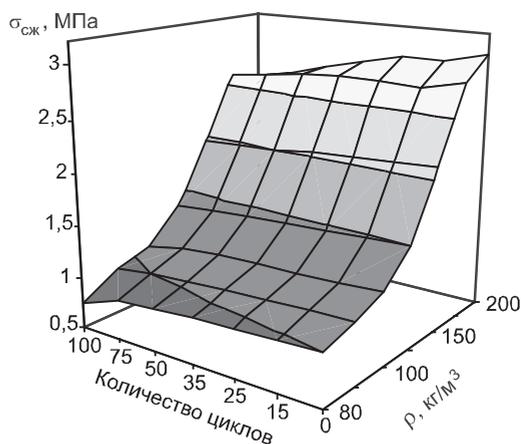


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие от количества циклов испытаний заморозки

Таблица 2

**Свойства разработанного и существующего теплоизоляционного материала**

Показатель	Разработанный	Существующий
Внешний вид	Ячеистый материал белого цвета	Ячеистый материал черного цвета
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	80–200	120–300
Прочность на сжатие, МПа	1–3	0,7–2,0
Теплопроводность, Вт/м·°С	0,03–0,05	0,04–0,08
Водопоглощение, %	4	3,2
Рабочий режим, °С	–240 до +600	–250 до +500
Морозостойкость, количество циклов не менее	50	50

Таким образом, предложенный теплоизоляционный материал не уступает, а по некоторым показателям превосходит существующий. Он может использоваться в самых различных областях и в первую очередь в жилищном строительстве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б.К. Демидович. — Минск : Наука и техника, 1972. — 304 с.
2. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов [Текст] / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. — М. : Стройиздат, 1980. — 399 с.
3. Коканин, С.В. Исследование долговечности теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола [Текст] / С.В. Коканин : дис. ... д-ра техн. наук. — Иваново : Иванов. гос. архитектурно-строит. ун-т, 2011.
4. Китайгородский, И.И. Справочник по производству стекла [Текст] / И.И. Китайгородский, П.К. Балатьев. — М. : Госстройиздат, 1963. — 1011 с.

*НИКОНОВ Александр Сергеевич, асп.*

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых*

*ПАНОВ Юрий Терентьевич, д-р техн. наук, проф.*

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых*

Получено после доработки 10.06.13

**Nikonov Alexandr Sergeevich**, post-graduate student, Vladimir State University named after Alexandr and Nikolay Stoletovs, Russia

**Panov Yuriy Terentevich**, doctor of technical sciences, professor, Vladimir State University named after Alexandr and Nikolay Stoletovs, Russia

#### **OPERATIONAL PROPERTIES OF THERMAL INSULATION MATERIAL FROM WASTE GLASS INDUSTRY**

Developed formulation and production process thermal insulation material from waste glass industry with lower density, and studied its operational characteristics.

Key words: inorganic insulating material, waste glass industry, frost resistance, thermal conductivity, strength.

#### REFERENCES

1. Demidovich, B.K., The production and use of foamed glass [Text] / B.K. Demidovich. — Minsk : Science and Technology, 1972. — 304 p.
2. Gorlov, Yu.P. Technology insulation materials [Text] / Yu.P. Gorlov, A.P. Merkin, A.A. Ustenko. — M. : Stroyizdat, 1980. — 399 p.
3. Kokanin, S.V. Study longevity insulating materials based on polystyrene [Text] : dis. dr technical sciences / S.V. Kokanin. — Ivanovo : Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering, 2011.
4. Kitaygorodsky, I.I. Handbook on the production of glass [Text] / I.I. Kitaygorodsky, P.K. Balatiev. — M. : Gosstroyizdat, 1963. — 1011 p.

## **ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

УДК 69.05:65.012

**В.В. ГЕРАСИМОВ, О.А. КОРОБОВА, А.В. ЛЕВЧЕНКО, А.В. БАБАКОВА**

### **ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИНЖИНИРИНГЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Предлагаемый подход основан на использовании инжиниринга для эффективного решения проблем организационной безопасности строительного производства на основе инструментов теории надежности сложных детерминированных систем.

Ключевые слова: безопасность, обеспечение, строительство, объект, методика, решения.

Строительное производство представляет собой комплекс производств, ориентированных на выпуск единой продукции. Организация данного комплекса основана на принципах независимости работы отдельных производств и их рыночной ориентированности. Это имеет как положительные эффекты, обусловленные наличием конкурентной среды, так и отрицательные, характеризующиеся недоиспользованием потенциала производства. Для снижения негативных положений в настоящее время разработана форма организации производств на основе кластеров, наиболее эффективно использующих ресурсы и возможности. В условиях рынка становятся важными вопросы проектирования полного цикла производств кластеров с учетом организационной надежности их структур и процессов производства [1].

Анализ показывает, что практика разработки развития строительного производства основана на выборе рациональных строительных процессов из их вариантного множества. Все бизнес-процессы, отображающие функционирование предприятий и организаций, универсальны и заранее имеют стандартный набор шаблонов бизнес-процессов, на базе которых строится модель объекта, не учитывающая специфику конкретного объекта управления. Если бизнес-процессы объекта не «вписываются» в его систему шаблонов, то они изменяются, а не создаются новые. Модели типа «как есть» и модели типа «как надо» являются статическими и не учитывают динамику развития предприятия и постоянное изменение бизнес-процессов. Для решения этой задачи может быть использован онтологический подход в инжиниринге строительного производства, предусматривающий разработку моделей, которые развиваются вместе и параллельно с предприятием на основе постоянного изменения бизнес-процессов [2].

Суть подхода заключается в том, что создается онтологическая мега-модель, которая будет эволюционировать, проходя в своем развитии все

состояния жизненного цикла комплекса. К преимуществам инструмента онтологии можно отнести: возможность комплексного моделирования разнотипных характеристик объекта; многосторонность отображения характеристик объекта; использование различных методик для исследования объекта. Как показывает практика, наиболее эффективными инструментами исследования онтологий являются информационные модели и методы [3]. В соответствии с этим ниже приведено обобщение данных по теме и предложены подходы для применения их в отраслевых исследованиях [4].

Подходом предусматривается использование технологии построения и развития бизнес-систем, созданных на инженерном подходе. В его основе лежит применение моделей — точных чертежей организации деятельности. Это не экономические бизнес-модели, т.е. инвестиционные бизнес-кейсы, которые просчитывают экономическую выгоду от развития бизнеса в относительно предсказуемой долговременной перспективе, а модели организационные, в рамках которых осуществляется проектирование новых бизнес-процессов и структур под новые стратегические идеи. В этом случае под онтологией понимается множество компонентов: структура, свойства, формы, пространство, время и динамика объекта.

Компоненты онтологии, изменяемые в процессе развития комплекса, определяют опасности, обусловленные рисками отклонений проектных решений. При этом под организационной опасностью понимается уровень снижения результативных показателей комплекса, а под безопасностью — комплекс мероприятий по уменьшению уровня опасностей от факторов риска.

В качестве методологической основы исследования приняты принципы «проектной организации процессов», в рамках которых рассматриваются формы взаимодействия участников кластеров в комплексе проекта, а эффективность последних обеспечивается оптимальными мероприятиями управления рисками объектов кластеров.

Организационная надежность системы строительного производства определяется ожидаемым уровнем снижения параметров, к которым отнесены затраты и продолжительность структур и процессов строительного производства.

Модель онтологии имеет вид

$$O_n = (K_c, Z_c, R_c), \quad (1)$$

где  $O_n$  — онтология,  $K_c$  — концепция,  $Z_c$  — задачи,  $R_c$  — ресурсы.

В составе концепции в качестве базовых положений принималась безопасность деятельности, задач — оптимизация опасностей, риска — повышение затрат ресурсов и продолжительности.

Исследования надежности преобразований комплекса в форме кластеров проведены применительно к сфере жилищного строительства комплекса крупного города<sup>1,2</sup>.

Блок информационных моделей исследования производственных структур форм организации производства (ФОП) строительного кластера имеет вид:

$$K_{sp} = (O_p(C_m) \wedge V_p(N_i, P_r, L_g, P_p)), \quad (2)$$

<sup>1</sup> Герасимов В.В., Лабутин Е.С., Пятых Н.В., Михальченко О.Ю. Управление организационно-экономической надежностью строительных проектов // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 4. С. 104–109.

<sup>2</sup> Герасимов В.В., Кунц А.Л., Михальченко О.Ю. Интегрированная надежность эффективности управления реализацией проектов // Теория и практика инновационной стратегии региона: Сб. науч. тр. Кемерово: КТУ, 2011. С. 76–82.

$$\Phi 0 = (\text{См, Ни, Пр, Лг, Пп}), \quad (3)$$

$$\Phi 1 = (\text{См, Ни, Пр, Лг, Пп}), \quad (4)$$

$$\Phi 2 = (\text{См, Ни, Пр, Лг, Пп}), \quad (5)$$

$$\Phi 3 = ((\text{См, Ни}) \emptyset (\text{Пр, Лг, Пп})), \quad (6)$$

где Ксп, Оп, Вп — соответственно комплекс строительного производства, основное производство, вспомогательное производство;

См, Ни, Пр, Лг, Пп — соответственно строительно-монтажные работы, НИОКР, проектирование, логистика, промышленное производство;

Φ0, Φ1, Φ2, Φ3 — соответственно формы производственных структур кластера: локальная структура, комплексная структура, специализированная структура, смешанная структура.

Уравнение (2) раскрывает качественные характеристики структуры комплекса по видам производств и компонентам этих видов, а формулы (3)–(6) — расчетные варианты форм организации производств кластеров различной специализации. Приведенные варианты форм не являются конечными и предполагают разработку множества других вариантов, необходимых для практического использования. Множество вариантов форм дает возможность разработки альтернативных решений для различных практических ситуаций развития комплекса.

В соответствии с приведенными формами организации параметрические характеристики форм имеют вид:

— для варианта Φ0

$$З(\Phi 0) = \Sigma З(\text{Оп, Вп}), \quad (7)$$

$$Т(\Phi 0) = \Sigma Т(\text{Оп, Вп}), \quad (8)$$

$$Р(\Phi 0) = \text{UP}(\Phi 0)_i, \quad (9)$$

где З — параметр затрат; Т — параметр продолжительности; Р — риск кластера;  $P_i$  — риск  $i$ -го объекта структуры Φ0;

— для Φ1

$$З(\Phi 1) = \Sigma З(\text{Оп, Вп}), \quad (10)$$

$$Т(\Phi 1) = \Sigma Т(\text{Оп, Вп}), \quad (11)$$

$$Р(\Phi 1) = \text{UP}(\Phi 1)_i, \quad (12)$$

— для Φ2

$$З(\Phi 2) = \Sigma З(\text{Оп}) + \Sigma (\text{Вп}), \quad (13)$$

$$Т(\Phi 2) = \Sigma Т(\text{Оп}) + \Sigma Т(\text{Вп}), \quad (14)$$

$$Р(\Phi 2) = \text{UP}(\Phi 2)_i; \quad (15)$$

— для Φ3

$$З(\Phi 3) = \Sigma З(\text{Оп, Ни}) + \Sigma З(\text{Вп}(\text{Пр, Лг, Пп})), \quad (16)$$

$$Т(\Phi 3) = \Sigma Т(\text{Оп, Ни}) + \Sigma Т(\text{Вп}(\text{Пр, Лг, Пп})), \quad (17)$$

$$Р(\Phi 3) = \text{UP}(\Phi 3)_i. \quad (18)$$

Уравнениями (7)–(18) отображаются основные параметры формирования ФОР с учетом риска объекта. Модели использовались при проведении исследования рисков и последующего определения областей безопасности развития объектов кластера. Основные параметры при изучении рисков имеют вид:

$$\text{Ксп}(P) = (\text{Оп}(P) \wedge \text{Вп}(P)), \quad (19)$$

$$B = f(\Delta, T), \quad (20)$$

$$P = (B, \Delta)_{\max}, \quad (21)$$

где  $B$  — вероятность событий;  $\Delta$  — отклонение параметра.

Уравнения (19)–(21) раскрывают основные параметры стохастических решений в процессе проектирования ФОП.

Исследование риска проведено по следующим этапам:

— подготовительный — формирование базы знаний о внешней среде, производственном потенциале комплекса, нормативной базе проектирования производства и строительства;

— основной — исследование факторов риска по технологическим пределам строительного комплекса;

— вспомогательный — создание аналитического комплекса технологии проектирования риска по формам производственных структур;

— заключительный — оптимизация рисков на основе проектирования мероприятий по снижению рисков в планах производства и строительства и в процессе управления их реализацией.

Оптимизация параметров включала следующий алгоритм:

— проектирование ФОП кластера. Варианты форм отражают возможности технологических специализаций по компонентам комплекса. В качестве базовых блоков принимались основное и вспомогательное производство, а компонентов — строительномонтажные работы, НИОКР, проектирование, логистика, промышленное производство;

— проектирование затрат ресурсов и продолжительности. В составе затрат отражаются нормативные стоимости работ, а продолжительности — нормативные продолжительности работ;

— имитационное моделирование и экспериментальная разработка нормативов риска по специальной технологии для каждого базового параметра — затрат и продолжительности их компонентов комплекса кластера с использованием имитационного моделирования случайных чисел для вычисления вероятности отклонений параметров;

— корректировка нормативов затрат и продолжительности плана проекта организации кластера на основе страхования рисков по специальной технологии;

— формирование базы данных ситуаций на основе возможных отклонений базовых параметров в процессе реализации планов проектов ФОП кластеров;

— проектирование затрат ресурсов и продолжительности для ФОП с учетом факторов риска реализации.

Экспериментальные результаты оптимизации параметров для различных ФОП применительно к строительному жилищному комплексу г. Новосибирска (табл. 1) показывают, что технологией предусматривается последовательное снижение риска от исходного, определяемого методом имитационного моделирования, до допустимого уровня, получаемого путем последовательных снижений за счет мероприятий — страхования и управления отклонениями. Риск оптимизируется по структурам производств:

— локальной — по отдельным объектам, что приводит к увеличению полного риска комплекса из-за невозможности снижения критических рисков;

Таблица 1

**Расчетные значения рисков в процессе управления организационной безопасностью форм организации производства строительного кластера, %**

Виды рисков	ФОП			
	Ф0	Ф1	Ф2	Ф3
Расчетный	8,7	5,1	6,5	6,3
После оптимизации	5,3	3,8	3,9	3,8
Риск реализации	6,1	3,3	4,6	4,4
После управления	4,3	2,5	2,2	3,1

Примечание. При исследовании в режиме первой оптимизации принималась ставка страхования в размере 20 %, в режиме второй оптимизации — уровень эффективности мероприятий равен 1,2. В затраты оптимизации включены затраты на страхование и затраты мероприятий по управлению.

— комплексной — интегрированно по каждому объекту и в целом по комплексу, что дает возможность снижения опасностей со стороны критических рисков;

— специализированной — отдельно по основному и вспомогательному производству, что позволяет снизить опасности в крупных структурных образованиях со стороны критических рисков;

— смешанной — отдельно по каждому из локальных структурных образований и имеет варианты решения по отношению к задаче снижения опасностей со стороны критических рисков.

Эффективность управления риском приведена в табл. 2. Как видно из табл. 2, уровень эффективности снижения риска с использованием специальных мероприятий по разным ФОП кластера имеет различные значения. Это позволяет составлять специальные сценарии для оптимизации риска и его прогнозирования по динамике развития предприятий комплекса предприятий<sup>3</sup>.

Таблица 2

**Оценка организационной безопасности структур и процессов строительного кластера, доля**

Уровень эффективности снижения риска за счет оптимизации	ФОП			
	Ф0	Ф1	Ф2	Ф3
Первой	1,45	1,25	1,4	1,38
Второй	1,24	1,23	1,52	1,28
Первой и второй	1,35	1,24	1,47	1,32

**Выводы.** 1. Использование онтологического подхода позволяет осуществлять направленный процесс системного обслуживания бизнеса предприятий с помощью инструментов инжиниринга, включающего модели, архитектуру, приложения, мероприятия, базы знаний и др.

2. В условиях формирования форм организации производственных рыночных структур в виде кластеров важной методической задачей является разработка систем безопасности проектов кластеров на всех этапах и структурах строительного производства. Создание структур кластеров может быть представлено множеством вариантов по признакам локализации, специализации и комплексирования объектов производства.

<sup>3</sup> Герасимов В.В., Коробова О.А., Пименов А.Т., Михальченко О.Ю. Основы интегрированной безопасности строительных систем // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 48–55.

3. Методическим подходом обоснования уровня организационной безопасности форм предусматривается выявление рисков и использование схем их снижения. Для этого должны разрабатываться нормативы рисков, которые определяются статистическими методами, приведенными в методике.

4. Выполненными оценками организационной безопасности проектов ФОРП установлено, что расчетные значения риска могут быть снижены за счет оптимизации до уровня, достаточного для оперативного регулирования процессом формирования структур ФОРП.

5. Методический подход может найти применение для комплексного проектирования организационной безопасности при преобразовании производственных структур отраслевых комплексов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимов, В.В. Интегрированное проектирование объектов жилищного строительства [Текст] / В.В. Герасимов, Л.С. Минина. — Новосибирск : НГАСУ, 2001. — 194 с.
2. Шведин, Б.Я. Онтологическая модель кадровой организационно-плановой сферы деятельности крупномасштабной организации [Текст] / Б.Я. Шведин // Научные технологии. — 2006. — Т. 6, № 6. — С. 64–68.
3. Герасимов, В.В. Управление программными рисками территориальных систем [Текст] / В.В. Герасимов, Е.А. Саломатин, Н.В. Пятых // Новые технологии в строительном материаловедении. — Новосибирск : НГАУ, 2012. — С. 156–161.
4. Герасимов, В.В. Управление безопасностью социально-экономических систем [Текст] / В.В. Герасимов, Е.С. Лабутин, Н.В. Пятых // Новые технологии в строительном материаловедении. — Новосибирск : НГАУ, 2012. — С. 161–166.

*ГЕРАСИМОВ Виталий Владимирович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КОРОБОВА Ольга Александровна, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ЛЕВЧЕНКО Александр Викторович, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*БАБАКОВА Анастасия Викторовна, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 10.06.13

**Gerashimov Vitaly Vladimirovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Korobova Olga Alexandrovna**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Levchenko Alexandr Victorovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Babakova Anastasiya Victorovna**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### AN ONTOLOGICAL APPROACH TO THE ENGINEERING OF ORGANIZATIONAL SECURITY CONSTRUCTION INDUSTRY

The proposed approach is based on the use of engineering techniques to deal effectively with organizational security building production-based tools of the theory of reliability of complex nonlinear dynamical systems.

Key words: safety, security, construction, object, method, solutions.

## REFERENCES

1. Gerasimov, V.V. Integrated design of housing projects [Text] / V.V. Gerasimov, L.S. Minina. — Novosibirsk : NSUACE, 2001. — 194 p.
  2. Shvedin, B.Ya. Ontological model of organizational and human resource planning areas of large-scale organization [Text] / B.Ya. Shvedin // High Tech. — 2006. — Vol. 6, N 6. — P. 64–68.
  3. Gerasimov, V.V. Risk management software territorial systems [Text] / V.V. Gerasimov, E.A. Salomatin, N.V. Pyatykh // New technologies in building materials. — Novosibirsk : NGAU, 2012. — P. 156–161.
  4. Gerasimov, V.V. Security management of socio-economic systems [Text] / V.V. Gerasimov, E.S. Labutin, N.V. Pyatykh // New technologies in building materials. — Novosibirsk : NGAU, 2012. — P. 161–166.
-

# ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.131:624.145.4.001.24

В.В. ДЕГТЯРЕВ-мл., Е.Е. ЕРШОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ НА ДНЕ КАНАЛА С НЕРАЗМЫВАЕМЫМ ДНОМ НА ПОЛЕ СКОРОСТИ ПОТОКА

Рассматривается численное моделирование установившегося движения водного потока в трехмерной постановке в русле-канале прямоугольного поперечного сечения и бесконечной длины с помощью двух цилиндров заданного диаметра  $d$ . Исследовалось влияние положения цилиндров на скоростную структуру потока.

**Ключевые слова:** установившееся движение, открытый поток, численное моделирование, граничное условие, обтекание трубопровода, поле скоростей.

В последнее время все актуальнее становится проблема безопасной, с точки зрения экологии, эксплуатации трубопроводного транспорта, в связи с этим возникают вопросы влияния одного трубопровода на другой при строительстве подводных переходов. Этот процесс нарушает естественные природные условия, а при прокладывании всех последующих трубопроводов в непосредственной близости с уже имеющимся, сам он подвергается специфическим воздействиям, приводящим к аварийным ситуациям. В связи с этим численное моделирование безнапорных водных потоков в недеформируемых и деформируемых руслах является актуальной проблемой для решения многочисленных задач речной гидравлики и гидротехники.

**Основные уравнения и методы решения.** Рассмотрим модель обтекания цилиндра, расположенного на дне прямоугольного бесконечного канала перпендикулярно течению (рис. 1).

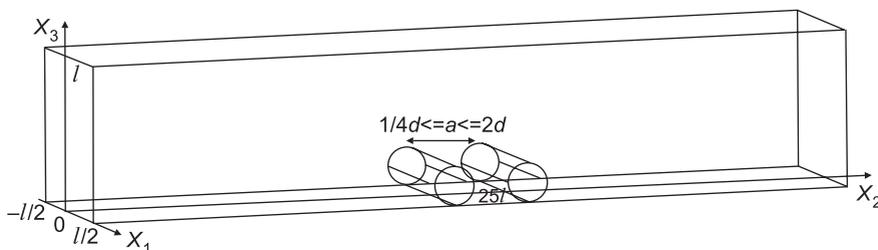


Рис. 1. Геометрия задачи

Здесь диаметр цилиндра  $d$ , ширина и глубина канала  $l = 4d$ , начальная скорость течения  $U_0$ . Цилиндр помещен в центре канала.

Рассматриваемая модель может быть описана системой полных уравнений Навье–Стокса несжимаемого течения [1, 2]. В качестве характерных величин для обезразмеривания выбраны начальная скорость течения

$U_0$ , гидравлический радиус  $R$ , плотности  $\rho_0$  и сформированные из них величины  $\tau_0 = \frac{R}{U_0}$  и  $p_0 = U_0^2 \rho_0$ .

В безразмерных переменных система уравнений Навье–Стокса записывается следующим образом:

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} = 0, \quad (1)$$

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

где  $\bar{\mathbf{u}} = (u_1, u_2, u_3)$  — вектор скорости;

$\operatorname{Re} = \frac{\rho_0 U_0 R}{\mu}$  — число Рейнольдса;

$\mu$  — сдвиговая вязкость.

Для системы (1)–(2) на дне канала и на поверхности цилиндра ставится условие прилипания, на передней и задней стенке канала — условия симметрии, на торцах канала — периодические условия, на верхней границе канала — свободный выход [3].

Начальные условия задаются следующим образом:

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

**Разностная схема.** Система уравнений (1)–(2) с описанными выше граничными и начальными условиями решается численно с помощью явно-неявной конечно-разностной схемы Ковени–Яненко, учитывающей расщепление по физическим процессам и переменным. В операторном виде система (1) записывается следующим образом:

$$(s^n - s^{n-1})/\tau + L_h [\delta s^n + (1-\delta)s^{n-1}] = F_h^n. \quad (3)$$

Здесь  $s^n = (u_{1ij}^n, u_{2ij}^n, u_{3ij}^n, p_{ij}^n)$  — сеточная вектор-функция решения на  $n$ -м временном слое;

$h_1 = h_3 = h$ ,  $h$  — шаги пространственной сетки;

$\tau$  — шаг по времени;

$\delta$  — весовой параметр.

Оператор  $L_h$  включает симметричные аппроксимации со вторым порядком первых и вторых пространственных производных по каждой пространственной координате. Оператор  $F_h^n$  рассматривается как вектор правых частей. По координате  $x_2$  разностная сетка со сгущением к центру канала.

На нерегулярной сетке с шагом  $h$  по координатам  $x_2$ ,  $x_3$  и шагом  $h_2$  по координате  $x_1$  схема (3) аппроксимирует систему (1)–(2) с порядком  $O(\tau + h^2 + h_2^2)$  и является абсолютно устойчивой при весовом параметре  $\delta \geq 1/2$  [4].

В расчетной области сетка содержала  $16 \times 44 \times 20 = 14\,080$  узлов с шагом по пространственным координатам  $x_1$ ,  $x_3$   $h = 0,06$ , по координате  $x_2$   $h_2 = 0,06$  по краям канала и  $h_2 = 0,013$  в центре канала и шагом по времени  $\tau = 0,04$ .

Рассматривалась задача развития потока вплоть до выхода решения на стационар. Выход на стационарное решение определялся из условия

$$|s^n - s^{n-1}| < 10^{-12}.$$

**Значения поперечной составляющей поля скоростей между цилиндрами, лежащими на дне канала**

Расстояние между цилиндрами				
$0,5r$	$r$	$1,5r$	$d$	$2d$
-0,00114181	0,000557365	0,000849056	-0,000416688	0,000387079
-0,00136641	0,000584867	0,00110062	-0,000443424	0,000397105
-0,00159102	0,000612369	0,00135218	-0,000470161	0,000407132
-0,00177093	0,000640623	0,0015049	-0,000490144	0,000417158
-0,00175682	0,000670375	0,00146068	-0,000496672	0,000427184
-0,00174272	0,000700126	0,00141645	-0,0005032	0,00043721
-0,00186349	0,000661779	0,00112939	-0,000448436	0,000445756
-0,00184939	0,000691531	0,00108517	-0,000454964	0,000450917
-0,00183529	0,000721282	0,00104095	-0,000461492	0,000456078
-0,00183223	0,000727737	0,00103135	-0,000462908	0,000461238
-0,00183223	0,000727737	0,00103135	-0,000462908	0,000466399

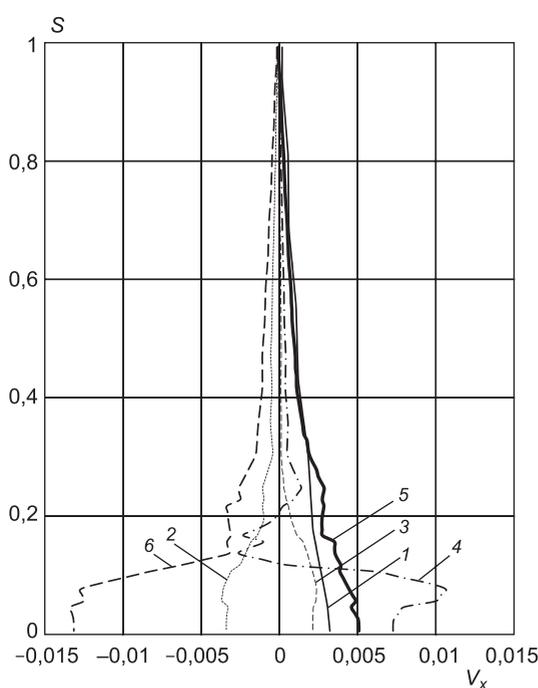


Рис. 2. Поперечные координаты скорости, полученные в сечении, проходящем по центру между двумя лежащими на дне цилиндрами на расстоянии друг от друга:

1 —  $2d$ ; 2 —  $d$ ; 3 —  $3r$ ; 4 —  $1,5r$ ; 5 —  $r$ ; 6 —  $0,5r$

гаться не только вдоль, но и поперек потока, между двумя лежащими цилиндрами, причем это движение становится заметным, что и определяет рост продольной составляющей поля скоростей, на 1–2 порядка (таблица, рис. 2).

В результате было получено, что для выхода решения на стационар требуется 6000 шагов по времени.

**Обсуждение результатов.** В результате расчетов выявлено, что положение цилиндров относительно друг друга существенно влияет на поперечную компоненту скорости потока. Если расстояние между цилиндрами более трех радиусов, то поток воспринимает каждый из цилиндров как отдельное препятствие, так как при таких расстояниях вихрь с тыловой стороны первого цилиндра успевает сформироваться и оторваться<sup>1</sup>. Тогда как при расстояниях, начиная от трех радиусов и меньше между цилиндрами, вихрь не успевает сформироваться и на его формирование влияет рядом расположенный второй цилиндр, что приводит к изменению его движения. На маленьких расстояниях вихрь начинает дви-

<sup>1</sup> Дегтярев В.В., Ершова Е.Е. Численное моделирование скоростной структуры потока в области цилиндра, имитирующего трубопровод, лежащий на дне недеформируемого русла // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 57–61.

**Выводы.** При изучении течения в прямоугольном бесконечном канале с двумя трубами, лежащими поперек канала, установлено, что изменение положения труб относительно друг друга существенно влияет на вид течения между трубами. Если при расстоянии, равном двум диаметрам между трубами, течение повторяет картину с одной трубой на дне канала, то с приближением труб друг к другу влияние одной трубы на другую растет. В результате формируется вихрь, который движется не только по направлению течения, но и вдоль труб, что приводит к размыванию одного берега реки и намыванию другого.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочин, Н.Е. Теоретическая гидромеханика [Текст] / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. — 6-е изд., испр. и доп. — М. : Физматлит, 1963. — 583 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — 3-е изд., испр. — М. : Наука, 1986. — Т. 6. — 736 с.
3. Дегтярев-мл., В.В. К вопросу о постановке граничных условий при численном моделировании открытых потоков в недеформируемом русле [Текст] / В.В. Дегтярев-мл., Е.Е. Ершова // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 2–3. — С. 54–59.
4. Ковеня, В.М. Метод расщепления в задачах газовой динамики [Текст] / В.М. Ковеня, Н.Н. Яненко. — Новосибирск: Наука, 1981. — 254 с.

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

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

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

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 14.06.13

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

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

#### RESEARCH OF INFLUENCE OF AN ARRANGEMENT OF CYLINDERS AT THE BOTTOM OF CHANNEL TO A NOT DEFORMABLE CHANNEL ON A FIELD OF SPEED OF A FLOW

In clause the numerical modeling of the established movement of a water flow in three-dimensional statement in the channel-channel of rectangular cross section and infinite length is considered. Two cylinders of the given diameter  $d$  at the bottom are located. The influence of an arrangement of cylinders on high-speed structure of a flow was investigated.

**Key words:** the established movement, open flow, numerical modeling, boundary condition, flow the pipeline, field of speeds.

#### REFERENCES

1. Kotschin, N.E. Theoretische Hydromechanik [Text] / N.E. Kotschin, I.A. Kibel, N.V. Rose. — Ed. 6<sup>th</sup>, corrected. — M., 1963. — 583 p.
2. Landau, L.D. Theoretical physics. Hydrodynamics [Text] / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. — Ed. 3<sup>rd</sup>, corrected. — M. : Science, 1986. — Vol. 6. — 736 p.
3. Degtyarev-young., V.V. To the problem on statement of the boundary conditions at numerical modeling of the open flows in the non-deformation channel [Text] / V.V. Degtyarev-young, E.E. Ershova. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 2–3. — P. 54–59.
4. Kovenya, V.M. The method of splitting in the gas dynamics problems [Text] / V.M. Kovenya, N.N. Yanenko. — Novosibirsk : Science, 1981. — 254 p.

УДК 627.6:626.212:624.139

Л.Ф. ДЗЮБЕНКО, А.М. СУХНО

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА ХВОСТОХРАНИЛИЩА НА МЕРЗЛОМ ТРЕЩИНОВАТОМ ОСНОВАНИИ

Рассмотрены причины фильтрационной проницаемости мерзлых грунтов основания и береговых примыканий грунтовых гидротехнических сооружений хвостохранилищ, расположенных в криолитозоне. Предложены мероприятия по уменьшению фильтрации в трещиноватых мерзлых породах в створе ограждающей дамбы хвостохранилища.

Ключевые слова: фильтрация, трещиноватость, хвостохранилище, намыв, дамба, мерзлый грунт.

При проектировании и эксплуатации грунтовых гидротехнических сооружений, построенных в криолитозоне, наиболее распространенным допущением является водонепроницаемость многолетнемерзлых грунтов. Это означает, что при условии сохранения мерзлого состояния грунтов в створе сооружений за весь период эксплуатации не потребуется специальных дополнительных противофильтрационных мероприятий как в основании сооружений, так и в береговых массивах. Специальные исследования и анализ полувекового опыта эксплуатации грунтовых гидротехнических сооружений северо-западной Якутии опровергают данное допущение [1, 2]. Недоучет водопроницаемости трещиноватых мерзлых грунтов привел к развитию значительного числа нештатных ситуаций на грунтовых гидротехнических сооружениях региона, часть которых потребовала длительных и дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ.

В настоящее время не существует строгого математического описания процессов фильтрации в трещиноватых скальных породах. Достоверно установлено, что характер движения жидкости по системе трещин в скальном массиве определяется вязкостным и инерционным сопротивлением, а коэффициент водопроницаемости (коэффициент фильтрации) породы пропорционален квадрату ширины раскрытия трещины [3]. Водопроницаемость мерзлых горных пород также относится к недостаточно изученным вопросам. Можно выделить следующие причины формирования фильтрационной проницаемости мерзлых грунтов [4]:

1. Промерзание пород в условиях неполного их водонасыщения. Известно, что в результате деградации мерзлых толщ пород, происходящей в голоценовом периоде (с 10 до 4–5 тыс. лет назад), многолетнее оттаивание на рассматриваемой территории достигло 30–40 м от дневной поверхности. После возвращения относительно холодного климата началось быстрое промерзание пород. В условиях водоразделов и крутых склонов, с учетом сложившейся на тот момент гидрогеологической обстановки, промерзала зона аэрации. Все это привело к тому, что береговые массивы на участках долин с крутизной бортов более 10–15°, сложенные скальными и полускальными породами, часто имеют открытую трещино-

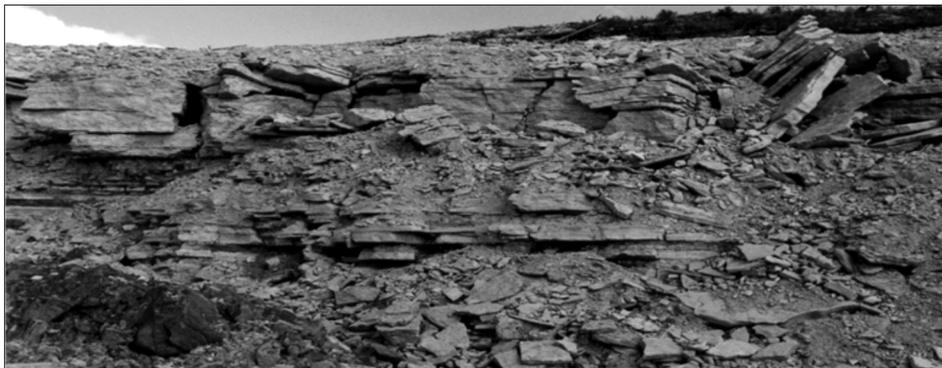


Рис. 1. Характерное сложение берегового склона хвостохранилища из известняков с открытой трещиноватостью

ватость (рис. 1), при этом грунты сохраняют отрицательную температуру, так называемый «морозный грунт».

2. В береговых массивах крутизной более  $15-25^\circ$ , сложенных скальными и полускальными породами, наблюдается формирование протяженных трещин отседания открытостью до 30–40 см, ориентированных параллельно склону. Пример подобных трещин в районе левобережного примыкания дамбы хвостохранилища показан на рис. 2. Анализ нештатных ситуаций на грунтовых гидротехнических сооружениях Западной Якутии показывает, что в большинстве случаев при эксплуатации грунтовых плотин и дамб на участках долин с крутыми береговыми массивами мерзлых скальных и полускальных трещиноватых пород имело место развитие обходной фильтрации. При этом скорость продвижения талой зоны в береговых массивах вниз по долине в нижнем бьефе достигала десятков, а в отдельных случаях и 100 м в год.



Рис. 2. Трещины отседания на левом борту низового откоса ограждающей дамбы хвостохранилища

Примером реализации подобного механизма формирования фильтрации служит хвостохранилище, расположенное в указанном регионе. Хвостохранилище, введенное в эксплуатацию в 1996 г., является гидротехническим сооружением I класса и предназначено для складирования отходов обогащения (хвостов) и обратного водоснабжения технологического процесса обогатительной фабрики.

В состав сооружений хвостохранилища входят: ограждающая дамба талого типа с первичной дамбой из каменной наброски, перекрывающая долину ручья; расположенная ниже ограждающей дамбы маневровая ем-

кость с плотиной и перехватывающей мерзлой призмой; нагорные водоотводные каналы; насосные станции дренажных и осветленных вод; система пульпопроводов и водоводов.

Ограждающая дамба представляет собой намывную призму из хвостов с фильтрующей скальной пионерной дамбой и дамбами обвалования из хвостов и известняка (рис. 3). Первоначально была отсыпана пионерная дамба высотой 37,5 м и длиной 764 м из крупнообломочного скального материала, намыв хвостов производился непосредственно с ее гребня. Пионерная дамба является первым ярусом и выполняет функции низовой упорной и дренажной призмы ограждающей дамбы. Ежегодно по мере заполнения емкости хвостохранилища возводятся дамбы наращивания, и складирование хвостов намывом производится уже, из выпусков распределительного пульповода, укладываемого на их гребне. В настоящее время общая высота ограждающей дамбы составляет более 96 м, мощность намывных отложений по тальвегу балки — более 85 м. На конец эксплуатации высота сооружения достигает 107,5 м при длине по гребню около 2500 м.



Рис. 3. Ограждающая дамба хвостохранилища

В геологическом строении основания дамбы принимают участие глинисто-карбонатные отложения ордовикской системы, перекрытые рыхлыми четвертичными образованиями аллювиального, элювиального и делювиального генезиса. Льдистость коренных пород в береговых частях сооружения достигает 18 %, в центральной части — 10 %. В верхней части разреза породы переработаны процессами выветривания, что привело к формированию значительного по мощности чехла структурного элювия. При производстве изысканий под строительство ограждающей дамбы данный тип грунтов встречен в интервалах глубин от 2,0–6,0 до 3,2–8,5 м от дневной поверхности. На правобережном участке структурный элювий представлен разрушенными до щебня и суглинка известняками и мергелями, на левобережном — разрушенными до щебня аргиллитами. В пределах пород скального основания выделяются два типа трещин — литогенетический и экзогенный. При изысканиях подавляющее большинство литологических разностей было отнесено к сильнотрещиноватым, меньшая часть — к трещиноватым. До начала эксплуатации хвостохранилища породы основания плотины находились в мерзлом состоянии с температурами грунтов ниже слоя нулевых годовых колебаний около  $-4$  °С.

На третий год эксплуатации, при заполнении хвостохранилища, в нижнем бьефе правобережного примыкания ограждающей дамбы появились выходы фильтрационных вод (рис. 4), а вдоль уреза воды прудка-осветлителя обнаружены зоны затекания воды в береговой массив (рис. 5).

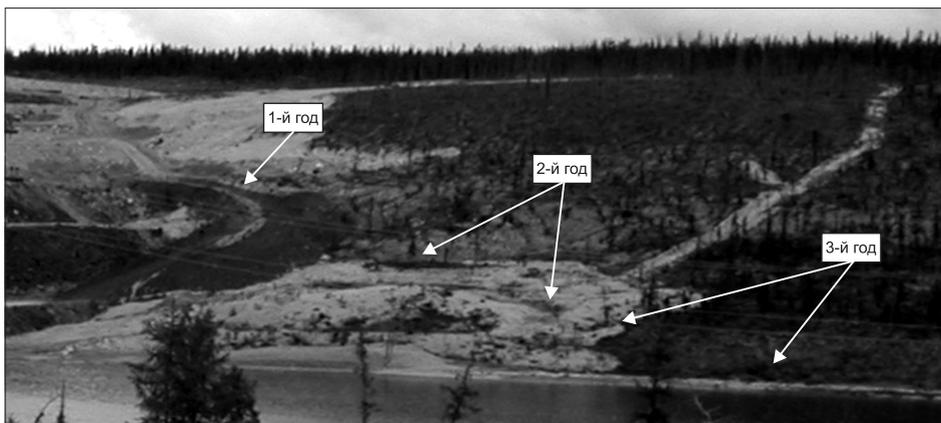


Рис. 4. Выходы фильтрационных вод в береговом массиве

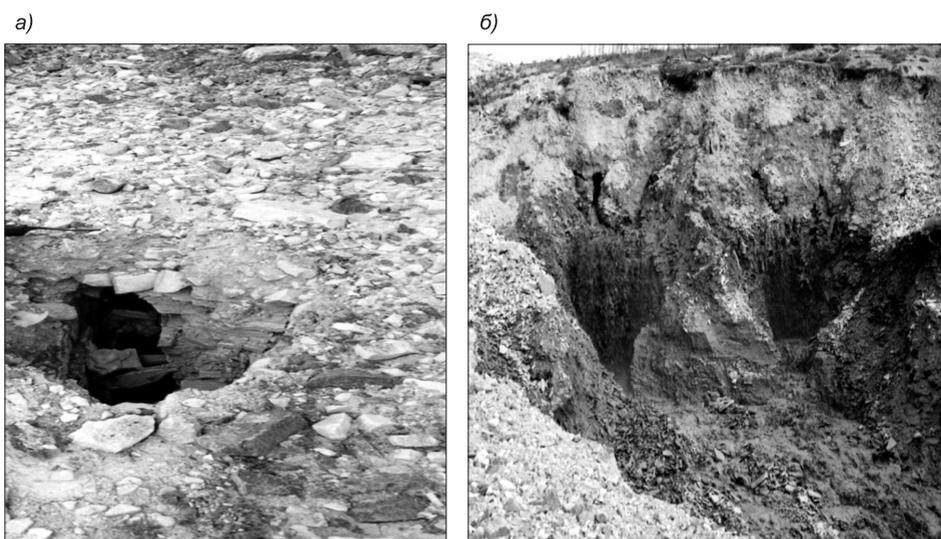


Рис. 5. Вход (а) и выходы (б) фильтрационного потока

Исследования выявили, что вода затекает в трещины, перекрытые мохорастительным слоем. В последующие годы фильтрация появилась и по левому борту, при этом общий ее объем увеличился до критических значений, сопоставимых с производительностью дренажной насосной станции — 6000 м<sup>3</sup>/ч.

С целью предотвращения процессов суффозии и разрушения берегового склона в зоне выхода фильтрата была выполнена отсыпка наклонного дренажа из скальной породы шириной около 30 м. Через год выходы фильтрации были обнаружены в 50–70 м за дренажем, в следующий летний сезон фильтрация проявилась уже в 80–120 м ниже по долине ручья (см. рис. 4). Обследованием зоны фильтрации было определено, что основные потоки воды движутся по трещинам отседания (см. рис. 2). Следовательно, талая фильтрующая зона в грунтах берегового склона распространялась вниз по долине ручья со скоростью около 70 м в год.

Последующие исследования, в том числе геофизическими методами, показали, что трещины отседания имеют место на всех крутых склонах, сложенных известняками, и массивы, обладающие повышенной трещиноватостью, существуют практически по всему периметру как заполненной части хвостохранилища, так и в пределах зоны потенциального затопле-

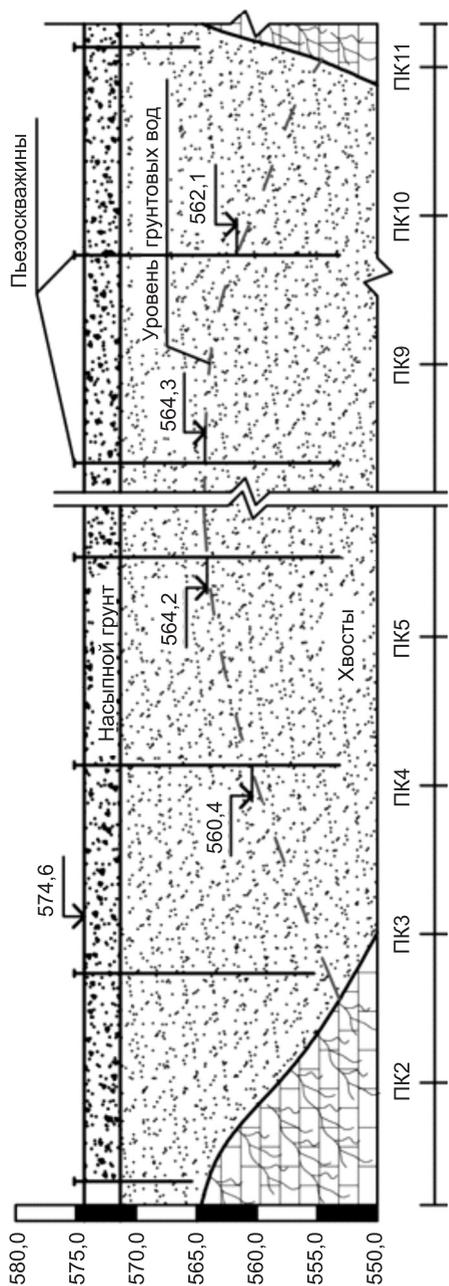


Рис. 6. Инженерно-геологический продольный разрез ограждающей дамбы хвостохранилища с указанием положения депрессионной кривой

ния. Таким образом, особенности геологического строения долины привели к образованию механизма формирования обходной фильтрации.

Термометрические исследования позволили установить, что тело пионерной дамбы частично заморожено и не отвечает требованиям дренажной призмы, в результате дренаж ограждающей дамбы в основном происходит в трещиноватых зонах береговых массивов. Об этом свидетельствуют и пьезометрические данные, показанные на рис. 6, где отмечено падение кривой депрессии от центра плотины к бортам. Для плотин, расположенных в северных регионах, известен эффект затекания холодного воздуха в пустоты крупноглыбовой отсыпки низового клина. Со временем свободное пространство отсыпки заполняется льдом, и ее фильтрационные свойства существенно снижаются.

Кроме того, геофизическими методами выявлено, что оттаивание береговых массивов в створе пионерной дамбы в глубину достигает в правом борту 120 м и в левом — 40 м. Вероятно, такая асимметрия оттаивания связана с тем, что в левом борту за счет значительной крутизны склона трещины более открыты, и фильтрационные потоки лучше дренируются.

Для блокирования обходных фильтрационных потоков был реализован наиболее технологически простой способ — опережающий намыв на бортах хвостохранилища противофильтрационного экрана из хвостов. При этом наиболее предпочтительным и эффективным является зимний намыв с намораживанием хвостовых отложений экрана. Намороженный массив хвостов, не успев оттаять за короткое лето, служит теплоизолирующим экраном и сохраняет естественный береговой массив в мерзлом состоянии.

Исследования, проведенные на хвостохранилище, показали, что температура в 2–3-метровом массиве намороженных хвостов за зиму достигает  $-3...-6$  °С, и происходит смыкание с мерзлыми грунтами основания. За летний период успевает оттаять только метровый поверхностный

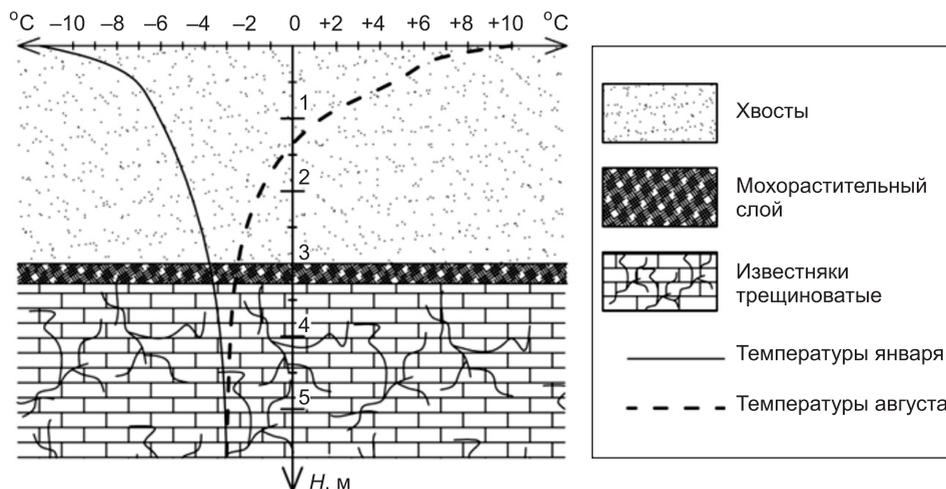


Рис. 7. Распределение среднемесячных температур по глубине замороженного экрана из хвостов на борту хвостохранилища

слой, под которым круглый год существует льдогрунтовый противодинамический экран и мерзлые грунты основания (рис. 7).

Как показали инженерно-геологические изыскания, мерзлота сохраняется и в дальнейшем под водой прудка при затоплении бортов и под слоем последующих хвостовых отложений. В дальнейшем, благодаря интенсивному круглогодичному намыву экрана из хвостов по бортам хвостохранилища, удалось сократить обходную фильтрацию до значений, близких проектным.

**Выводы.** 1. При проведении предпроектных изысканий необходимо определять трещиноватость и открытость трещин в створе сооружения, выполнять прогнозные расчеты оттаивания мерзлых бортов хвостохранилища и величин фильтрационных расходов, а также оценивать возможность оползания откосов по трещинам.

2. При проектировании следует предусматривать специальные противодинамические мероприятия на участках с открытой трещиноватостью (грунтовые экраны, синтетические пленки, гели, цементационные или буробетонные завесы и т.д.).

3. Для перехвата фильтрационных потоков по бортам в нижнем бьефе сооружений рекомендуется устраивать дренажные перехватывающие траншеи, не позволяющие продвигаться фильтрационным потокам вниз по долине.

4. Необходимо оборудовать пьезометрические скважины по бортам в створе сооружений для определения поверхности обходного фильтрационного потока, скорости и объемов фильтрации.

5. Следует предусматривать устройство теплоизолирующего слоя гребня и низового откоса дренажной призмы (пионерной дамбы).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оловин, Б.А. Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов [Текст] / Б.А. Оловин. — Новосибирск : Наука, 1993. — 257 с.
2. Дроздов, А.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии [Текст] / А.В. Дроздов, Н.А. Юст, В.В. Лобанов. — Иркутск : ИГТУ, 2008. — 507 с.
3. Газиев, Э.Г. Скальные основания бетонных плотин [Текст] / Э.Г. Газиев. — М. : АСВ, 2006. — 280 с.

4. Бомкин, С.В. Классификация механизмов развития нештатных ситуаций на гидротехнических сооружениях в криолитозоне [Текст] / С.В. Бомкин, А.М. Сухно // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 52–63.

*ДЗЮБЕНКО Любовь Федоровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ludzju@yandex.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*СУХНО Александр Михайлович, канд. техн. наук, зам. гл. инж.; E-mail: suknoam@alrosa.ru*

*Айхальский ГОК АК «АЛРОСА», Республика Саха (Якутия)*

Получено 20.06.13

**Dzyubenko Lyubov Fyodorovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, E-mail: ludzju@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Suhno Alexandr Mikhaylovich**, candidate of technical sciences, substituent of chief engineer; E-mail: suknoam@alrosa.ru, Aichal MEP CL «ALROSA», Republic Sakha (Yakutiya)

### **FEATURES OF FORMATION OF TAILINGS FILTRATION MODE ON THE FROZEN FRACTURED SUBSTRATE**

The article describes the reasons of the filter permeability of the frozen soil foundation and the landfall of hydro technical installations tailings, located in the permafrost zone. Also proposed measures to reduce the filtering in fractured frozen rocks in the alignment of the enclosing dam.

**Key words:** filtration, fissuring, tailings, alluvion, dam, frozen ground.

#### REFERENCES

1. Olovin, B.A. Filter permeability of the permafrost soils [Text] / B.A. Olovin. — Novosibirsk : Science, 1993. — 257 p.
2. Drozdov, A.V. Hydrogeology of the frozen ground of the Western Yakutiya diamond deposits [Text] / A.V. Drozdov, N.A. Iost, V.V. Lobanov. — Irkutsk : IGTU, 2008. — 507 p.
3. Gaziev, E.G. Rocky grounds of concrete dams [Text] / E.G. Gaziev. — M. : ASV, 2006. — 280 p.
4. Bomkin, S.V. Classification of mechanisms of abnormal situations at hydrotechnical structures in the cryolite zone [Text] / S.V. Bomkin, A.M. Suhno // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 52–63.

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 728.61(479.224)

М.В. СКУДНЕВА

### ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АБХАЗСКОГО ЖИЛИЩА В КОНЦЕ XVIII — НАЧАЛЕ XX в.

Рассматриваются вопросы размещения абхазских поселений, выявляются основные особенности размещения и типы жилищ, сложившихся под влиянием природно-климатических, социально-экономических и историко-культурных факторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: абхазское жилище, поселение, особенности развития жилого дома.

*Абхазы никогда не селятся скученно, как кубанские горцы, а живут, занимая большие территории хуторами, окруженными фруктовыми садами или пастбищами... [1]*

Абхазская община занимала большие территории, расселяясь цепью на десятки километров и разделяясь на несколько поселков, представлявших собой родовые поселения. Жилища рассредоточивались по долинам рек, холмам, равнинам и ущельям на больших расстояниях друг от друга.

Абхазские поселения, так же как селения в Мегрелии, Имеретии и в других частях Западной Грузии, располагались живописно, свободно без всякой системы, представляя собой раскинувшиеся на значительном расстоянии усадьбы. Соседние селения фактически сливались, а границей между ними служили элементы природного и культурного ландшафта (реки, холмы, проселочные дороги и др.).

Устойчивость хуторского типа поселений объясняется прежде всего присутствием на территории дореволюционной Абхазии многочисленных родов. На отдельных хуторах (в одном дворе) размещалось по 2–3 хозяйства, принадлежавших отделившимся детям главы семьи, занимавшим иногда целые поселки. В пределах фамильной усадьбы были предусмотрены свои родовые кладбища с оригинальными надмогильными памятниками. Вместе с тем на старое абхазское селение наложили свой отпечаток и феодальные отношения. Общественным центром старого селения являлась усадьба феодала.

После упразднения бывших сельских общин и образования на их территории деревень пространства между селами существенно уменьшаются. К еще большему сокращению расстояний привело создание почти во всех районах Абхазии, в начале XX в., колхозных, переселенческих населенных пунктов. Хуторской образ жизни сохраняется и поныне в старых селах, а в прошлом он распространялся на все Черноморское побережье Кавказа. Об этом свидетельствует известный ученый И.И. Понтюхов, который в своих очерках писал: «Характерная особенность расположения жилищ населения Черноморского бассейна — разбросанность там, где

позволяет местность, каждый дом стоит особняком и отдален от дома соседей на 40–50–100 и более метров. Окруженный большим двором, садом, пашнями он представляется самостоятельным хутором» [2].

Вынужденные переходы с места на место (нашествия извне и постоянные войны феодалов между собой, кровная вражда и т.д.) происходили до половины XIX в., однако тип и характер жилища старой Абхазии, как и всей Западной Грузии, обуславливался комплексом причин. Факторами, повлиявшими на сложение основных типов жилища абхазов, стали:

1) обилие доступного строительного материала (рододендрон, азалия, дуб, каштан, орех, чинара, тис, бук и др.);

2) почвенно-климатические условия местности (наличие болот, большое количество осадков);

3) переселенческий образ жизни (постоянные переходы скотоводов с одного пастбища на другое и др.).

Современное абхазское поселение редко отличается от старого. Наряду со старыми усадьбами и сейчас имеется большое количество сел с правильной планировкой, прямыми и довольно широкими улицами, разделяющими поселение на кварталы. Административным и общественным центром такого села являлась площадь, вокруг которой находились исполком, школа, клуб, администрация и общественные учреждения, а основным типом застройки стало жилище. Остановимся более подробно на характеристике абхазской усадьбы, ее основных элементах и особенностях двора.

Усадьба состояла из таких элементов, как двор, огород, огороженный участок (для пастьбы телят, лошадей) — «ахаара», небольшие пахотные поля для посева проса, льна, конопли, хлопка и виноградника и кладбище. Следует отметить, что зонирование территории усадьбы зависело от расположения всех ее частей и от рельефа местности. Заборы, которыми обносились огороды, пахотные поля, сенокосы, были весьма разнообразны. Преобладали плетеные и бревенчатые заборы, одновременно с бревенчатыми бытовали каменные ограды из булыжника без известкового раствора, живые изгороди из густо посаженных деревьев и зарослей кустарника (ежевика).

Богатые усадьбы князей и дворян отличались от крестьянских величиной и количеством жилых и хозяйственных построек. Они огораживались каштановым или дубовым частоколом, с набитыми поперечными плашками, в то время как жилье крестьянина было невелико с небольшим количеством надворных построек и забором в виде полуразвалившегося плетеного частокола или без него. Вблизи усадьбы на видном и красивом месте, обычно возле проезжей части (дороги), в саду или же на горке, располагалось родовое кладбище.

Характер и размер усадьбы к началу XX в. сильно изменились. Современная усадьба в новой деревне имеет правильную четырехугольную форму, примыкая одной стороной к улице. Среднюю часть этой стороны занимает двор со своей планировкой.

В абхазской усадьбе двор приобрел важное значение. Иногда у высших сословий встречалось несколько дворов: жилой и скотный, для пасеки и хозяйственных построек. Его величина зависела от ландшафтных особенностей местности и материального достатка владельца. В нагорных районах Абхазии размер двора был незначительный, в то время как в низменных достигал 1 га. Огород, сад и другие уголья, расположенные по бокам и сзади двора, имели правильную планировку. Во дворе высаживалось несколько тенистых деревьев, служивших убежищем для семьи и

гостей во время летнего зноя, предпочтение отдавалось грабу. По древним обычаям края старшие в роде часто собирались под вековыми липами, орехами и сообща решали вопросы. Двор являлся неотъемлемой и, пожалуй, основной частью усадьбы, чем более ровную площадь он занимал, тем почетнее считалось это для самой усадьбы.

Прежде чем приступить к постройке жилища, абхазы долго и тщательно подыскивали не только удобное, подходящее, но и «счастливое» место, на котором семья могла бы жить благополучно.

Все абхазские жилые постройки по форме и конструкции можно подразделить на два основных типа: круглые и четырехугольные. Внутри этих основных типов жилищ выделяются несколько подтипов по форме построек, что соответствует эволюции развития абхазских жилищ от простого к сложному, от низшего к высшему.

Нижеописываемые круглые плетеные и четырехугольные жилые постройки, а также каменные и кирпичные дома, отражают собой последовательные ступени в эволюционном развитии абхазского жилища, тесно связанные с природно-климатическими особенностями местности, экономическим и культурным развитием живущих там родовых общин.

**Круглые жилые постройки** — конусообразный шалаш с заостренным концом, цилиндроподобный. Старейшины рассказывали, что такие постройки являлись основным видом жилья абхазов в старину и встречались повсюду, но местами наибольшего их распространения были горные и предгорные районы бзыбской, гумистинской Абхазии.

**4-угольные дома с 4-скатными крышами** подразделяются на следующие подтипы:

- 1) 4-угольные плетеные постройки без основания и фундамента;
- 2) 4-угольное плетеное жилище с деревянным основанием;
- 3) вытянутый в ширину дом.

После круглых плетеных построек эти дома становятся основным видом 4-угольных плетеных жилищ абхазов. Местами наибольшего их распространения явились горные районы, встречаются они в селах Члоу, Лыхны и др.

Вытянутый в ширину дом у большинства крестьян был с земляным полом, без потолка и перегородки, небольших размеров с 4-скатной соломенной крышей. У богатых он гораздо больших размеров и состоял из нескольких отделений, обычно из 3–4 комнат под одной крышей.

Основываясь на приведенных данных, можно полагать, что удлиненный тип дома был жилищем большой семьи. Дети проживали с родителями в одном дворе в одном или нескольких подобных домах. Следует отметить, что границей распространения древнейших плетеных жилищ на юге Черноморского побережья, по материалам исследователей, является Кахетия. На северо-западе плетеные хижины существовали по всему Черноморскому побережью у черкесских племен и продвигались далее на север.

**4-угольные деревянные дома (бревенчатые)** представлены тремя подтипами:

- 1) простой бревенчатый дом;
- 2) деревянный дощатый дом;
- 3) деревянный дощатый дом на столбах.

Первыми видами деревянных жилищ в Западной Грузии были бревенчатые. С усовершенствованием железных орудий труда началось строительство дощатых домов, сначала из отесанных, а с появлением пилы, из распиленных и выструганных досок.

Первые сведения о бревенчатых постройках в древней Колхиде, куда входила и территория современной Абхазии, мы находим у римского архитектора Витрувия в его работе «De architecture», написанной между 46–13 гг. до н.э. Он писал: «У народов колхов в Понте вследствие изобилия лесов кладут прямо на землю по правую и левую стороны целые бревна, оставив между этими двумя рядами расстояние, равное длине бревен, затем на обоих концах этих рядов кладут поверх два других ряда поперек, таким образом, окружается пространство жилища, лежащее посреди. Затем колхи на 4-х сторонах попеременно на двух противоположных накладывают бревна, соединяя углы и образуя стены, и кверху отвесно от основания возводят избы, а промежутки, которые остаются между бревнами вследствие толщины материала, они заделывают щепками и глиною. Точно также укорачивая концы поперечных балок и суживая их постепенно в виде уступов, они возводят крышу с 4-х сторон кверху и образуют в середине пирамидообразную верхушку, которую они покрывают листвою и глиною, и таким грубым способом строят сводчатые крыши своих изб» [3].

Изучение текста Витрувия о колхидском доме и исследование сохранившихся грузинских «дарбази» (народное жилище) дают возможность полагать, что «колхидский дом» Витрувия — прототип распространенного в Грузии и по сей день «дарбазного» жилища, являющегося древнейшим типом жилого дома и воплощенного, в переработанном виде, в основе типа монументального центрально-купольного храма.

Бревенчатый дом первоначально делали с земляным полом, без потолка и перегородки, с 2- и 4-скатной соломенной крышей, с небольшим навесом впереди и двумя деревянными дверьми спереди со стороны навеса и с обратной стороны. От простого бревенчатого перешли к строительству сплошных дощатых домов, которые являются результатом развития бревенчатых жилищ, как правило, с 4-скатной крышей, крытой соломой или полевицей. В однокамерном деревянном доме не было окон и свет проникал только через двери и щели. Стены с внутренней стороны, крыша и потолочные балки были покрыты копотью и сажей. Дым выходил через двери, щели стен и крышу жилья, но в пасмурную погоду он кружился по комнате, разъедая глаза его обитателей.

Деревянный дощатый дом строился с навесом, перегородкой внутри и с 4-скатной крышей из папоротника или соломы. Пол первого отделения был земляной с очагом в середине, без потолка и с двумя деревянными дверьми спереди и сзади. Постепенно совершенствуясь, он превратился в городской дом, состоящий целиком из досок, на деревянных столбах из твердой породы с полом и потолком, с просторным на всю длину дома живописным балконом, перила, балясины и карнизы которого украшались фигурной резьбой, с камином и с 3–4 высокими окнами, выходящими на балкон. Кровля 4-скатная обшивалась дранью, у богатых — черепицей.

В эволюции деревянного дома можно проследить некоторые особенности, ставшие результатом более поздних преобразований, такими особенностями следует считать:

- превращение очага из открытого костра внутри жилья в примыкающий к стене камин с прямой трубой — раструбом;
- разделение дома под одной крышей на несколько помещений-отделений;
- использование черепицы для кровли, устройство открытых балконов, украшение их резьбой и колоннами;

— открытые галереи на втором этаже домов крупных феодалов.

Установить точную дату возникновения в Абхазии деревянных домов не представляется возможным. Авторы XVII в. А. Ламберти и Ж. Шарден указывают на большое количество у мегрелов деревянных домов, которые описывают довольно подробно, причем в таких домах, хотя и невзрачных, жили и крестьяне. Наличие у абхазов подобных жилищ ими не зафиксировано, однако надо полагать, что деревянные дома были у отдельных зажиточных лиц.

**Каменные и кирпичные дома.** В конце XVIII — начале XIX в. князья, дворяне и отдельные зажиточные крестьяне стали строить 2-этажные дома, причем первый этаж из круглого камня — булыжника, скреплявшегося глиной и известью, над первым этажом надстраивали второй этаж из дерева. Затем появились 2-этажные каменные и кирпичные дома. Место выбиралось на возвышенности, преимущественно с крутыми склонами. Дом строили так, чтобы он одновременно служил и оборонительным сооружением, способным выдержать осаду.

В начале XX в. все больше появлялось новых, современных 2-этажных каменных и кирпичных домов для колхозников. С приходом советской власти крестьяне получили возможность строить просторные 2-этажные кирпичные дома, крытые черепицей, асбестовым шифером, простым и оцинкованным железом, со множеством помещений, с разукрашенными резьбой балконами, верандами и крылечками. Нижний этаж возводился из камня, а верхний — из кирпича. Архитектурное решение приспособлялось к новым требованиям, сохраняя традиционные приемы использования резных украшений в оформлении экстерьера. Широкие и просторные балконы стали неотъемлемой частью домов Западной Грузии и Абхазии. Активное применение в планировке дома балконов и террас породило климат данной местности. Исторически сложилось так, что они были и по сей день служат лучшими приемными для гостей и семьи.

Длительный путь развития совершило жилище абхазов, степень совершенствования которого на различных этапах зависела от культурных и социально-бытовых потребностей людей, природно-климатических особенностей местности, а также уровня развития техники.

Если говорить о рассмотренных нами типах жилищ абхазов, то по прошествии времени мало что изменилось в укладе жизни абхазских общин в селах и деревнях, как правило, они сохранили приобретенные от предков манеру размещения и технику возведения своего жилища.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А д ж и н д ж а л, И.А. Из этнографии Абхазии [Текст] / И.А. Аджинджал. — Сухуми : Алашара, 1969.
2. П о н т ю х о в, И.И. О пещерных и позднейших жилищах на Кавказе [Текст] / И.И. Понтюхов. — Тифлис, 1896. — С. 98.
3. В и т р у в и й. Десять книг об архитектуре [Текст] / Витрувий; пер. Ф.А. Петровского. — М. : Изд-во Акад. архитектуры, 1936. — Т. 1. — 331 с.

*СКУДНЕВА Марина Валерьевна, канд. архитектуры, доц.; E-mail: skudneva74@mail.ru*  
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 17.06.13

**Skudneva Marina Valerievna**, candidate of architecture, assistant professor; E-mail: skudneva74@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF THE ABKHAZIAN HOME IN THE PERIOD END XVIII — EARLY XX centuries**

The article deals with the placement of the Abkhazian settlement, identifies the main features of the placement and types of dwellings, formed, under, the influence of climatic, socio-economic, historical, and cultural factors.

**Key words:** abkhazian home, housing, settlement features of development of a residential house.

### REFERENCES

1. Ajinjal, I.A. From the ethnography of Abkhazia [Text] / I.A. Ajinjal. — Sukhumi : Alasara, 1969.
2. Pontyuchov, I.I. Of cave dwellings and later in the Caucasus [Text] / I.I. Pontyuchov. — Tiflis, 1896. — P. 98.
3. Vitruvius. Ten Books on Architecture [Text] / Vitruvius; transl. F.A. Petrovsky. — M. : Publishing House Academy of Architecture, 1936. — Vol. 1. — 331 p.

---

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 693.547.32.001.57

А.И. ГНЫРЯ, М.М. ТИТОВ, С.М. КУЗНЕЦОВ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОВОРОТНОГО БУНКЕРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Для оценки надежности работы поворотных бункеров создана база данных на основе результатов натурных испытаний этих устройств. После формирования выборки проверена ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Рассчитаны надежность и риск завершения запланированного объема бетонных работ.

Ключевые слова: поворотный бункер, надежность, модель, организационно-технологическая надежность, организационно-технологический риск.

Метод электротепловой обработки бетона на стройках и заводах ЖБИ с предварительным электроразогревом бетонной смеси по проходящим в бетонной смеси и твердеющем бетоне физическим процессам является наиболее эффективным, т.е. обеспечивающим минимальный расход энергии при максимальной скорости набора прочности в первые 1–2 сут до величин 40–70 %  $R_{28}$  [1, 2].

Для анализа работы поворотных бункеров создана база данных<sup>1</sup>. Информация, накопленная в ней, позволила с помощью шагового регрессионного метода построить зависимости коэффициента использования поворотных бункеров от коэффициентов готовности, технического использования, сохранения эффективности и времени наработки на отказ поворотного бункера (таблица). В таблице также приведены

**Основные характеристики моделей коэффициентов использования  
по времени поворотного бункера**

Показатель	$K_B = 1,272 - 0,6952 K_T$	$K_B = 0,0039 + 0,9637 K_{ТН}$	$K_B = 0,0274 + 0,7978 K_{C9}$	$K_B = 0,701 - 0,000112 T_H$
Доля объясненной вариации, %	0,43	99,67	92,78	0,42
Коэффициент множественной корреляции	0,0653	0,9983	0,9643	0,0646
Средний отклик	0,597	0,597	0,597	0,597
Стандартная ошибка, % от среднего отклика	17,46	1,80	4,64	17,46
Стандартная ошибка	0,1042	0,0060	0,0277	0,1043
Общий F-критерий регрессии	0,59	41540,4	1827,1	0,58
Табличное значение общего F-критерия	3,89	3,89	3,89	3,89

<sup>1</sup> Гныря А.И., Титов М.М., Кузнецов С.М. Комплексная оценка надежности применения поворотного бункера для электроразогрева бетонных смесей // Изв. вузов. Строительство, 2013. № 6. С. 43–51.

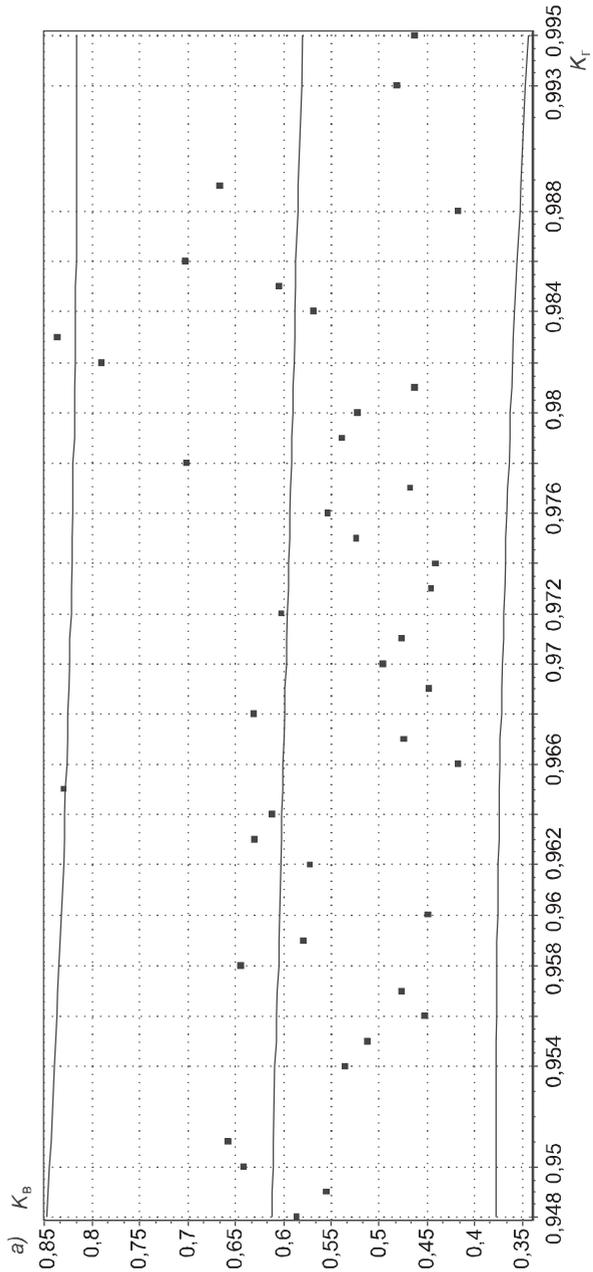
основные характеристики моделей коэффициентов использования по времени.

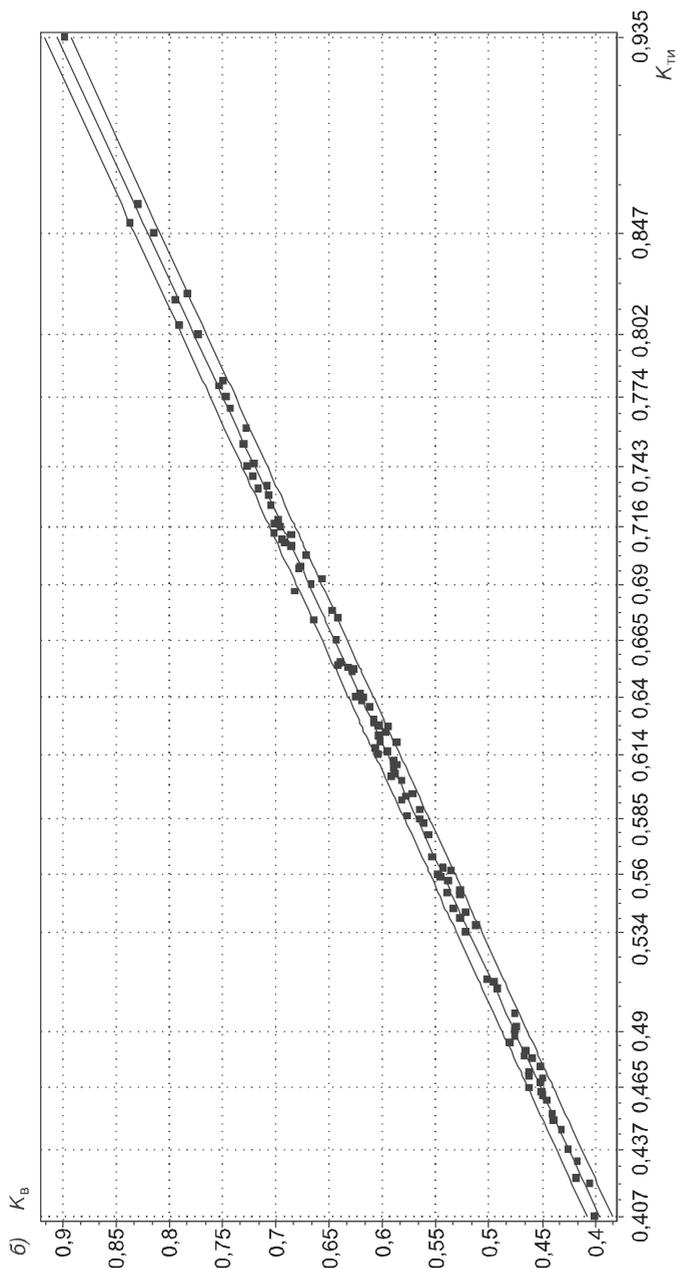
Для всех моделей, указанных в таблице, построены доверительные интервалы с уровнем риска 5 %. На рис. 1 показаны доверительные интервалы моделей коэффициентов использования по времени в зависимости от коэффициентов готовности, технического использования, сохранения эффективности и времени наработки на отказ поворотного бункера.

Предложенные в [3] для оценки надежности гидротранспортных систем комплексные показатели надежности не дают полной информации о работе строительных машин на конкретных объектах, так как не учитывают технологию и организацию строительства в конкретных производственных условиях. На наш взгляд, целесообразно дополнить рассматриваемые комплексные показатели надежности показателем организационно-технологической надежности.

Под организационно-технологической надежностью поворотного бункера понимается вероятность безотказной работы бункера при разогреве бетонных смесей. Основным показателем для оценки надежности служит коэффициент использования по времени  $K_B$ , так как он позволяет при известной технической производительности работы бункера легко найти эксплуатационную производительность последнего.

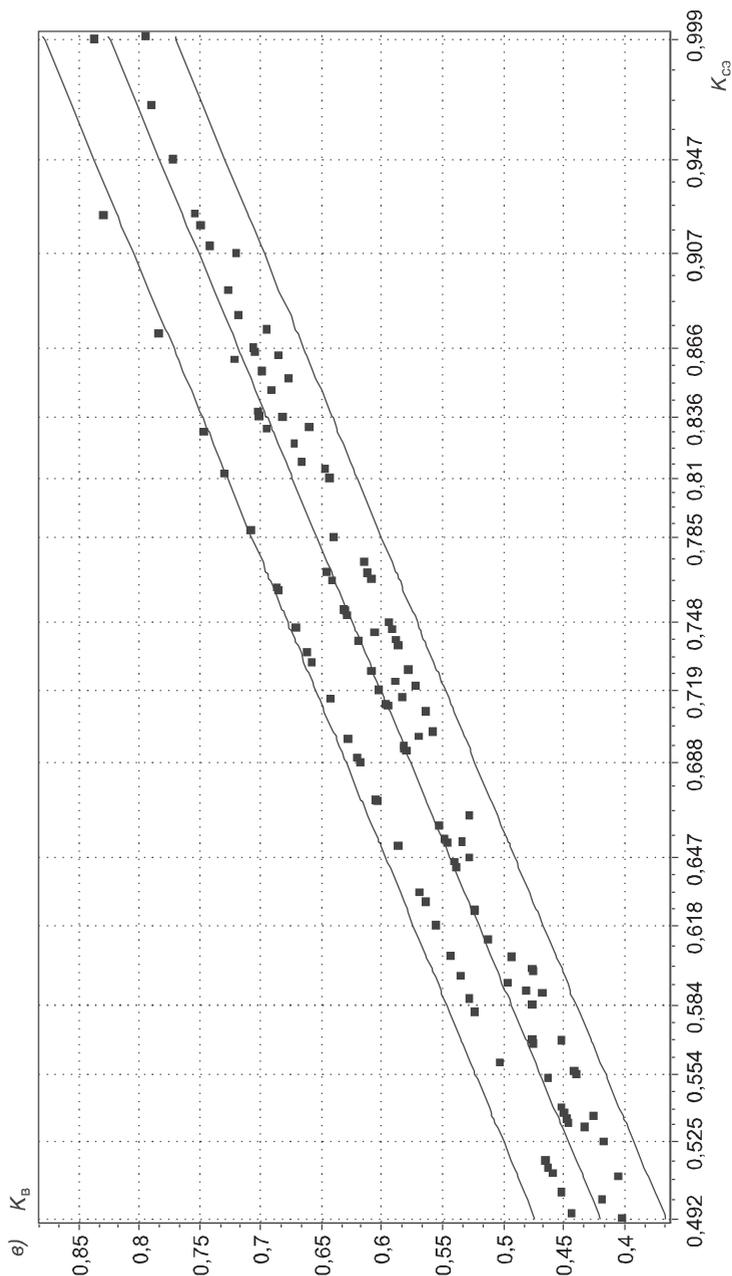
На рис. 2, 3 приведены зависимости организационно-технологической надежности и плотности распределения вероятности с учетом выполнения работы на конкретных производственных объектах.





Характеристика выборки коэффициента использования по времени поворотных бункеров:

Фактор	$K_{в}$
Количество опытов, шт.	140
Количество связей, шт.	3
Уровень значимости	0,05
Минимальное значение фактора	0,402
Максимальное значение фактора	0,899
Выборочное среднее значение фактора	0,597
Среднее линейное отклонение фактора	0,0837
Среднее квадратическое отклонение фактора	0,1038
Стандартное отклонение фактора	0,1041



Средняя квадратическая ошибка фактора . . . . .	0,0088
Ошибка, % от среднего значения фактора . . . . .	1,4736
Эмпирическая дисперсия выборки . . . . .	0,0108
Вариации отклонения от среднего значения . . . . .	0,0070
Риск отклонения от среднего значения . . . . .	0,0837
Коэффициент вариации . . . . .	0,1737
Вычисленное значение критерия Пирсона . . . . .	12,75
Табличное значение критерия Пирсона . . . . .	7,86
Количество интервалов . . . . .	8

Кривая нормального распределения (см. рис. 3) выражается уравнением

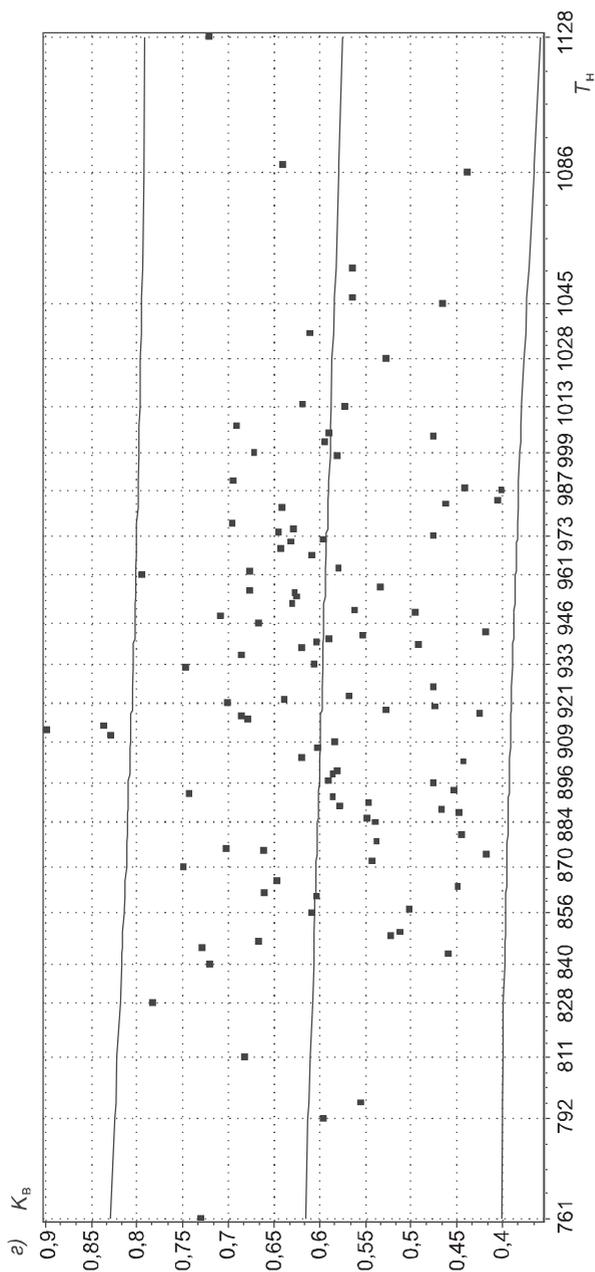


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования по времени  $K_B$  от коэффициента готовности  $K_r$  (а), коэффициента технического использования  $K_{ти}$  (б), коэффициента сохранения эффективности  $K_{сэ}$  (в) и от времени наработки на отказ  $T_H$  (г)

$$\rho_{\Pi_C} = \frac{1}{\sigma_{\Pi_C} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Pi_C - \overline{\Pi_C})^2}{2\sigma_{\Pi_C}^2}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\Pi_C}$  — плотность распределения вероятности производительности поворотного бункера;

$\overline{\Pi_C}$  — значение производительности поворотного бункера;

$\overline{\Pi_C}$  — средняя арифметическая ряда;

$\sigma_{\Pi_C}$  — среднее квадратическое отклонение производительности поворотного бункера;

$\pi$  — постоянное число (отношение длины окружности к длине ее диаметра);

$e$  — основание натурального логарифма.

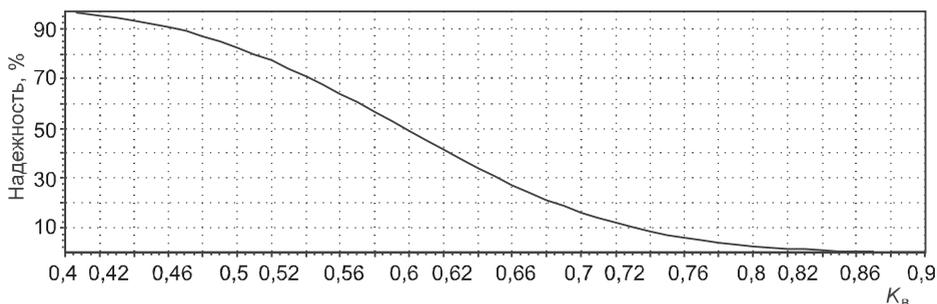


Рис. 2. Организационно-технологическая надежность работы поворотного бункера

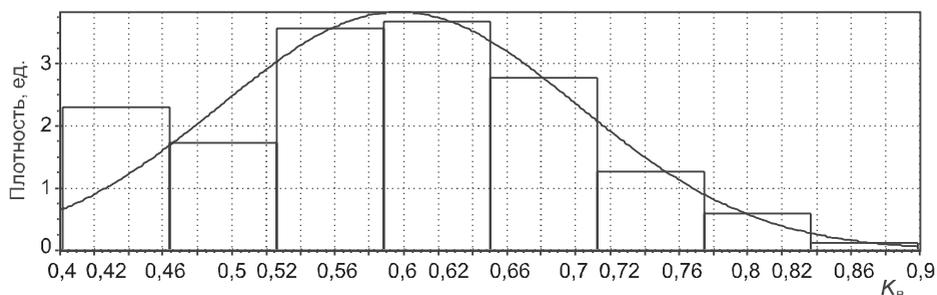


Рис. 3. Плотность распределения вероятности коэффициентов использования поворотного бункера по времени

Известно, если площадь, ограниченную кривой нормального распределения, принять за 1 или 100 %, то можно рассчитать площадь, заключенную между кривой и любыми двумя ординатами. Воспользовавшись формулой (1), можно вычислить организационно-технологический риск  $P$  (в процентах) недостижения поворотным бункером производительности  $\Pi_T$  по следующей формуле

$$P = \frac{100}{\sigma_C \Pi \sqrt{2\pi}} \int_0^{\Pi_T} e^{-\frac{(\Pi_C - \overline{\Pi_C})^2}{2\sigma_C^2}} d\Pi_C, \% \quad (2)$$

Тогда организационно-технологическая надежность  $H$  достижения поворотным бункером производительности  $\Pi_T$  в процентах рассчитывается по формуле

$$H = 100 - P, \% \quad (3)$$

**Вывод.** Предложен метод расчета организационно-технологической надежности работы поворотных бункеров для электроразогрева бетонных смесей. Метод может быть использован для оценки надежности работы и других устройств, систем, комплектов, отдельных строительных машин и строительных процессов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Г н ы р я, А.И. Совершенствование устройств предварительного электроразогрева бетонных смесей [Текст] / А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов // Строительные и дорожные машины. — 2011. — № 2. — С. 22–25.
- Г н ы р я, А.И. Организационно-технологическая надежность устройств для электроразогрева бетонных смесей [Текст] / А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов // Механизация строительства. — 2011. — № 3. — С. 2–5.

3. Кузнецов, С.М. Оценка технической надежности работы гидротранспортных систем [Текст] / С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. — 2013. — № 8.

*ГНЫРЯ Алексей Игнатьевич, д-р техн. наук, проф.*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

*ТИТОВ Михаил Михайлович, д-р техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КУЗНЕЦОВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доц.*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено 11.06.13

**Gnyrya Alexey Ignatyevich**, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Titov Mikhail Mikhaylovich**, doctor of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kuznetsov Sergey Mikhaylovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

### **MODELLING OF RELIABILITY OF THE ROTARY BUNKER FOR THE ELECTROWARMING UP OF CONCRETE MIXES**

For an assessment of reliability of work turn of bunkers the database on the basis of results of natural tests of these devices is created. After selection formation its accessory to the law of normal distribution by means of criterion of a consent of Pearson was checked. Reliability and risk of end of the planned volume of concrete works.

**Key words:** rotary bunker, reliability, model, organizational and technological reliability, organizational and technological risk.

#### REFERENCES

1. Гныря, А.И. А carry to perfection of devices of a preliminary electrowarming up of concrete mixes [Text] / A.I. Gnyrya, M.M. Titov, S.M. Kuznetsov // Construction and road cars. — 2011. — N 2. — P. 22–25.
2. Гныря, А.И. Organization and technological reliability of devices for an electrowarming up of concrete mixes [Text] / A.I. Gnyrya, M.M. Titov, S.M. Kuznetsov // Mechanization in construction. — 2011. — N 3. — P. 2–5.
3. Kuznetsov, S.M. Assessment of technical reliability of work of hydrotransport systems [Text] / S.M. Kuznetsov // Economy of the railways. — 2013. — N 8.

УДК 69.058.8

С.И. ЗАВАЛИШИН, М.С. ХЛЫСТУНОВ, Ж.Г. МОГИЛЮК

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕКТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ**

Рассматриваются математические проблемы математического обеспечения пространственного контроля векторных параметров динамической устойчивости строительных объектов. Представлены результаты анализа нормативных документов в плане практической реализации задач динамического обследования зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** здания и сооружения, динамическая устойчивость, обследование, математические проблемы.

**Введение.** Проблема динамического обследования и мониторинга эволюции векторных параметров технического состояния экологически опасных объектов техносферы в современной научно-методической трактовке была сформулирована в проектах программ научно-технического сотрудничества Минобразования РФ с Минатомом и ФССС России [1, 2], а также в научно-исследовательских работах, выполненных в МГСУ в период 2005–2008 гг. в соответствии с решениями Московского конгресса по безопасности мегаполисов в рамках секции № 7 «Фундаментальные проблемы безопасности и системной динамической устойчивости ответственных строительных объектов мегаполиса» на научно-практической конференции «Безопасность строительного комплекса и жизнеобеспечение граждан».

Практическая важность аттестации и мониторинга динамических характеристик строительных объектов, сформулированная в работах [1–3], нашла свое отражение и развитие в ряде документов, включая РБ-045-08 «Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии», ГОСТ Р 53778–2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», РМ-2957 «Рекомендации по эксплуатации многофункциональных высотных зданий и комплексов». Вместе с тем их формальное внедрение в нормативную практику сопровождается нарушением математических критериев технической эффективности предлагаемых способов решения практических метрологических задач [4].

**Метрологический анализ предписаний нормативных документов.** Рассмотрим с этой точки зрения ГОСТ Р 53778–2010, рекомендации РМ-2957 и руководство по безопасности объектов атомной энергетики РБ-045-08. К числу динамических характеристик зданий и сооружений в этих документах относят параметры зданий и сооружений, включающие в себя периоды и декременты основных форм собственных колебаний и их гармоники, а также передаточные функции. По результатам натурных исследований данных параметров формулируют техническое заключение об уровне безопасности эксплуатации объекта.

© Завалишин С.И., Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г., 2013

Проведем математический анализ проблемы практической реализации нормативных требований с позиций выполнения требований по достаточности информационного обеспечения при применении современных информационно-измерительных систем.

1. Для экспериментального определения передаточной функции, в том числе описывающей резонансы и декременты затухания пространственной конструкции, должны быть строго сформулированы требования по положению источника динамического возбуждения и точки регистрации результирующих колебаний конструкции. В реальной конструкции таких пар точек может быть выбрано достаточно большое количество. Поэтому при составлении программы и методики натурных динамических обследований должны быть учтены и определены зоны возможного положения источника максимальных динамических нагрузок в пространстве строительной конструкции или основания, или на территории окружающей застройки. Должна быть решена метрологическая и математическая проблема практического достижения достоверности методики исследования и паспортизации передаточной функции. Эта проблема обусловлена тем, что в отличие от АЧХ, которая служит Фурье-образом динамического «портрета» здания и может быть построена прямым способом, т.е. по наблюдению реакции объекта на установившиеся гармонические нагрузки, передаточная функция является лапласовским отображением динамического «портрета» здания. Кроме того, необходимо обеспечить математическую корректность восстановления по данным отдельных натурных измерений компонент истинных направлений и модулей векторов регистрируемых колебаний. Для решения этой математической задачи следует преодолеть сложность восстановления в широкой полосе частот фазовых сдвигов каждой спектральной составляющей, так как в реальной ситуации имеет место нарушение в пространстве строительной конструкции и основании синфазности зарегистрированных компонент векторов линейных и угловых динамических нагрузок, т.е. векторов продольных и поперечных мод колебаний.

2. Следует иметь в виду, что сравнительный анализ фазовых характеристик реальных записей колебаний не позволит тривиально решить задачу идентификации форм собственных колебаний строительных конструкций, так как имеет место частотная дисперсия искажений по фазе и амплитуде в пространстве строительной конструкции, в системе измерения, передачи, фильтрации, дискретизации и на последнем этапе вычисления численными методами динамических характеристик зданий и сооружений по данным мониторинга.

3. Следует избегать методической ошибки при построении схемы мониторинга или динамических испытаний зданий и сооружений, ограниченной использованием трехкомпонентных систем измерения линейных ускорений. Подобная некорректность построения схемы измерения наблюдается в отчетных материалах полевых партий рабочих групп МАГАТЭ на зарубежных АЭС и в материалах динамических обследований, выполняемых непрофильными отечественными фирмами и предприятиями. Острота проблемы нарушения математического критерия достаточности при использовании трехкомпонентных схем мониторинга связана с неприемлемо низким уровнем достоверности идентификации собственных форм колебаний зданий и сооружений.

На основании вышеизложенного можно сделать общий вывод о том, что большинство современных методик динамических обследований с применением зарубежной и отечественной аппаратуры трехкомпонентно-

го контроля колебаний строительных конструкций не позволяют математически корректно и метрологически достоверно решить сопряженную с динамическими обследованиями задачу векторного анализа колебаний зданий и сооружений. В связи с этим проблема достоверности динамических обследований может быть решена только при использовании метрологически сертифицированных информационно-измерительных систем, способов, методов и методик, непосредственно предназначенных для измерения и определения динамических характеристик и форм колебаний строительных конструкций.

**Элементы математического анализа проблемы идентификации форм колебаний зданий и сооружений.** В общем случае под воздействием микросейсма, вибрационных и ударных техногенных динамических нагрузок в каждой точке строительной конструкции и ее основания фактически наблюдается присутствие всех возможных поперечных и продольных мод колебаний.

Возьмем прямоугольную систему координат с индексами орт  $i$ , которая, в общем случае, может не совпадать с главными осями форм или мод колебаний с индексами  $j$ . Будем считать, что число возможных основных типов форм колебаний равно 6, т.е. 3 линейных или продольных типа мод и 3 угловых или поперечных.

Тогда на каждый датчик системы мониторинга, размещенный, например, в некоторой  $m$ -й точке строительной конструкции или основания, поступает векторная сумма  $\mathbf{a}_{kp}$  линейных ускорений:

$$\mathbf{a}_{kp} = \sum_{n=0}^N \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^3 \mathbf{a}_{kpijn}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{a}_{kpijn}$  —  $i$ -я компонента линейного ускорения в результате возбуждения  $n$ -й гармоники  $j$ -й формы или моды колебаний, и векторная сумма  $\mathbf{a}_{kt}$  угловых ускорений:

$$\mathbf{a}_{kt} = \sum_{n=0}^N \sum_{j=4}^6 \sum_{i=1}^3 \mathbf{a}_{ktijn}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{a}_{ktijn}$  —  $i$ -я компонента углового ускорения в результате возбуждения  $n$ -й гармоники  $j$ -й крутильной формы или поперечной моды колебаний.

Если оси математической системы координат совпадают с главными осями форм колебаний конструкции, то сумма (1) может быть упрощена за счет уменьшения числа индексов  $j$  по формам колебаний:

$$\mathbf{a}_{kp} = \sum_{n=0}^N \sum_{j=4}^6 \sum_{i=1}^3 \mathbf{a}_{kpijn}. \quad (3)$$

Если ограничиться основными формами колебаний, когда отсутствует возбуждение гармоник, то сумма (3) за счет удаления суммирования по индексу  $n$  примет вид:

$$\mathbf{a}_{kp} = \sum_{j=4}^6 \sum_{i=1}^3 \mathbf{a}_{kpijn}. \quad (4)$$

Однако даже в идеализированном случае, когда  $N = 0$ ,  $j = 4, 5, 6$ , а математические или измерительные оси совпадают или параллельны главным осям форм колебаний, число искомых измеряемых параметров (неизвестных) в потоке данных мониторинга только в одной точке будет

равно 9. В связи с этим следует важный математический вывод о том, что для математически корректного решения задачи натурального исследования форм и параметров резонансных колебаний строительных конструкций и систем типа «объект-основание» в каждой контролируемой точке объекта должны быть размещены по 6 датчиков, т.е. по одному из всех 6 возможных мод колебаний (3 датчика линейных и 3 датчика угловых ускорений). Дополнительные три уравнения можно получить, используя канонические формулы для центростремительных и касательных ускорений, возникающих в результате возбуждения крутильных или поперечных мод колебаний:

$$a_{\tau} = \varepsilon R \quad \text{и} \quad a_c = \omega^2 R,$$

где  $a_{\tau}$ ,  $a_c$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon$ ,  $R$  — соответственно тангенциальное и радиальное ускорение, угловая скорость и угловое ускорение, расстояние от точки измерения до оси кручения.

**Закключение.** Проведенный математический анализ задачи определения по данным натурных измерений динамических характеристик зданий и сооружений позволяет утверждать, что минимальным требованием обеспечения достаточности информационного потока данных измерений являются применение шестикомпонентных систем виброметрии, определение точного расположения главных осей крутильных форм колебаний, а также фильтрации сигналов датчиков с целью устранения в их показаниях высших гармоник этих колебаний. В ином случае, даже при использовании распределенных систем многоточечного измерения в пространстве строительной конструкции, задача динамического обследования по идентификации основных форм колебаний строительной конструкции и определению их периодов и декрементов затухания существенно усложняется (до настоящего времени она не получила строгого математического и сертифицированного метрологического решения).

Результаты исследований МГСУ с использованием специально разработанных исследовательских шестикомпонентных вибродозиметрических станций СВД-60МВ и программно-алгоритмического комплекса «Композит-7» подтвердили основные теоретические положения и выводы настоящей статьи, а также необходимость усиления образовательной подготовки и повышения квалификации специалистов в области динамических обследований в части получения дополнительных знаний и компетенций по фундаментальному и общепрофессиональному циклу профильных дисциплин [4].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хлыстунов, М.С. Теория геодинамической безопасности АС [Текст] / М.С. Хлыстунов // Научно-инновационное сотрудничество : I Науч.-техн. конф. Минатома и Минобрания России : сб. науч. тр. — М. : МИФИ, 2002. — С. 17–19.
2. Хлыстунов, М.С. Прикладная динамическая теория упругости и математическое моделирование динамических нагрузок в системах типа «объект-основание» [Текст] / М.С. Хлыстунов // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан : сб. докл. темат. науч.-практ. конф. Ч. 1. В рамках научно-технического конгресса по безопасности «Безопасность — основа устойчивого развития регионов и мегаполисов». — М. : МГСУ, 2005. — С. 261–267.
3. Хлыстунов, М.С. Вибродозиметрический метод проектной оценки динамических и геоэкологических рисков [Текст] / М.С. Хлыстунов, Ж.Г. Могилюк // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан : сб. докл. темат. науч.-практ. конф. Ч. 1. В рамках научно-технического конгресса по безопасности «Безопасность — основа устойчивого развития регионов и мегаполисов». — М. : МГСУ, 2005. — С. 268–275.

4. Подувальцев, В.В. Законодательная метрология : учеб. пособие [Текст] / В.В. Подувальцев. — М. : Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 271 с.

*ЗАВАЛИШИН Сергей Иосифович, канд. техн. наук, проф., директор НИИ экспериментальной механики; E-mail: kru@mgsu.ru*

*Московский государственный строительный университет*

*ХЛЫСТУНОВ Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, проф.; E-mail: mcxmgmsu@mail.ru*

*Московский государственный строительный университет*

*МОГИЛЮК Жанна Геннадиевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: niilin@mail.ru*

*Московский государственный строительный университет*

Получено 28.06.13

**Zavalishin Sergey Iosifovich**, candidate of technical sciences, professor, director of the Institute of experimental mechanics; E-mail: kru@mgsu.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Hlystunov Mikhail Sergeevich**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: mcxmgmsu@mail.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Mogilyuk Zhanna Gennadijevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: niilin@mail.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

### **MATHEMATICAL PROBLEMS OF THE DISPLACEMENT VECTOR RECONSTRUCTION ACCORDING TO THE DYNAMIC SURVEYS**

The article deals the spatial vector parameters control mathematical provide problems of the building objects dynamic stability. The regulatory documents analysis materials results presented in terms of the buildings and constructions dynamic inspection problems practical realization.

Key words: buildings and structures, dynamic stability, examination, mathematical problems.

#### REFERENCES

1. Hlystunov, M.S. The theory of NPP geodynamic safety [Text] / M.S. Hlystunov // Scientific works collection I Scientific and technical conference «Scientific-innovative cooperation Minatom and the Russia education Ministry». — М. : MIFI, 2002. — P. 17–19.
2. Hlystunov, M.S. The elasticity applied dynamic theory and dynamic loadings mathematical modeling in the systems of type «object-base» [Text] / M.S. Hlystunov // The reports collection of Thematic scientific and practical conference «The city construction complex and livelihood security of citizens». P. 1. In the framework of the Scientific-technical Congress on safety «Security — basis for sustainable development of regions and cities». — М. : MSUCE, 2005. — P. 261–267.
3. Hlystunov, M.S. Vibrating dosimetry method of project evaluation dynamic and geoeological risks [Text] / M.S. Hlystunov, Zh.G. Mogilyuk // The reports collection of Thematic scientific and practical conference «The city construction complex and livelihood security of citizens». P. 1. In the framework of the Scientific-technical Congress on safety «Security — basis for sustainable development of regions and cities». — М. : MSUCE, 2005. — P. 268–275.
4. Poduvaltsev, V.V. Legal Metrology: a training manual [Text] / V.V. Poduvaltsev. — М. : Publisher. MSTU named after N.E. Bauman, 2012. — 271 p.

УДК 69.05:658.562

В.И. ЛОГАНИНА, А.Н. КРУГЛОВА, О.А. ДАВЫДОВА

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА

Приведены сведения о влиянии погрешности измерения на вероятность принятия решения о приемке продукции при статистической нестабильности процесса производства. Показано на примере производства кирпича, что вероятность ошибки I рода возрастает при увеличении среднеквадратического отклонения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вероятность, контроль, достоверность, ошибки I рода, статистика.

Проведенные ранее исследования показывают, что качество строительных изделий и конструкций определяется в числе других факторов стабильностью и воспроизводимостью технологического процесса производства. В работах [1–3] приведены сведения о технологии настройки технологических процессов производства бетонных изделий.

Мониторинг и измерение являются неотъемлемой частью процесса производства строительных материалов и изделий. Если обозначить действительное значение контролируемого параметра через  $U_d$ , а предельные значения как  $U_{д.в}$  — наибольшее допускаемое значение параметра и  $U_{д.н}$  — наименьшее допускаемое значение, то условие годности объекта контроля (изделия):  $U_{д.н} \leq U_d \leq U_{д.в}$ . Это значит, что годными изделиями считаются те, чьи действительные значения контролируемых параметров, указанных в технических условиях, лежат между наименьшим и наибольшим допускаемыми значениями. На практике, однако, все измерения сопровождаются погрешностями, вызывающими приемку годных изделий по действительным отклонениям, выходящим за границы поля допуска (с вероятностью  $\alpha_i$ ), и ошибочную забраковку некоторой части годных изделий, действительные значения контролируемого параметра которых лежат в поле допуска (с вероятностью  $\beta_i$ ). Отклонения в результате забраковки происходят в границах предельно допустимой погрешности измерения  $\pm u_j$ .

Таким образом, объективность контроля качества изделия зависит от достоверности результатов, а следовательно, и точности средств измерения (СИ) [4]. Погрешность измерения  $u$  может вызвать искажение действительного значения контролируемого параметра, т.е. результат измерения  $U$ , содержащий случайную погрешность измерения  $u$  вблизи границ поля допуска на значение параметра изделия, приводит к неопределенности оценки значения контролируемого параметра, не давая возможности оценки действительной картины: находится ли контролируемый параметр в границах допуска или нет.

Таким образом, необходимым условием проведения измерительного контроля является установление предельно допускаемых значений контро-

лируемого параметра (поля допуска) и погрешности измерений (в данном случае погрешности СИ в единицах измеряемой величины  $U$ ). На основании результата измерения  $y$  принимают решение о годности контролируемого изделия. Кроме того, достоверность контроля будет определяться и настройкой технологического процесса производства, т.е. его статистической стабильностью и воспроизводимостью.

При любом виде и методе измерительного контроля каждого объекта эффективность применяемых решений на основе полученных результатов измерений  $y$  обусловлена набором случайных событий, составляющим полную группу событий, а именно вероятностью того, что контролируемое по конкретному параметру изделие:

- годно и будет признано годным;
- дефектно и будет признано дефектным;
- годно, но будет ошибочно признано дефектным — ошибка I рода (или ложный брак) ( $\alpha$ );
- дефектно, но будет ошибочно признано годным — ошибка II рода (или скрытый брак) ( $\beta$ ).

Для выяснения влияния погрешности измерения  $y$ , а также статистической нестабильности производства на результаты разбраковки изделий по контролируемому параметру допустим, что законы рассеивания действительных значений контролируемого параметра изделий и погрешностей измерений известны. Принимаем:

- 1) закон распределения показателей качества;
- 2) систематическая погрешность изготовления равна нулю;
- 3) поле допуска изделия  $\delta$  ограничено  $U_{д.н}$  и  $U_{д.в}$ , причем середина поля допуска (номинальное значение  $U_{ном}$ ) может не совпадать со средним значением показателя качества;
- 4) погрешность измерения  $y$  подчиняется нормальному закону со средним квадратическим отклонением  $\sigma_y$ , не имеет систематической составляющей и характеризуется практически предельным значением  $\pm y_d$ .

Модель измеренного  $i$ -го параметра  $n$ -параметрического объекта контроля имеет вид<sup>1, 2</sup>

$$z_i(t) = U_i(t) + y_i(t), \quad (1)$$

где  $U_i(t)$  — истинное значение измеряемого параметра;  
 $y_i(t)$  — погрешность, зависящая от времени и распределенная с плотностями вероятности  $f(U_i)$  и  $f(y_i)$  со среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{U_i}$  и  $\sigma_{y_i}$  соответственно.

Совместная плотность вероятности в модели (1) определяется выражением

$$f(U_i, y_i) = f(U_i)f(y_i | U_i), \quad (2)$$

где  $f(U_i)$  — априорное распределение измеряемого параметра;  
 $f(y_i | U_i)$  — условная плотность вероятности погрешности  $y_i$  при заданном сигнале  $U_i$ .

<sup>1</sup> Серых В.И., Порватов С.П., Сединин В.И. Многопараметрический контроль продукции: достоверность и затраты // Методы менеджмента качества. 2010. № 5. С. 48–52.

<sup>2</sup> Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1965. Кн. 1. 752 с.

Расчетные формулы для определения риска производителя ( $\alpha_i$ ) и риска потребителя ( $\beta_i$ ) имеют вид:

$$\alpha_i = \int_a^b f(U_i) \left[ \int_{-\infty}^{a_1} f(y_i | U_i) dy_i + \int_{b_1}^{\infty} f(y_i | U_i) dy_i \right] dU_i; \quad (3)$$

$$\beta_i = \int_{-\infty}^a f(U_i) \left[ \int_{a_1}^{b_1} f(y_i | U_i) dy_i \right] dU_i + \int_b^{\infty} f(U_i) \left[ \int_{a_1}^{b_1} f(y_i | U_i) dy_i \right] dU_i, \quad (4)$$

где  $[a_1; b_1]$  — интервал для погрешности  $y_i$ , при условии, что значения  $U_i$  попали в интервал  $[a; b]$ ;

$i$  — оцениваемый параметр.

Рассмотрим процесс производства кирпича керамического марки 100 как одного из распространенных видов строительных материалов. Верхний допуск составляет  $U_{д.в} = 12,5$  МПа, нижний допуск  $U_{д.н} = 10,0$  МПа. Рассмотрим три варианта.

**В а р и а н т 1.** По результатам выборки среднее значение предела прочности при сжатии не совпадает с серединой поля допуска и составляет  $U_d = 11,1$  МПа, среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,53$  МПа, погрешность измерения 1 %.

**В а р и а н т 2.** Среднее значение предела прочности при сжатии не совпадает с серединой поля допуска и составляет  $U_d = 10,8$  МПа, среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,62$  МПа, погрешность измерения 1 %.

**В а р и а н т 3.** Среднее значение предела прочности при сжатии совпадает с серединой поля допуска и составляет  $U_d = 11,25$  МПа, среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,41$  МПа, погрешность измерения 1 %. Результаты расчета приведены ниже.

Для варианта 1:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \int_{100}^{125} f(U_1) \left[ \int_{-\infty}^1 f(y_1) dy_1 + \int_{125}^{\infty} f(y_1) dy_1 \right] dU_1 = \\ &= \int_{100}^{125} f(U_1) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi(y_1) \Big|_a^1 + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi(y_1) \Big|_{125}^b \right] dU_1 = \\ &= \int_{100}^{125} f(U_1) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{1-1,11}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{a-1,11}{0,042}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \lim_{b \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{b-1,11}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1,25-1,11}{0,042}\right) \right] dU_1 = \\ &= \int_{100}^{125} f(U_1) [-\Phi(2,62) + 0,5 + 0,5 - \Phi(3,33)] dU_1 = \\ &= 0,005 \int_{100}^{125} f(U_1) dU_1 = \\ &= 0,005 \left( \Phi\left(\frac{125-111}{5,3}\right) - \Phi\left(\frac{100-111}{5,3}\right) \right) = \\ &= 0,005(0,4959 + 0,4812) = 0,0049. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= \int_{-\infty}^{100} f(U_1) \left[ \int_1^{125} f(y_1) dy_1 \right] dU_1 + \int_{125}^{\infty} f(U_1) \left[ \int_1^{125} f(y_1) dy_1 \right] dU_1 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_1) \left[ \Phi(y_1) \Big|_1^{125} \right] dU_1 + \int_{125}^{\infty} f(U_1) \left[ \Phi(y_1) \Big|_1^{125} \right] dU_1 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_1) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,11}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,11}{0,042}\right) \right] dU_1 + \\
&\quad + \int_{125}^{\infty} f(U_1) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,11}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,11}{0,042}\right) \right] dU_1 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_1) [0,4994 + 0,4956] dU_1 + \int_{125}^{\infty} f(U_1) [0,4994 + 0,4956] dU_1 = \\
&= 0,995 \left( \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{100-111}{5,3}\right) - \Phi\left(\frac{a-111}{5,3}\right) + \right. \\
&\quad \left. + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi\left(\frac{b-111}{5,3}\right) - \Phi\left(\frac{125-111}{5,3}\right) \right) = \\
&= 0,995 \left( \Phi\left(\frac{100-111}{5,3}\right) + 0,5 + 0,5 - \Phi\left(\frac{125-111}{5,3}\right) \right) = 0,02279.
\end{aligned}$$

Для варианта 2:

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= \int_{100}^{125} f(U_2) \left[ \int_{-\infty}^1 f(y_2) dy_2 + \int_{125}^{\infty} f(y_2) dy_2 \right] dU_2 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_2) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi(y_2) \Big|_a^1 + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi(y_2) \Big|_{125}^b \right] dU_2 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_2) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{1-1,08}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{a-1,08}{0,042}\right) + \right. \\
&\quad \left. + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi\left(\frac{b-1,08}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1,25-1,08}{0,042}\right) \right] dU_2 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_2) [-\Phi(1,9) + 0,5 + 0,5 - \Phi(4)] dU_2 = \\
&= 0,0288 \int_{100}^{125} f(U_2) dU_2 = \\
&= 0,0288 \left( \Phi\left(\frac{125-108}{5,3}\right) - \Phi\left(\frac{100-108}{5,3}\right) \right) = \\
&= 0,0288(0,4969 + 0,4015) = 0,0259.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta_2 &= \int_{-\infty}^{100} f(U_2) \left[ \int_1^{125} f(y_2) dy_2 \right] dU_2 + \int_{125}^{\infty} f(U_2) \left[ \int_1^{125} f(y_2) dy_2 \right] dU_2 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_2) \left[ \Phi(y_2) \Big|_1^{125} \right] dU_2 + \int_{125}^{\infty} f(U_2) \left[ \Phi(y_2) \Big|_1^{125} \right] dU_2 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_2) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,08}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,08}{0,042}\right) \right] dU_2 + \\
&\quad + \int_{125}^{\infty} f(U_2) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,08}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,08}{0,042}\right) \right] dU_2 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_2) [0,4999 + 0,4713] dU_2 + \int_{125}^{\infty} f(U_2) [0,4999 + 0,4713] dU_2 = \\
&= 0,9712 \left( \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{100-108}{6,2}\right) - \Phi\left(\frac{a-108}{6,2}\right) + \right. \\
&\quad \left. + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi\left(\frac{b-108}{6,2}\right) - \Phi\left(\frac{125-108}{6,2}\right) \right) = \\
&= 0,9712 (-\Phi(1,29) + 0,5 + 0,5 - \Phi(2,74)) = 0,0987.
\end{aligned}$$

Для варианта 3:

$$\begin{aligned}
\alpha_3 &= \int_{100}^{125} f(U_3) \left[ \int_{-\infty}^1 f(y_3) dy_3 + \int_{125}^{\infty} f(y_3) dy_3 \right] dU_3 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_3) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi(y_3) \Big|_a^1 + \lim_{b \rightarrow \infty} \Phi(y_3) \Big|_{125}^b \right] dU_3 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_3) \left[ \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{1-1,125}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{a-1,125}{0,042}\right) + \right. \\
&\quad \left. + \lim_{b \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{b-1,125}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1,25-1,125}{0,042}\right) \right] dU_3 = \\
&= \int_{100}^{125} f(U_3) [-\Phi(2,98) + 0,5 + 0,5 - \Phi(2,98)] dU_3 = 0,0028 \int_{100}^{125} f(U_3) dU_3 = \\
&= 0,0028 \left( \Phi\left(\frac{125-112,5}{4,1}\right) - \Phi\left(\frac{100-112,5}{4,1}\right) \right) = 0,0028.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta_3 &= \int_{-\infty}^{100} f(U_3) \left[ \int_1^{125} f(y_3) dy_3 \right] dU_3 + \int_{125}^{\infty} f(U_3) \left[ \int_1^{125} f(y_3) dy_3 \right] dU_3 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_3) \left[ \Phi(y_3) \Big|_1^{125} \right] dU_3 + \int_{125}^{\infty} f(U_3) \left[ \Phi(y_3) \Big|_1^{125} \right] dU_3 =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_3) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,125}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,125}{0,042}\right) \right] dU_3 + \\
&+ \int_{125}^{\infty} f(U_3) \left[ \Phi\left(\frac{1,25-1,125}{0,042}\right) - \Phi\left(\frac{1-1,125}{0,042}\right) \right] dU_3 = \\
&= \int_{-\infty}^{100} f(U_3) [0,9972] dU_3 + \int_{125}^{\infty} f(U_3) [0,9972] dU_3 = \\
&= 0,9972 \left( \lim_{a \rightarrow -\infty} \Phi\left(\frac{100-112,5}{4,1}\right) - \Phi\left(\frac{a-112,5}{4,1}\right) \right) + \\
&\quad + \lim_{b \rightarrow \infty} \left( \Phi\left(\frac{b-112,5}{4,1}\right) - \Phi\left(\frac{125-112,5}{4,1}\right) \right) = \\
&= 0,9972 (-\Phi(3,05) + 0,5 + 0,5 - \Phi(3,05)) = 0,00269.
\end{aligned}$$

Результаты расчета свидетельствуют, что при увеличении значения среднеквадратического отклонения наблюдается повышение вероятности появления ошибок I и II рода. Так, для варианта 2 вероятность возникновения ошибок I и II рода значительно выше и составляет соответственно 2,59 и 9,87 %, в то время как для варианта 1 — 0,49 и 2,279 %. Самая маленькая степень рисков существует для варианта 3, который характеризуется статистической стабильностью и воспроизводимостью производства. Вероятность возникновения ошибок I и II рода составляет соответственно 0,28 и 0,269 %.

Таким образом, приведение технологического процесса производства в состояние статистической стабильности и воспроизводимости позволяет повысить достоверность контроля качества продукции и избежать ошибок при принятии решения о браковке продукции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций [Текст] / В.И. Логанина // Строит. материалы. — 2008. — № 8. — С. 98–99.
2. Логанина, В.И. Статистическое управление производством строительных изделий [Текст] / В.И. Логанина, Б.Б. Хрусталева, Т.В. Учаева // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. — 2013. — Т. 1, № 3. — С. 65–67.
3. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона [Текст] / В.И. Логанина // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3–4. — С. 42–45.
4. Логанина, В.И. К вопросу о достоверности контроля при производстве бетона [Текст] / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2011. — № 4. — С. 24–26.

*ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru*  
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
*КРУГЛОВА Альбина Николаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: albinakruglova@yandex.ru*  
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
*ДАВЫДОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук*  
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 03.06.13

**Loganina Valentina Ivanovna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: loganin@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia  
**Kruglova Albina Nikolaevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: albinakruglova@yandex.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia  
**Davydova Olga Alexandrovna**, candidate of technical sciences, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **RELIABILITY ASSESSMENT OF CONTROL OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS IN VIEW OF STABILITY OF PRODUCTION PROCESS**

The data on the effect of measurement error on the probability of making a decision on product acceptance by the statistical instability of the production process. For the example of the production of bricks that type I error probability increases with the standard deviation.

**Key words:** probability, control, reliability, type I error, the statistics.

### REFERENCES

1. Loganina, V.I. Organizatsiya acceptance sampling quality of construction products and [Text] / V.I. Loganina // Building Materials. — 2008. — N 8. — P. 98–99.
  2. Loganina, V.I. Statistical Office of the Building Products [Text] / V.I. Loganina, B.B. Hrustaleva, T.V. Uchaeva // East European Journal of advanced technologies. — 2013. — Vol. 1, N 3. — P. 65–67.
  3. Loganina, V.I. Towards question on regulation of technological processes of manufacture of concrete [Text] / V.I. Loganina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3–4. — P. 42–45.
  4. Loganina, V.I. Towards the reliability of the control in the production of concrete [Text] / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // Bull. Belgorod Shukhov State Technological University. — 2011. — N 4. — P. 24–26.
-

УДК 624.014:2

К.А. ШАФРАЙ, С.Д. ШАФРАЙ

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.  
ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ БОЛТОВ\***

Рассмотрены конструктивные решения фланцевых узлов и особенности работы их элементов для стержней открытого профиля архитектурно-строительных конструкций. В результате численного эксперимента получено, что высокопрочные болты в таких соединениях в зависимости от соотношения жесткостей фланцев и болтов могут работать на внецентренное растяжение. Приведено сопоставление численных расчетов с натурным экспериментом. Дана аппроксимация результатов численного эксперимента.

Ключевые слова: фланцевые соединения, болты, прочность, расчетная схема, раскрытие фланца.

В представленной работе рассмотрены вопросы, касающиеся особенности работы фланцевых соединений (ФС) архитектурно-строительных стальных конструкций. С точки зрения архитектурного восприятия и масштабирования конструкции в интерьере, ритмического членения протяженных линейных элементов ФС играют роль своеобразных «межузельных» вставок наподобие типичного строения стебля злаков в растительном мире. Созвучие ФС с природными объектами позволяет создавать более выразительные архитектурно-строительные ансамбли. Они характеризуются компактностью, экономичностью, допустимостью возведения каркаса здания при любых климатических условиях и создания конструкций мобильных (сборно-разборных) сооружений. Конструктивные формы ФС в зависимости от типа сечения соединяемых стержней, замкнутого (трубы различного профиля) или открытого (тавры, двутавры и пр.), можно разделить на два вида, которые принципиально отличаются как формой фланцев, так и их работой (рис. 1). В замкнутых профилях фланец играет роль круглой пластины, равномерно нагруженной по контуру примыкающего элемента при осесимметричной деформации (см. рис. 1, а). Листы фланцев стержней открытого профиля работают по аналогии с прямоугольной пластиной, нагруженной неравномерно по периметру примыкающего сечения элемента (см. рис. 1, б). В таких фланцах болты в зависимости от их расположения относительно ломаного контура профиля элемента (уголок, тавр, двутавр и т.д.) разделяют на болты внутренних и наружных зон [1].

Болты внутренних зон по отношению к наружным зонам более нагружены, ввиду разной жесткости фланца по контуру профиля. Так, внутренняя зона опирается по двум и более сторонам, а наружная — по одной. Расчетная схема болтов в ФС<sup>1</sup>, принятая в руководстве [1], пред-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания, проект № 7.2667.2011.

<sup>1</sup> Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Юрченко В.В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в SCAD Office // CADmaster. 2010. № 3(53) (июль-сент.). С. 110–115.

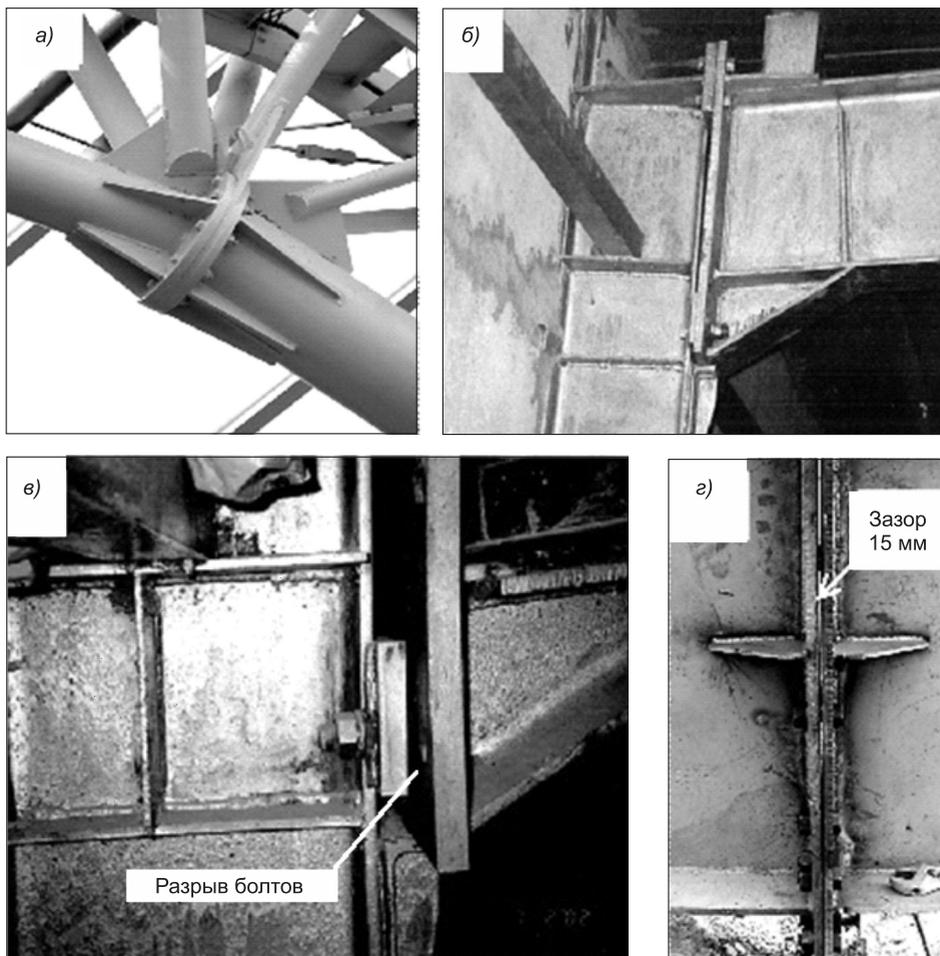


Рис. 1. Примеры фланцевых соединений и дефектов стыков

*a* — фланцевый стык замкнутых профилей (труб); *б* — рамный фланцевый стык открытых профилей (двутавров) в 12-метровой раме; *в* — разрыв болтов рамного фланцевого стыка; *г* — дефектный фланцевый стык 24-метровых балок по серии 1.420.3.38.07 «Каркасы стальные «УНИКОН-РК1»»

полагает, что болты подвержены только растяжению без изгиба. В исследованиях [2] приведены результаты работы ФС, подверженного внецентренному растяжению. Здесь также принято, что рычажные силы проходят по оси болтов, и последние работают на растяжение. Наряду с традиционным подходом сделаны попытки<sup>2</sup> разработки расчетных схем ФС с учетом эксцентриситета сил растяжения в болтах. На наш взгляд, величина неучтенных изгибных напряжений может быть существенна, что и приводит высокопрочные болты к разрушению. Так, в обследуемых узлах рамных конструкций пролетом 12 м выявлены разрывы болтов, происходящие по резьбе (см. рис. 1, *б*, *в*). В указанных узлах использовались болты диаметром  $d_b = 24$  мм из стали 40ХЛ «Селект», а толщина фланцев из стали С255 составляла 16 мм. Указанный случай не единичен как для сплошностенчатых ригелей, так и для ферм. В статье<sup>3</sup> утвер-

<sup>2</sup> Международный коллоквиум: Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных строительных конструкциях. М., 1989. Т. 2. 105 с.

<sup>3</sup> Горпинченко В.М., Егоров М.И., Гукова М.И., Искандеров В.Г. К вопросу о проектировании опорного узла металлических ферм покрытий зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 3. С. 41–43.

ждается, что болты в данном узле «работают на растяжение от не учитываемых при расчетах и проектировании каркасов зданий факторов» и приводятся примеры восьми случаев обрушения конструкций покрытия. Безусловно, ФС требуют высокой точности изготовления и монтажа конструкций, с целью недопущения зазора между фланцами, что не всегда удастся осуществить на практике (см. рис. 1, *з*). Дефект такого рода может создавать условия для работы болтов в ФС на внецентренное растяжение.

Цель исследования — изучение поведения болтов наружной зоны ФС и определение численными методами отношения толщин фланцев к диаметру болтов, при котором в болтах возникают изгибные напряжения на порядок меньше, чем напряжения растяжения. Этот путь, по мнению авторов, является развитием в ФС свойств эвритмии, т.е. создания по выражению Витрувия «...красивой внешности и подобающем виде сочетаемых воедино членов...»<sup>4</sup>.

В ФС болты работают по аналогии с затяжкой в предварительно напряженных конструкциях. Путь передачи усилия преднапряжения и внешней нагрузки от стержня болта к поверхности фланца осуществляется через зоны контакта между головкой болта и шайбой и между шайбой и фланцем. При растяжении ФС контактные напряжения между фланцами претерпевают ослабление вплоть до нулевых значений, сопровождаемое незначительным раскрытием фланцев. При определенных отношениях жесткостей болтов и фланцев возможно перераспределение контактных напряжений под шайбой и головкой болта так, что их равнодействующая сместится от оси болта в сторону наибольшего раскрытия фланцев (к продольной оси всего узла), вызывая тем самым внецентренное нагружение болта и его изгиб (рис. 2, *а, б, з*). Задача об определении изгибных моментов в болтах и фланцах имеет аналогию с задачей об осесимметрическом растяжении прямоугольной одноконтурной рамы<sup>5</sup>. Доля изгибающего момента в узле между ригелями и стойками (для нашего случая фланцами и болтами) будет зависеть от отношения их погонных жесткостей. Упрощенная схема работы фланца с болтом дана на рис. 2, *з*, где представлена 1/4 часть ФС.

Сложность решения задачи по данной схеме заключается в неопределенности параметров  $e_1$  и  $e_2$ , которые при нагружении и деформировании ФС меняют свое положение. В работах [1, 2] принято, что  $e_1 = 0$ . Чтобы обойти эти трудности, был проведен численный эксперимент, в котором в качестве конечно-элементных моделей рассматривались растянутые Т-образные ФС. С помощью этих образцов моделировался расчетный участок, приходящийся на один ряд болтов наружной зоны ФС. Модели по своим геометрическим параметрам, свойствам материала, условиям нагружения выполнены максимально приближенными к натурным образцам, исследованным в работах [3, 4] (рис. 3, *а*), что дает возможность сравнить результаты численного и натурального эксперимента и оценить степень достоверности полученных расчетных значений. Для сокращения объемов вычислений использовался принцип симметрии, так что расчетная модель представляет собой только 1/8 часть натурального образца (см. рис. 2, *а*).

<sup>4</sup> Витрувий. Десять книг об архитектуре / Пер. с лат. Ф.А. Петровского. М.: Изд-во Акад. архитектуры, 1936. Т. 1. 331 с.

<sup>5</sup> Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наук. думка, 1975. 704 с.

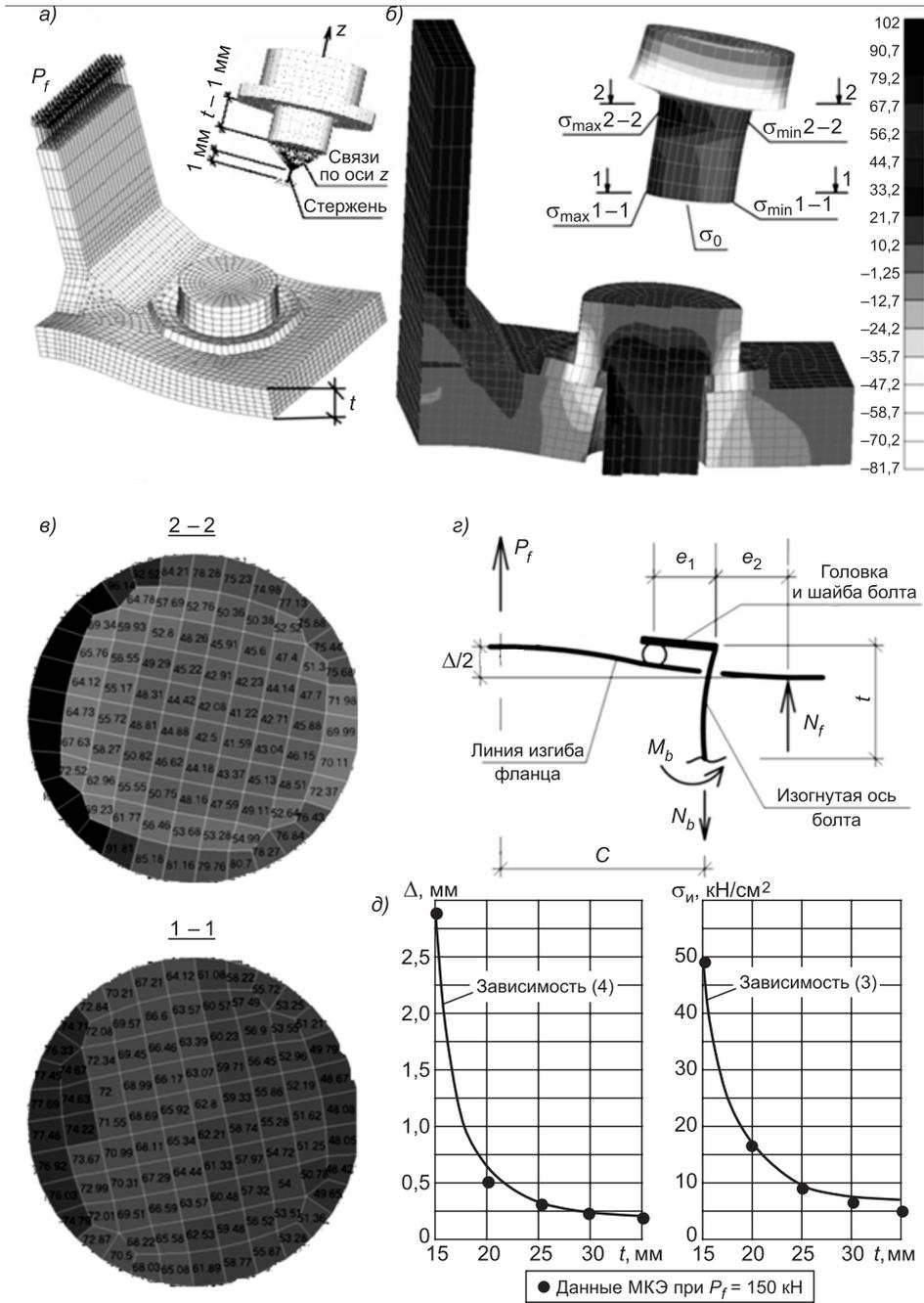


Рис. 2. Схемы и модели ФС с результатами расчетов

а — общий вид деформированной модели ФС с расчетной схемой болта; б — напряженно-деформированный вид болта и модели ФС (в разрезе вертикальной плоскостью по оси болта); в — осевые напряжения (кН/см<sup>2</sup>) в сечениях стержня болта, указанных на рис. 2, б; г — упрощенная расчетная схема работы фланца с болтом; д — аппроксимация результатов расчета методом конечного элемента (МКЭ) для раскрытия фланцев  $\Delta$  и нормальных напряжений  $\sigma_n$  от изгиба болта в зависимости от толщины фланца при  $P_f = 150\text{ кН}$  (напряжения растяжения в пластине  $25\text{ кН/см}^2$ )

Толщина присоединяемого к фланцу элемента (пластины) в моделях была равна 20 мм. Толщина фланцев  $t$  назначалась 15, 20, 25, 30 и 35 мм. Размеры угловых сварных швов приняты в соответствии с [3, 4]. Диаметр болтов  $d_b = 24\text{ мм}$  с расчетным усилием растяжения  $B_p = 271\text{ кН}$ . Разме-

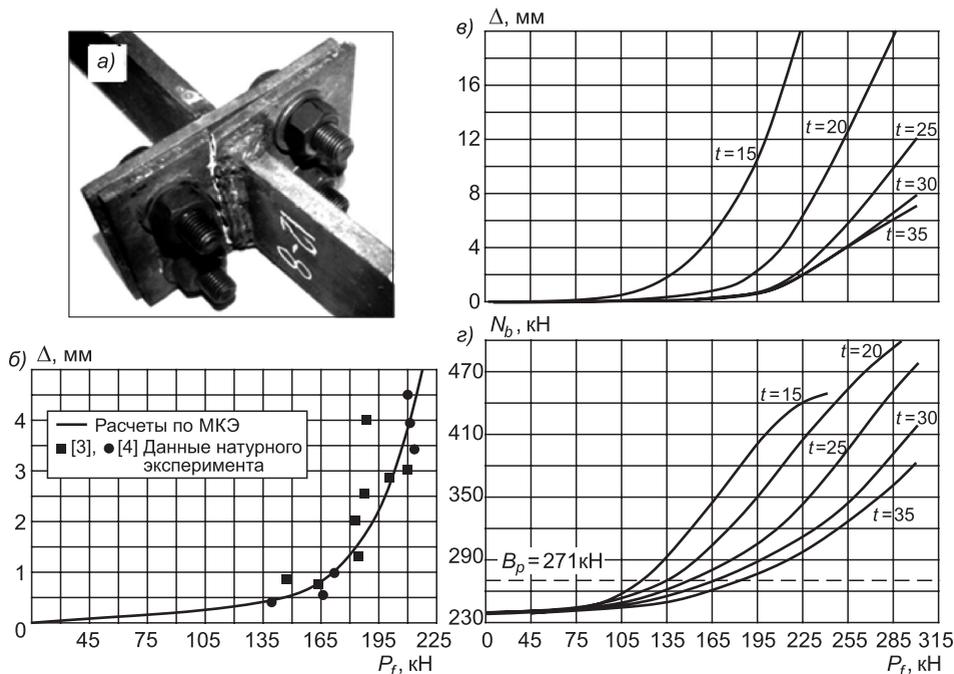


Рис. 3. Результаты эксперимента по МКЭ

*a* — общий вид натурального образца ФС по работам [3, 4]; *б* — зависимость раскрытия фланца  $\Delta$  для  $t = 20$  мм при растяжении ФС в сравнении с натурным экспериментом; *в* — зависимости раскрытия фланцев  $\Delta$  при растяжении ФС; *г* — изменение усилий в болтах  $N_b$  в зависимости от нагрузки  $P_f$  на ФС

ры головки болта и шайбы заданы согласно ГОСТ. Пластина, фланец, сварные швы, шайба и болт разбиты на объемные конечные элементы в виде призм и пирамид, в основании которых треугольники и выпуклые четырехугольники. Степень разбиения указанных деталей узла выбиралась так, чтобы основной элементарной ячейкой в моделях был объемный элемент с линейным размером 2,5 мм, а болтов 5 мм. Поэтому изменение толщины фланцев и длины болта от одной модели к другой осуществлялось добавлением или удалением слоев конечных элементов, а не за счет изменения вертикального размера элементов, образующих фланец или болт.

На наш взгляд, такой путь разбиения при сравнительном анализе разных толщин лучше соответствует реальной картине напряжений и деформаций и позволяет косвенно учесть масштабный фактор «влияние толщины детали» в расчете, поскольку очаги зарождения пластического деформирования и разрушения в стали, зернистой по своей структуре, имеют вполне определенный первоначальный объем. Разумеется, при выборе размера конечного элемента, особенно в расчетах концентрации напряжений по теории Нейбера<sup>6</sup>, следует учитывать структурный «параметр материала», который зависит от физико-механических свойств стали. В нашем случае этот параметр составляет 2,5 мм.

Контакты между шайбой и фланцем, а также между фланцами, заданы с помощью нелинейных GAP-элементов, моделирующих одностороннюю связь между узлами при сжатии и не препятствующих свободному удалению друг от друга узлов GAP-элемента при растяжении. Силы тре-

<sup>6</sup> Нейбер Г. Концентрация напряжения. М.: Гостехиздат, 1947. 204 с.

ния в принятой модели между контактируемыми поверхностями не учитывались. Предварительное напряжение болта моделировалось специальной нагрузкой, величиной 240 кН в соответствии с рекомендациями [1]. Нагрузка прикладывалась к короткому стержневому элементу диаметром 24 мм и длиной 1 мм, установленному по оси болта. Данный элемент пристыкован к болту в сечении 1–1 (см. рис. 2, а, б). В этом сечении стержневой элемент в осевом направлении (ось  $Z$ ) соединен при помощи параллельного пучка жестких связей со всеми узлами объемных элементов болта. На схеме (см. рис. 2, а) формально эти связи показаны в виде сходящегося пучка. Другой конец стержневого элемента, на основе указанного выше принципа симметрии, имеет жесткую заделку. Осевое растяжение в болте при пошаговом нагружении ФС оценивалось по величине усилия в этом стержневом элементе. Нижний ряд объемных элементов болта из-за введения стержня длиной 1 мм принимался соответственно короче по высоте на 1 мм.

Помимо геометрической нелинейности, обусловленной наличием GAP-элементов, в модели учитывалась физическая нелинейность свойств материалов. Механические свойства материалов задавались в виде соответственных билинейных зависимостей. Для этого в элементах модели ФС были приняты прочностные и деформационные характеристики, соответствующие строительным сталям: пластина и сварной шов — сталь С345, фланец — сталь С255, шайба и болт — сталь 40ХЛ «Селект». Нагрузка к модели прикладывалась пошагово с расчетами напряжений и деформаций на каждом шаге нагружения, причем на первом шаге создавалась только полная нагрузка от предварительного натяжения болтов ( $N_b = 240$  кН). Внешняя нагрузка растяжения  $P_f$  прикладывалась к торцу присоединяемой пластины пошагово равномерно так, чтобы на десятом шаге нагружения напряжения в ней составляли  $25$  кН/см<sup>2</sup> ( $P_f = 150$  кН). Максимальное количество шагов нагружения равно 20, что соответствовало напряжениям в присоединяемой пластине  $50$  кН/см<sup>2</sup> ( $P_f = 300$  кН). Деформированные модели болтов и фланцев приведены на рис. 2, а, б.

В результате машинного эксперимента получены (числовые значения которых соответствуют внешней нагрузке на пластину в  $P_f = 150$  кН или  $25$  кН/см<sup>2</sup>) следующие величины:

- $\sigma_0$  — нормальные напряжения вдоль оси болта (ось  $Z$ );
- $\sigma_n$  — номинальные напряжения вдоль оси болта (ось  $Z$ );
- $\sigma_{\max}$  — максимальные нормальные напряжения на поверхности болта, обращенной к растянутой пластине;
- $\sigma_{\min}$  — минимальные нормальные напряжения на диаметральной стороне от максимальных напряжений (см. рис. 2, б, в);
- $\sigma_{\text{и}}$  — напряжения от изгибающего момента в болте, определенные по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2. \quad (1)$$

$\alpha = \sigma_{\max 2-2} / \sigma_{\max 1-1}$  — коэффициент концентрации напряжения;

$\Delta$  — величина раскрытия фланца (см. рис. 2, г);

$k$  — относительное значение (приведенное к толщине фланца  $t = 25$  мм) отношения изгибных погонных жесткостей фланца и болта. При вычислении погонных отношений жесткостей  $k$  за «реперную точку» принята толщина фланца 25 мм, как наиболее распространенная в реальных конструкциях. Увеличение толщины фланцев ведет к росту отноше-

ния изгибных погонных жесткостей фланца и болта  $k$ , которое задано по формуле

$$k = i_t / i_{25}, \quad (2)$$

где  $i_t$  — отношение погонных жесткостей фланца и болта  $i_t = (t^3b/12C) : (\pi d_b^4/64t)$ ;

$b$  — расстояние между болтами;

$C$  — расстояние от оси пластины до оси болта (см. рис. 2,  $z$ );

$i_{25}$  — значение  $i_t$  при толщине фланцев  $t = 25$  мм.

После подстановки соответствующих значений  $i_t$  и  $i_{25}$  в выражение (2) получим

$$k = (t/25)^4. \quad (2a)$$

Значения приведенных выше величин по мере увеличения толщин фланцев представлены в таблице.

#### Результаты экспериментального и теоретического внецентренного растяжения болтов

Толщина фланца, мм	Сечение 1-1			Сечение 2-2			$\alpha$	Отношение жесткостей фланца и болта $k$	Раскрытие фланцев $\Delta$ , мм
	$\sigma_0/\sigma_n$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_n$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_0$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_n$ , кН/см <sup>2</sup>			
15	74/71	118/21	49	49	163/52	56	1,38	0,13	2,92
20	64/63	78/49	15	43	104/72	16	1,33	0,41	0,52
25	60/60	68/52	8	41	92/72	10	1,35	1,00	0,32
30	58/58	63/53	5	40	84/72	6	1,33	2,07	0,24
35	57/57	60/54	3	39	80/73	4	1,33	3,84	0,20

Анализ приведенных в таблице параметров работы ФС и сравнение их с экспериментальными данными [3, 4] показали:

— сопоставление численных расчетов по МКЭ с натурными экспериментами [3, 4], в которых исследовалась величина раскрытия фланцев ФС толщиной 20 мм в зависимости от нагрузки растяжения  $P_f$ , дает удовлетворительные результаты (см. рис. 3, б), что говорит о пригодности принятой модели для расчета напряженно-деформированного состояния ФС под нагрузкой;

— нормальные и номинальные напряжения вдоль оси болта по мере увеличения толщины фланца от 25 к 35 мм снижаются на 5 %, тогда как уменьшение толщины фланца от 25 до 15 мм приводит к повышению указанных напряжений на 23 и 18 % соответственно;

— относительно исходного значения напряжения  $\sigma_{пн} = 53$  кН/см<sup>2</sup> от предварительной затяжки болта осевые напряжения в болте возрастают по степенной зависимости вслед за уменьшением толщины фланца. Так, для толщины фланца 35 мм осевые напряжения выше величины  $\sigma_{пн}$  на 7,5 %, а для фланца толщиной 15 мм это превышение составляет 34 %. Данное обстоятельство указывает на наличие рычажных сил в ФС и увеличение их значимости в растяжении болта по мере уменьшения толщины фланца;

— установлено, что болт помимо осевого растяжения испытывает изгиб, который ранее не учитывался в прочностных расчетах ФС [1]. Изгибные напряжения в болте падают с увеличением толщины фланцев. На-

пряжения от изгиба уменьшаются с ростом толщины фланцев и аппроксимированы зависимостью:

$$\sigma_{\text{и}} = 2,67(t/25 + (25/t)^3 + (25/t)^5) \text{ кН/см}^2, \quad (3)$$

где  $t$  измеряется в миллиметрах. Зависимость (3) представлена на графике (см. рис. 2,  $\partial$ );

— коэффициент концентрации в стержне под головкой болта остается постоянным при изменении толщины фланцев и равным 1,33. Его величина отличается в меньшую сторону от значений, приведенных в [2], из-за крупных размеров конечных элементов, принятых в модели для болта 5 мм;

— раскрытие фланцев под нагрузкой уменьшается с ростом их толщины. Эта зависимость аппроксимирована выражением:

$$\Delta = 0,11(t/25 + (25/t)^2 + (25/t)^6) \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $t$  измеряется в миллиметрах. Зависимость (4) дана на графике (см. рис. 2,  $\partial$ ). Заметим, что зависимости (3) и (4), согласно соотношению (2а), можно выразить через аргумент  $k$ ;

— величина раскрытия фланцев  $\Delta$  в зависимости от нагрузки растяжения  $P_f$  (рис. 3,  $\varepsilon$ ) имеет гиперболический характер. Из этого следует, что на первом этапе нагружения ФС раскрытие фланцев незначительно в пределах допускаемых нормами величин в 0,1 мм, а затем после преодоления  $P_f = 90$  кН происходит резкое его увеличение. Это, видимо, связано с изменениями плеч рычажных сил и билинейной зависимостью работы стали на растяжение, принятой в модели;

— увеличение растягивающих усилий в болте, вследствие появления рычажных сил, происходит также по гиперболической зависимости (рис. 3,  $\varepsilon$ ) и фактически повторяет график (рис. 3,  $\varepsilon$ ). Резкое изменение кривой (см. рис. 3,  $\varepsilon$ ) наступает при  $P_f = 90$  кН. Подобные результаты приводятся в исследовании [2];

— с увеличением толщины фланца расчетные усилия в болте достигаются при большем уровне нагрузки на ФС (см. рис. 3,  $\varepsilon$ ). Повышение толщины фланца в 2 раза дает рост несущей способности болтов на 40 %.

**Выводы.** 1. Помимо осевого растяжения болт испытывает изгиб. Изгибные напряжения в болте падают с увеличением толщины фланцев. Зависимость изменения величины изгибных напряжений от толщины фланцев имеет такой же характер, как для осевых напряжений. При этом доля изгибных напряжений по отношению к номинальным меняется от 69 % при  $t = 15$  мм до 5 % при  $t = 35$  мм. Практически при соотношении толщины фланца к диаметру болта более единицы можно пренебречь изгибными напряжениями болта с точностью до 5 %.

2. При одном и том же уровне внешней нагрузки происходит рост по степенной зависимости осевых напряжений в болте по мере уменьшения толщины фланца. Данное обстоятельство указывает на увеличение значимости для растяжения болта как рычажных сил в ФС, так и длины болта в результате изменения толщины фланца.

В связи с отмеченным выше значительным влиянием рычажных сил в ФС на работу болта, желательно знать характер распределения контактных усилий под шайбой болта и между фланцами, для чего нужно продолжить изучение и анализ результатов расчета по МКЭ. Необходимо проанализировать и другие конструктивные участки ФС, в частности, места крепления пластины к фланцу с помощью вычислительной техники. Проводимые исследования при сопоставлении с ранее полученными

результатами натурных испытаний позволят создавать более надежные конструктивные решения ФС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций [Текст]. — М. : ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1989. — 52 с.
2. Биргер, И.А. Резьбовые и фланцевые соединения [Текст] / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. — М. : Машиностроение, 1990. — 386 с.
3. Бирюлев, В.В. Работа фланцевых соединений при низких температурах и поперечной ударной нагрузке [Текст] / В.В. Бирюлев, К.А. Шафрай // Изв. вузов. Строительство. — 1995. — № 5–6. — С. 18–23.
4. Бирюлев, В.В. Работа фланцевых соединений при низких температурах [Текст] / В.В. Бирюлев, А.В. Бажанов, С.Д. Шафрай // Изв. вузов. Строительство. — 1988. — № 11. — С. 9–14.

*ШАФРАЙ Сергей Дмитриевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: shafrai.sd@yandex.ru*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
ШАФРАЙ Константин Анатольевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: konst\_shafrai@mail.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 14.06.13

**Shafrai Sergey Dmitrievich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: shafrai.sd@yandex.ru, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Shafrai Konstantin Anatolievich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: konst\_shafrai@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### FEATURES THE WORK OF FLANGED CONNECTIONS ARCHITECTURAL AND BUILDING STRUCTURES. VNECENTRENNOE TENSILE BOLTS

The article describes the design of flanged joints and features the work of their members for rods public profile architectural designs. As a result of the numerical experiment, high-strength bolts in such compounds depending on the ratio of shear of flanges and bolts may work on the vnecentrennoe stretch. Compares numerical calculations with model experiment. Dana approximation results of numerical experiment.

Key words: flange, bolts, strength, design scheme, disclosure of the flange.

#### REFERENCES

1. Recommendations on the calculation, design, manufacture and installation of flange joints of steel building structures [Text]. — М. : CBNTI Minmonta zhspetsstroyUSSR, 1989. — 52 p.
2. Birger, I.A. Threaded and flanged connections [Text] / I.A. Birger, G.B. Iosilevich. — М. : Mechanical engineering, 1990. — 386 p.
3. Biryulev, V.V. Flange joints work under low temperature and gross-section load [Text] / V.V. Biryulev, K.A. Shafrai // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1995. — N 5–6. — P. 18–23.
4. Biryulev, V.V. Bolted flanged connections behaviour under low temperature conditions [Text] / V.V. Biryulev, A.V. Bazhanov, S.D. Shafrai // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1988. — N 11. — P. 9–14.

УДК 69.003:65.014.001.24

Ю.Б. КАЛУГИН

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Предложена модель расчета воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс укладки пути, в результате реализации которой определяется расчетная производительность комплекса с учетом влияния этих факторов. Модель основана на пошаговой реализации всех возможных сочетаний на «дереве решений». Представлены расчетные параметры комплекса с учетом всех вариантов воздействия для различных уровней организации и управления комплексом.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** производительность технологического комплекса, дестабилизирующие факторы, уровни организации и управления, законы распределения.

Известно, что точность и достоверность календарного планирования зависят в первую очередь от точности определения параметров соответствующих технологических процессов.

Выполненная оценка влияния дестабилизирующих факторов на технологический процесс укладки железнодорожного пути [1] позволила выделить доминирующие, к которым относятся поставка материалов, квалификация исполнителей, технический фактор (отказы техники), природно-климатический фактор (низкие, высокие температуры и другие явления). Исследования показали вероятностную природу дестабилизирующих факторов, которая может отражаться соответствующими законами распределения или равновероятными значениями исследуемого параметра, полученными на основании этих законов. Установлены три основные степени влияния каждого дестабилизирующего фактора на производительность технологического процесса укладки пути.

Так, для учета влияния квалификации исполнителей может использоваться оценка их уровня обученности: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» (рис. 1).

«Отлично»											
106,7	108,9	110,2	110,7	111,4	112,0	112,7	113,3	114,0	114,7	115,8	118,0
«Хорошо»											
89,6	93,0	94,5	95,7	96,7	97,6	98,6	99,5	100,5	101,7	103,3	106,7
«Удовлетворительно»											
74,7	77,7	79,0	80,0	81,0	81,8	82,6	83,4	84,3	85,2	86,7	89,6

Рис. 1. Равновероятные значения производительности, %, для оценок «отлично», «хорошо», «удовлетворительно»

Таблица 1

**Влияние возраста техники на ее производительность**

Параметры		12 значений производительности путеукладчика, %												Среднее значение, %	
Возраст техники	1–3 года	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	90	80	70	94,2
	4–7 лет	100	100	100	100	90	90	90	90	80	80	60	40	85	
	Более 7 лет	90	90	90	90	80	80	80	80	60	60	40	0	70	

Влияние технического фактора зависит от возраста техники (табл. 1).

Степень влияния природно-климатических факторов установлена для каждого из следующих сезонов: лето, весна–осень, зима (табл. 2).

Таблица 2

**Усредненные результаты влияния природно-климатических факторов на производительность технологического комплекса**

Параметры	Значения производительности в течение 12 дней, %													П <sub>ср</sub> , %
Лето	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92,5	78,75	61,25	94,38
Весна–осень	100	100	100	100	100	97,17	90,41	86,38	78,5	71,75	55	50	85,77	
Зима	87,81	76,92	74,17	70,5	67,38	61,63	57,04	54,84	51,88	50	50	10	59,35	

И наконец, сборка и поставка рельсошпальной решетки (РШР) к укладочному комплексу может осуществляться по одной из трех организационно-технологических схем с различным влиянием каждой схемы на параметры технологического комплекса (табл. 3).

Таблица 3

**Параметры поставки звеньев РШР для различных схем**

Параметры	12 равновероятных значений производительности поставки звеньев РШР, %													П <sub>ср</sub> , %
Схема 1	100													100
Схема 2	100	94,93	92,6	90,86	89,32	87,94	86,46	85,08	83,54	81,8	79,47	74,4	87,23	
Схема 3	100	93,77	86,72	80,51	74,7	68,31	62,15	55,62	50,24	41,79	30,91	20,06	63,75	

В этих условиях трем степеням каждого дестабилизирующего фактора могут быть присвоены оценки в зависимости от направленности и степени их влияния на итоговые параметры, например (слабый, средний и сильный уровни негативного влияния), или «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» (рис. 2).

В соответствии с представленной схемой общее число сочетаний воздействия дестабилизирующих факторов составит:

$$N = 3^f, \quad (1)$$

где 3 — число степеней влияния каждого фактора;

$f = 4$  — количество дестабилизирующих факторов.

Таким образом, существует 81 вариант сочетания четырех дестабилизирующих факторов по трем степеням действия каждого.

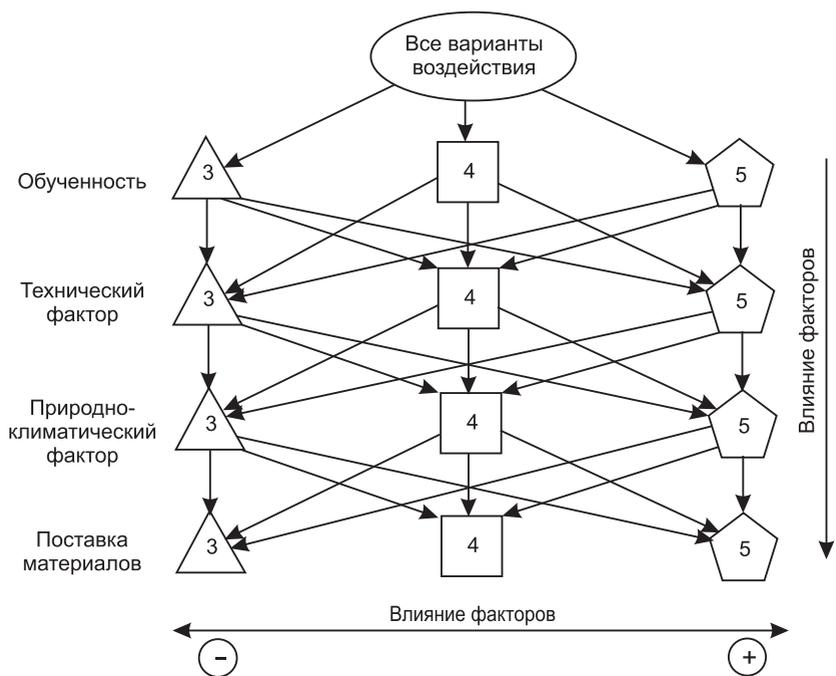


Рис. 2. Схема воздействия дестабилизирующих факторов

Моделирование совокупного воздействия дестабилизирующих факторов, имеющих случайную природу, на производительность технологического комплекса предполагает пошаговый учет отдельного фактора и его сочетаний (рис. 3) в соответствии со степенью влияния каждого и в зависимости от его характеристик, представленных выше.

Так, для удовлетворительного уровня обученности (оценка фактора — 3), для техники с возрастом более 7 лет (оценка фактора — 3), при сильном негативном влиянии природно-климатического фактора (значе-

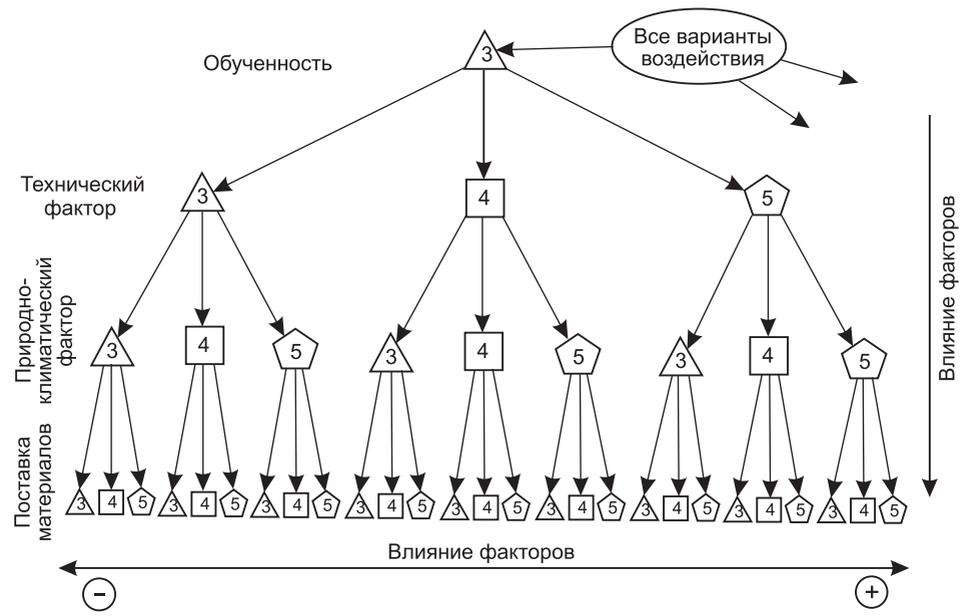


Рис. 3. Фрагмент дерева возможных сочетаний вариантов воздействия для уровня обученности «удовлетворительно»

ние — 3), и для третьей организационной схемы поставки материалов в результате выполненных расчетов с помощью универсального алгоритма [2] сформирована одна ветвь дерева возможных вариантов (рис. 4).

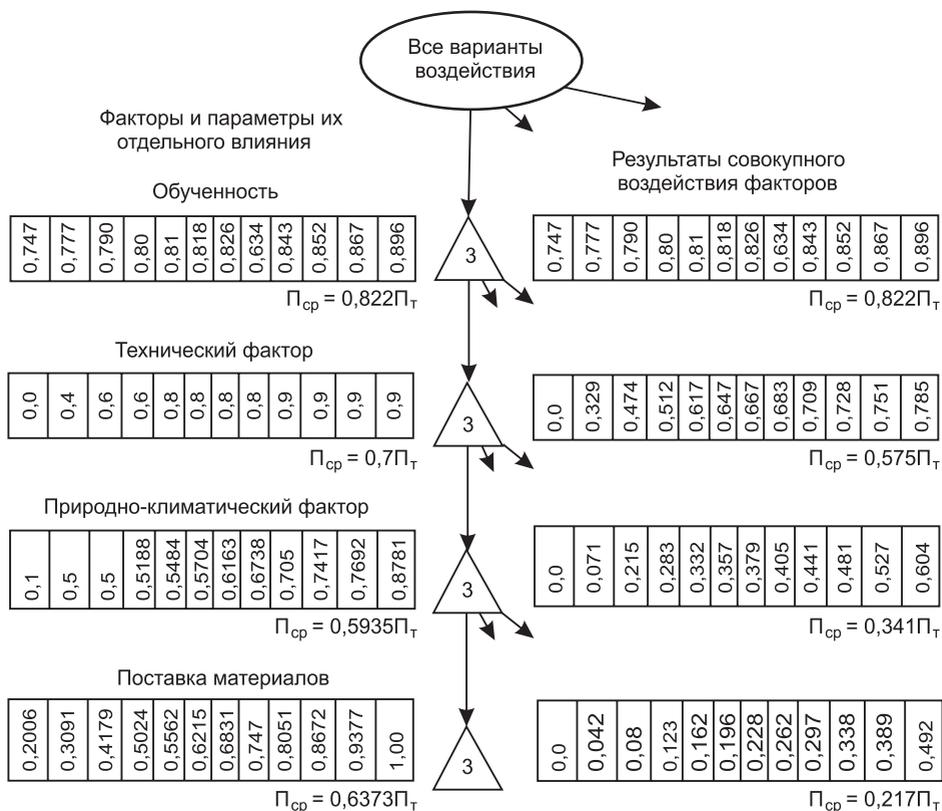


Рис. 4. Ветвь дерева возможных вариантов негативного влияния всех дестабилизирующих факторов с результатами расчета

Производительность технологического комплекса по укладке пути при совокупном негативном воздействии отмеченных факторов (каждый имеет оценку — 3) будет составлять в среднем 21,7 % от производительности путеукладчика в соответствии с технологической картой.

На основании аналогичного подхода выполнены расчеты и для остальных 80 вариантов совокупного воздействия дестабилизирующих факторов с вероятностными параметрами (табл. 4).

Анализ результатов выполненного моделирования совокупного воздействия дестабилизирующих факторов на технологический процесс укладки пути (81 вариант сочетания) позволяет отметить следующее.

Диапазон изменения средней производительности комплекса весьма значителен и составляет от  $0,217\Pi_{\text{T}}$  (40,7 м/ч) при неблагоприятном воздействии всех факторов до  $0,999\Pi_{\text{T}}$  (187,5 м/ч) при благоприятном их сочетании.

Влияние изложенных выше дестабилизирующих случайных факторов на технологический комплекс укладки пути в значительной мере зависит от уровня организации и управления этим комплексом.

Так, высокий уровень организации и управления (оценка «отлично») предполагает в первую очередь:

- высокий уровень обученности личного состава (первый фактор — 5);

**Результаты расчета вариантов совокупного воздействия дестабилизирующих факторов (фрагмент)**

Оценки по факторам				12 равновероятных значений производительности												P <sub>ср</sub>
1	2	3	4													
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	0	0,042	0,08	0,123	0,162	0,196	0,228	0,262	0,297	0,338	0,389	0,492	<b>0,217</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	0	0,061	0,185	0,245	0,283	0,308	0,331	0,356	0,385	0,418	0,463	0,537	<b>0,298</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	0	0,071	0,215	0,283	0,332	0,357	0,379	0,405	0,441	0,481	0,527	0,604	<b>0,341</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	0	0,099	0,149	0,195	0,24	0,283	0,325	0,369	0,42	0,479	0,552	0,661	<b>0,314</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	0	0,221	0,292	0,336	0,392	0,439	0,482	0,524	0,56	0,593	0,63	0,692	<b>0,43</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	0	0,257	0,336	0,386	0,459	0,504	0,558	0,613	0,649	0,677	0,717	0,764	<b>0,493</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	0	0,114	0,172	0,226	0,276	0,32	0,367	0,413	0,464	0,522	0,591	0,687	<b>0,346</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	0	0,262	0,349	0,409	0,455	0,504	0,542	0,571	0,598	0,624	0,656	0,71	<b>0,473</b>
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	0,554	0,658	0,744	0,794	0,844	0,885	0,917	0,945	0,973	1,001	1,037	1,099	<b>0,871</b>
<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	0,64	0,769	0,865	0,923	1,003	1,042	1,081	1,104	1,116	1,131	1,145	1,168	<b>0,999</b>

— бесперебойную доставку звеньев рельсошпальной решетки к путеукладчику при использовании первой организационной схемы (четвертый фактор — 5);

— возможный различный возраст техники, а следовательно, и ее техническое состояние (второй фактор изменяется от 3 до 5);

— выполнение работ в различных регионах и климатических условиях (третий фактор изменяется от 3 до 5).

Средний уровень организации и управления (оценка «хорошо») предполагает:

— средний уровень обученности личного состава (первый фактор — 4);

— сборку и доставку звеньев рельсошпальной решетки к путеукладчику при использовании второй организационной схемы (четвертый фактор — 4);

— возможный различный возраст техники, а следовательно, и ее техническое состояние (второй фактор изменяется от 3 до 5);

— выполнение работ в различных регионах и климатических условиях (третий фактор изменяется от 3 до 5).

И наконец, низкий уровень организации и управления (оценка «удовлетворительно») предполагает:

— низкий уровень обученности личного состава (первый фактор — 3);

— сборку и доставку звеньев рельсошпальной решетки к путеукладчику при использовании третьей организационной схемы (четвертый фактор — 3);

— возможный различный возраст техники, а следовательно, и ее техническое состояние (второй фактор изменяется от 3 до 5);

— выполнение работ в различных регионах и климатических условиях (третий фактор изменяется от 3 до 5).

Выполненные для этих условий расчеты (в скобках значения производительности технологического комплекса, м/ч) отражены в табл. 5. Там же представлены значения производительности комплекса при неустановленном воздействии каждого фактора (от 3 до 5).

Анализ полученных результатов показывает, что для технологического комплекса с высоким уровнем организации и управления его производительность составляет в среднем 77,6 % от технической производи-

**Результаты расчета вариантов воздействия дестабилизирующих факторов для различных уровней организации и управления**

Оценки по факторам				12 равновероятных значений производительности												П <sub>ср</sub>
1	2	3	4													
3	3	3	3													0,362 (67,88)
	4	4	3													
	5	5	3	0,083 (15,56)	0,137 (25,69)	0,174 (32,63)	0,224 (42)	0,27 (50,625)	0,318 (59,625)	0,367 (68,81)	0,415 (77,81)	0,47 (88,125)	0,533 (99,94)	0,612 (114,75)	0,736 (138)	
4	3	3	4													0,591 (110,81)
	4	4	4													
	5	5	4	0,187 (35,06)	0,3 (56,25)	0,395 (74,06)	0,468 (87,75)	0,528 (99)	0,589 (110,44)	0,646 (121,125)	0,694 (130,125)	0,74 (138,75)	0,785 (147,19)	0,837 (156,94)	0,918 (172,125)	
5	3	3	5													0,776 (145,5)
	4	4	5													
	5	5	5	0,246 (46,125)	0,396 (74,25)	0,525 (98,44)	0,629 (117,94)	0,689 (129,19)	0,788 (147,75)	0,863 (161,81)	0,916 (171,75)	0,984 (184,5)	1,033 (193,69)	1,096 (205,5)	1,143 (214,31)	
3	3	3	3													0,556 (104,25)
	4	4	4													
	5	5	4	0,152 (28,5)	0,233 (43,69)	0,301 (56,44)	0,387 (72,56)	0,461 (86,44)	0,528 (99)	0,586 (109,88)	0,655 (122,81)	0,717 (134,44)	0,788 (147,75)	0,867 (162,56)	0,998 (187,125)	

тельности; для комплекса со средним уровнем организации и управления — 59,1 %; с низким уровнем организации и управления — 36,2 %.

В случае неопределенного уровня организации и управления (все дестабилизирующие факторы изменяются в достаточно широком диапазоне) производительность комплекса составляет в среднем 104,25 м/ч, или 55,6 % от производительности комплекса, работающего в идеальных условиях в соответствии с технологической картой.

Особый интерес представляет сопоставление значений производительности технологического комплекса для различных уровней организации и управления (см. табл. 5) с нормативной производительностью укладки звеньев рельсошпальной решетки (ЕНиР, сб. 16-9), которая составляет 156,25 м/ч.

Так, за счет влияния дестабилизирующих факторов расчетная производительность для технологических комплексов с высоким, средним и низким уровнями управления снизится в сравнении с нормативной производительностью (156,25) в 1,07, 1,41 и 2,3 раза.

На основании данных табл. 5 рассчитаны плотности распределения значений производительности комплекса как разница смежных значений при половинной плотности для крайних интервалов.

При выполнении расчетов в среде MS Excel с учетом наличия 12 равновероятных (равностоящих друг от друга на шкале  $X$ ) значений в качестве условной шкалы оси абсцисс принят диапазон 0,45–1,55 с центральным значением 1,0. При этом среднее квадратическое (стандартное) отклонение составило  $\sigma = 0,360555$ .

В результате построены соответствующие графики плотности распределения производительности для различных уровней организации и управления технологическим комплексом (рис. 5–8).

Анализ представленных графиков позволяет отметить следующую тенденцию:

— при низком уровне организации и управления плотность распределения значений производительности комплекса близка к нормальному закону, усеченному слева (с минимальными значениями производительности) (см. рис. 5);

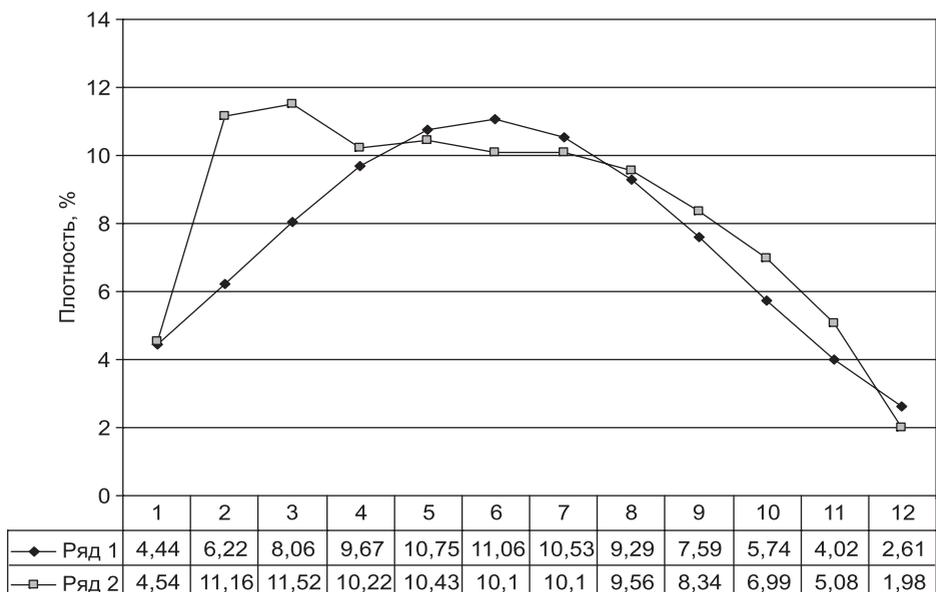


Рис. 5. Эмпирическая и теоретическая линии плотности распределения производительности при низком уровне

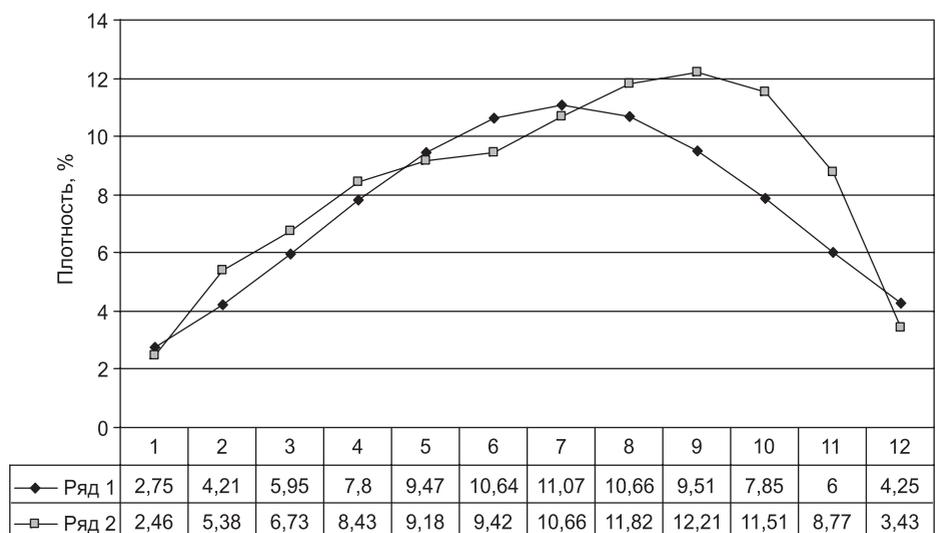


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая линии плотности распределения производительности при среднем уровне

— при среднем уровне организации и управления распределение производительности технологического комплекса близко к нормальному закону (см. рис. 6);

— при высоком уровне организации и управления плотность распределения значений производительности комплекса близка к нормальному закону, усеченному справа (с максимальными значениями производительности) (см. рис. 7);

Также достаточно близко к нормальному закону распределение производительности комплекса при неопределенном уровне организации и управления (см. рис. 8).

Проверка близости полученных распределений к нормальному закону с помощью корреляционного отношения и критерия Фишера подтвердила эти гипотезы с высокой вероятностью.

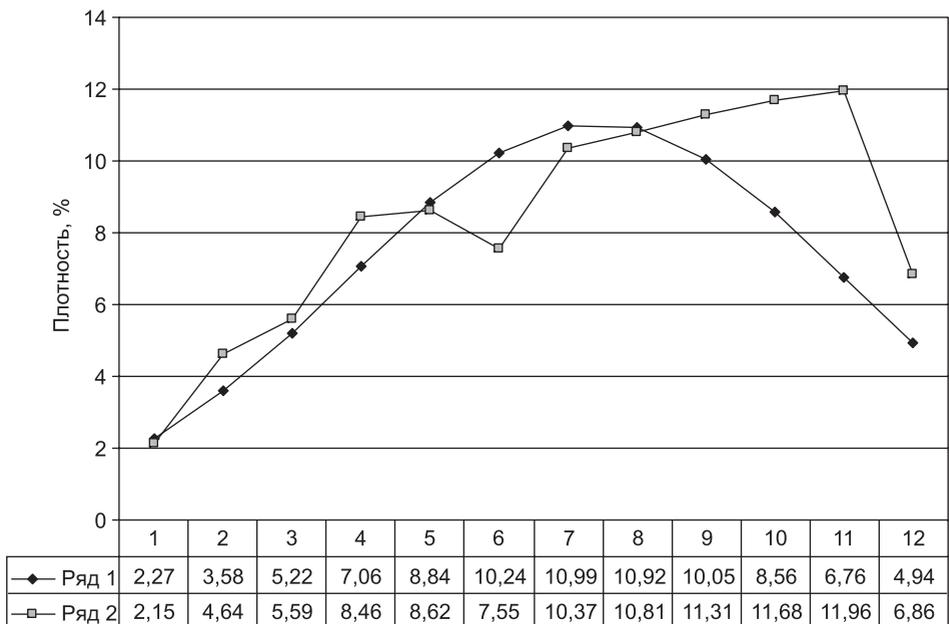


Рис. 7. Эмпирическая и теоретическая линии плотности распределения производительности при высоком уровне

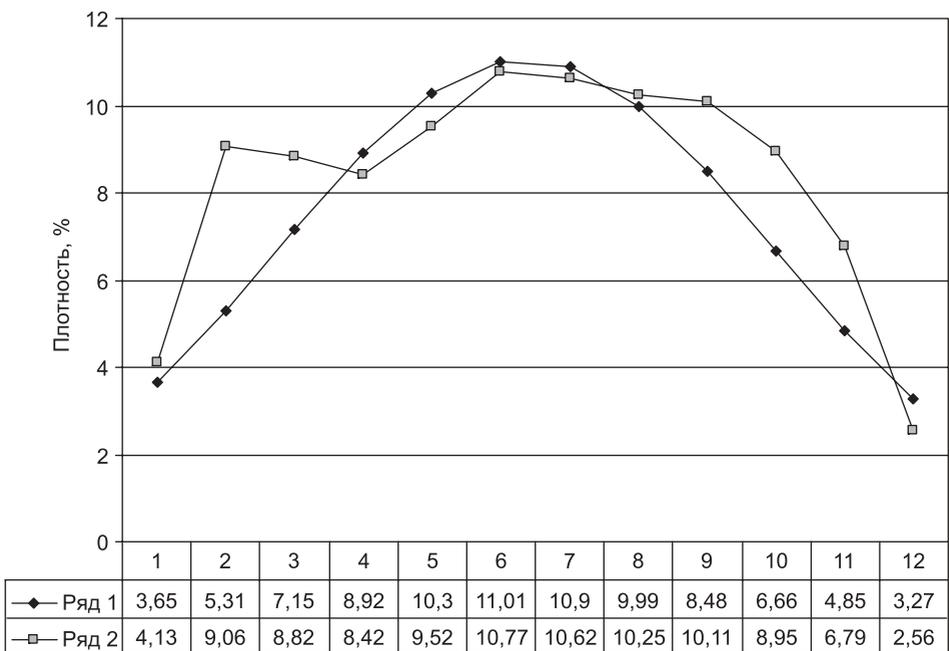


Рис. 8. Эмпирическая и теоретическая линии плотности распределения производительности при неустановленном уровне

**Выводы.** 1. Выполненная оценка влияния дестабилизирующих факторов, имеющих случайный характер, на технологический процесс укладки железнодорожного пути позволила выделить доминирующие: поставка материалов; квалификация исполнителей; технический фактор (отказы техники); природно-климатический фактор.

2. Исследование вероятностной природы дестабилизирующих факторов, снижающих производительность технологического процесса, позволила установить три основных уровня или степени негативного влияния

(слабый, средний и сильный), соответствующие оценкам «отлично», «хорошо», «удовлетворительно». Наличие четырех дестабилизирующих факторов, разделенных по трем степеням каждый, предполагает 81 вариант сочетания их совокупного воздействия.

3. В результате моделирования совокупного воздействия дестабилизирующих факторов на производительность технологического комплекса в соответствии со степенью влияния каждого фактора и в зависимости от его характеристик для всех возможных сочетаний воздействия рассчитаны значения производительности комплекса. Анализ результатов выполненного моделирования показывает, что диапазон изменения средней производительности комплекса весьма значителен и составляет от  $0,217\Pi_T$  (40,7 м/ч) при неблагоприятном воздействии всех факторов до  $0,999\Pi_T$  (187,5 м/ч) при благоприятном их сочетании.

4. Так как влияние дестабилизирующих случайных факторов на технологический комплекс укладки пути в значительной мере зависит от уровня организации и управления этим комплексом, выполнены расчеты производительности комплекса для следующих основных уровней: высокий, средний, низкий, неустановленный. Выполненные для этих условий расчеты показали, что для технологического комплекса с высоким уровнем организации и управления его производительность составляет в среднем 77,6 % от технической производительности; для комплекса со средним уровнем — 59,1 %; с низким уровнем — 36,2 %.

В случае неустановленного уровня организации и управления производительность комплекса составляет в среднем 104,25 м/ч, или 55,6 % от производительности комплекса, работающего в идеальных условиях в соответствии с технологической картой.

5. В результате выполненных расчетов построены соответствующие графики плотности распределения значений производительности. При этом установлено, что для низкого уровня организации и управления распределение плотности значений производительности комплекса близко к нормальному закону, усеченному слева (с минимальными значениями производительности), для высокого уровня — усеченному справа (с максимальными значениями производительности). Для среднего уровня, а также при неопределенном уровне организации и управления распределение производительности технологического комплекса также близко к нормальному закону.

6. Полученные результаты подтверждают важность повышения уровня организации и управления технологическим комплексом, в первую очередь за счет повышения квалификации исполнителей и обеспечения бесперебойной поставки материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К а л у г и н, Ю.Б. Модель воздействия случайных факторов на технологический процесс укладки пути [Текст] / Ю.Б. Калугин, А.Е. Годунов // Научно-технический сборник. № 25–2. — Петродворец, ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2013. — С. 87–93.
2. К а л у г и н, Ю.Б. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 51–59.

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

Получено 15.06.13

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

### **MODELING OF INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS ON THE TECHNOLOGICAL COMPLEX**

The model of calculation of influence of destabilizing factors on a technological complex of the stowage of the railway, as a result of which realization the settlement productivity of a complex is defined with influence of these factors is offered. The model is based on step-by-step realization of all possible combinations on «a tree of decisions». Settlement parameters of a complex taking into account all options of influence for various levels of the organization and management of a complex are presented.

**Key words:** productivity of the technological complex, destabilizing factors, organization and management levels, distribution laws.

#### REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Model of influence of probabilistic factors on technological process of stowage of the railway [Text] / Yu.B. Kalugin, A.E. Godunov // Works of Military Institute of rail transport troops and military communications. Vol. 25-2. — St. Petersburg, 2013. — P. 87-93.
2. Kalugin, Yu.B. Calculation of the schedules of work with probabilistic temporary parameter [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 51-59.

---

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.179.16:539.3

Л.Н. СТЕПАНОВА, С.А. БЕХЕР, А.Н. КУРБАТОВ, Е.С. ТЕНИТИЛОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТОУПРУГОСТИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

Методом акустоупругости проведены исследования напряженного состояния рельса. Определено, что наиболее информативными являются поперечные волны. Экспериментальные результаты подтверждены тензометрическими измерениями в области подошвы, головки и шейки рельса. Показано, что время распространения продольной и поперечной ультразвуковой волны зависит от величины напряжений в рельсе.

Ключевые слова: рельс, деформация, напряжения, акустоупругость, тензодатчик, ультразвук, продольная и поперечная волны.

Надежная эксплуатация рельсов является одной из основных задач безопасной работы транспортно-технологических машин (башенных и железнодорожных кранов и т.д.). В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию циклических нагрузок, а также температурным влияниям окружающей среды. Повышение нагрузок на оси колесных пар вызывает увеличение напряжений в рельсах с последующим возникновением и развитием в них различных дефектов. Это приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния, накоплению микромеханической повреждаемости и разрушению.

Известно, что температурные влияния в рельсах вызывают появление значительных сжимающих и растягивающих продольных сил. Повышение температуры приводит к возникновению в рельсах сжимающих сил, достигающих 600–1000 кН и способных привести к их выбросу. При понижении температуры растягивающие силы достигают 1200–1700 кН, в результате чего развиваются трещины и разрушаются рельсовые стыки. Для обеспечения безопасности движения подвижного состава необходимо иметь информацию о возникающих в рельсах напряжениях, т.е. проводить их постоянный мониторинг. Для контроля напряжений и деформаций в металлических конструкциях используются различные методы неразрушающего контроля, а именно: тензометрия, магнитный и акустический методы.

Цель работы — исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии.

Ультразвуковой метод позволяет определять механические и прочностные характеристики металлов в объектах с начальными напряжениями [1–2]. На надежность выявления дефектов в металлах УЗ-методом оказывает влияние шероховатость их поверхности и качество акустического

контакта. Измерение времени распространения УЗ-волны позволяет определять структурное состояние металла с соответствующим набором таких характеристик, как относительное удлинение, предел текучести, твердость [2]. Однако вариация времени распространения УЗ-волны в металлах (в зависимости от вида и режима термической обработки) невелика и составляет 1–3 %. Поэтому точность измерения акустических характеристик должна быть не ниже 0,1 %.

В данной работе с использованием явления акустоупругости и тензометрии исследовалось одноосное напряженное состояние рельса. Поскольку точный расчет напряжений, действующих в рельсе, не всегда возможен, задача, связанная с экспериментальной оценкой его реального напряженного состояния, является актуальной. Контроль напряженного состояния материалов УЗ-методом, в основном, осуществляется с использованием продольных и поперечных волн.

При описании упругого поведения изотропного материала (в приближении третьего порядка малости по деформациям) применяется девять компонентов тензора  $\beta_{ij}$ , пять из которых являются независимыми [3]. Для рельсовой стали значения коэффициентов акустоупругости составляют,  $\text{ТПа}^{-1}$  [3]:  $\beta_{3,3} -12,13$ ;  $\beta_{1,1} 1,83$ ;  $\beta_{1,3} -7,48$ ;  $\beta_{3,1} -1,22$ ;  $\beta_{1,2} 0,24$ . Относительные изменения скорости продольных ( $l$ )  $\delta v_{3,3}$  и поперечных ( $t$ )  $\delta v_{3,1}$  волн, распространяющихся под углом  $\varphi$  вдоль оси  $z'$ , определяются как

$$\delta v_l = \delta v_{3,3} = \sigma_{3,3} [\beta_{3,3} \sin^2 \varphi + \beta_{1,1} \cos^2 \varphi]; \quad (1)$$

$$\delta v_t = \delta v_{3,1} = \sigma_{3,3} [\beta_{3,1} \sin^2 \varphi + \beta_{1,3} \cos^2 \varphi], \quad (2)$$

где  $\sigma_{3,3}$  — компонента тензора механических напряжений, направленных по оси  $z$  на площадку, нормаль которой расположена вдоль оси  $z$  (рис. 1).

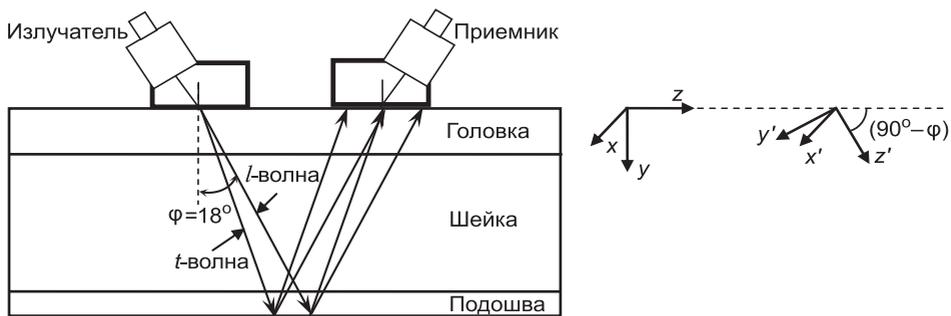


Рис. 1. Схема прозвучивания рельса УЗ-волной под углом  $\varphi$  к нормали поверхности катания

Используя коэффициенты акустоупругости, преобразуем формулы (1), (2) к виду

$$\delta v_l = -12,13 \cdot 10^{-12} \sigma_{3,3} [\sin^2 \varphi - 0,15 \cos^2 \varphi]; \quad (3)$$

$$\delta v_t = -7,48 \cdot 10^{-12} \sigma_{3,3} [0,16 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi], \quad (4)$$

где  $\delta v_l, \delta v_t$  — относительные изменения скоростей распространения продольных и поперечных волн соответственно.

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном стенде с гидравлическим приводом, предназначенном для растяжения и сжатия рельсов [3]. Для этого на поверхности катания рельса размещался блок, состоящий из двух пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) с углом ввода  $\varphi = 18^\circ$  и резонансной частотой  $f_p = 2,5$  МГц. Преобразователи подключались по раздельной схеме, причем один из них являлся излучателем УЗ-волн, а второй — приемником (рис. 2, а). Дефектоскопом УД2-12 возбуждались зондирующие импульсы и осуществлялся контроль А-развертки. Затем определялось время прохождения УЗ-волной расстояния от поверхности катания рельса под излучателем до дна подошвы и обратно к поверхности катания рельса под приемником (см. рис. 1).

Задержку времени распространения УЗ-сигналов измеряли цифровым осциллографом TDS-2014, работающим с дискретностью 1 нс. При

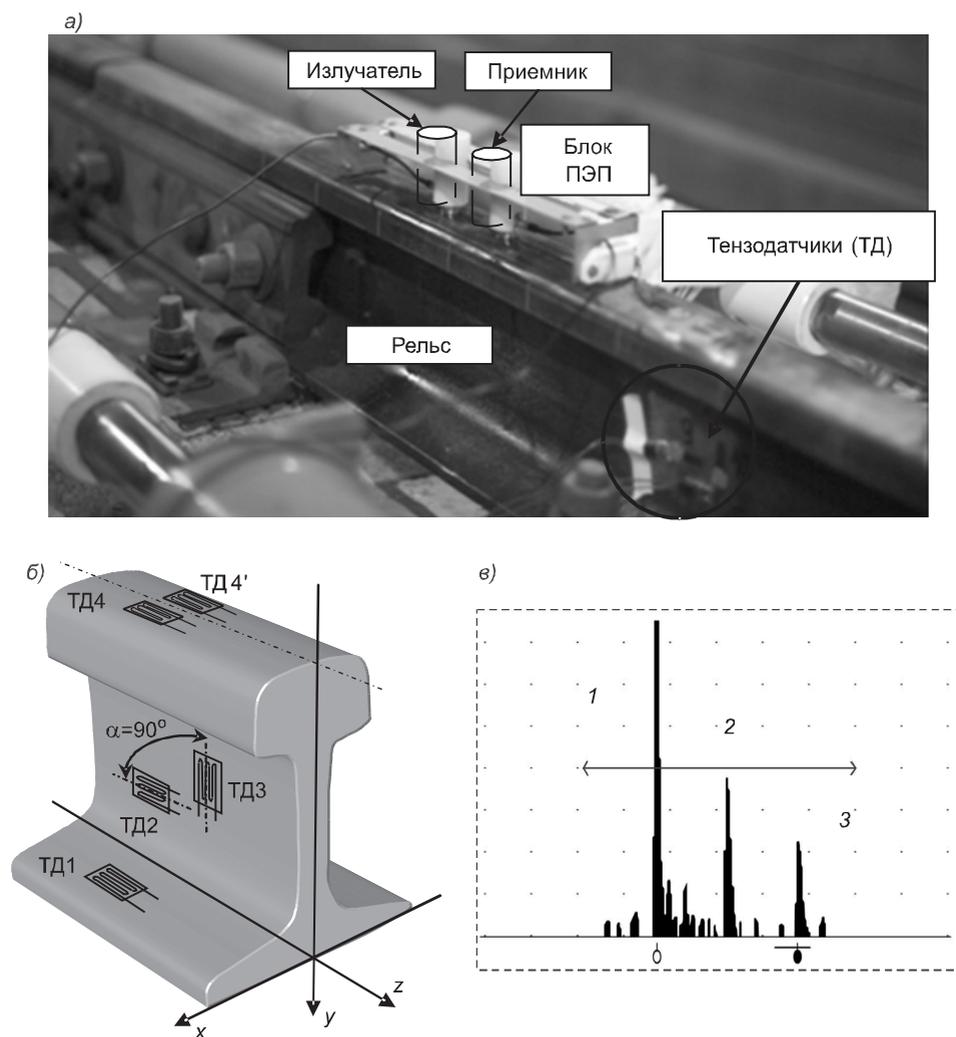


Рис. 2. Установка тензодатчиков и пьезопреобразователей на рельс (а); схема расположения тензодатчиков на рельсе в одном сечении (б) и внешний вид экрана дефектоскопа УД2-12 с А-разверткой (в)

1 — донный сигнал продольной волны; 2 — донный сигнал поперечной и продольной волн; 3 — донный сигнал поперечной волны

этом среднеквадратическое отклонение результатов измерений не превышало 3 нс. Определение данных зависимостей осуществлялось при установке датчиков УЗ-дефектоскопа УД2-12.

Для изучения зависимости напряжений растяжения или сжатия от нагрузки, прикладываемой к рельсу, проводилось измерение линейных деформаций с использованием тензометрии [4]. Для этого в трех сечениях на головку, шейку и подошву рельса были наклеены продольно ориентированные проволочные тензодатчики типа ПКС-12 (сертификат RU.C. 28.007.A № 30935, введен в Государственный реестр под № 37343-08) под номерами 4, 4', 2, 2', 1, 1'. Такие же тензодатчики (3, 3') использовались для измерения поперечных деформаций.

На рис. 2, б показана схема расположения тензодатчиков на рельсе в одном сечении. Тензодатчики устанавливались на шейке рельса симметрично с двух сторон (рис. 2, б). Информация с одиночных тензодатчиков поступала на микропроцессорную тензометрическую систему ММТС-64.01 (свидетельство об утверждении типа RU.C.34.007.A № 44412, регистрационный номер № 21760-01) класса точности 0,2 [4].

В стенде растягивающая нагрузка прикладывалась к рельсу ступенчато. Результаты тензометрии показаны на рис. 3. Максимальные растягивающие напряжения в области подошвы и головки рельса составили 89,2 МПа, а на шейке — 78,9 МПа. При выдержке нагрузки на каждой ступени нагружения производилось измерение временных параметров УЗ-волн. Так как большую часть пути УЗ-волна проходит по шейке рельса, для установления зависимости времени ее запаздывания от приложенной растягивающей механической нагрузки, использовались показания тензодатчиков, установленных на шейке вдоль оси  $x$ .

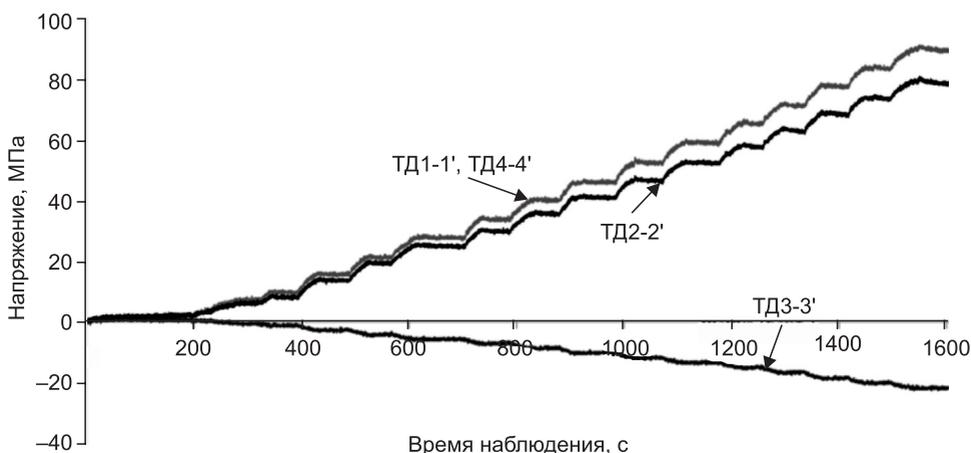


Рис. 3. Изменения напряжений в рельсе, полученные при его тензометрировании в процессе растяжения

Перед проведением измерений датчик-излучатель закреплялся неподвижно, а датчик-приемник перемещался вдоль рельса (см. рис. 2, а). Таким образом находилось место наибольшей чувствительности датчика-приемника к трем донным сигналам (рис. 2, в). Первый донный сигнал (позиция 1 на рис. 2, в) связан с распространением продольной УЗ-волны

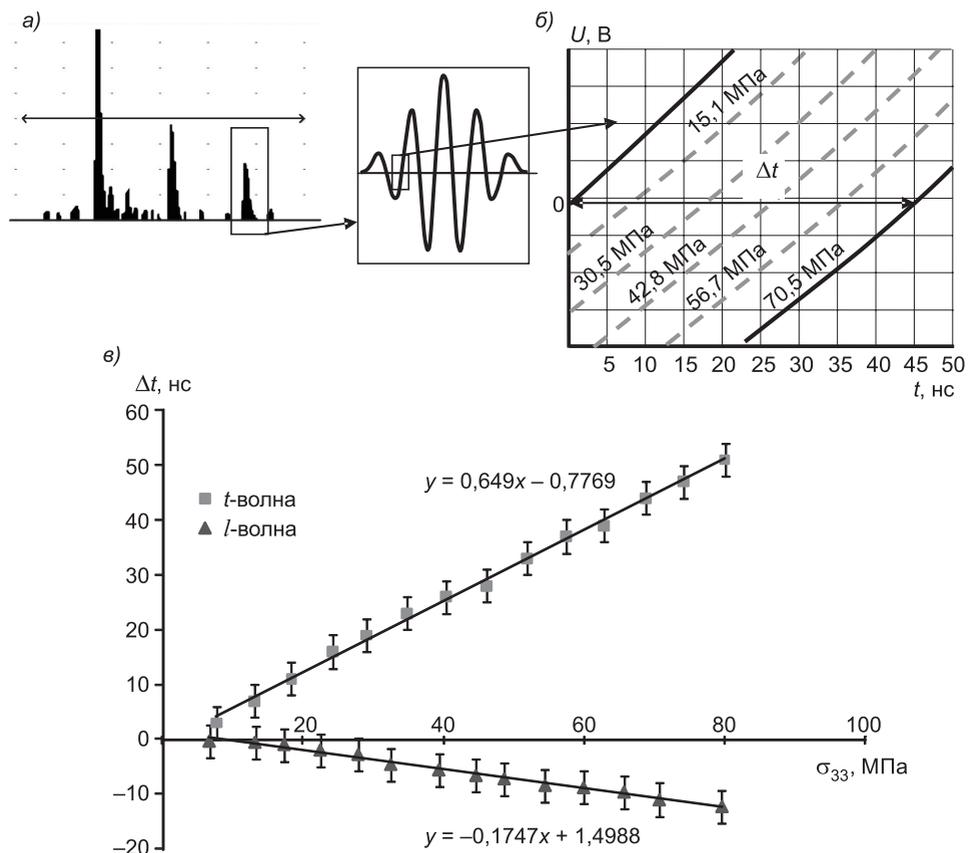


Рис. 4. Исследуемый интервал донного сигнала поперечной волны (а); осциллограммы сигналов поперечной волны при разных напряжениях в рельсе (б) и экспериментальная зависимость изменения времени распространения продольной ( $l$ ) и поперечной ( $t$ ) волны в рельсе от продольных напряжений (в)

до подошвы рельса и обратно. Второй донный сигнал (позиция 2 на рис. 2, в) являлся комбинированным и обусловлен распространением продольной и поперечной УЗ-волны. Этот сигнал шел от источника до дна рельса в виде продольной (поперечной) волны. При отражении от дна за счет эффекта трансформации возникала волна другого типа — поперечная (продольная), которая распространялась до приемника. Третий донный сигнал (позиция 3 на рис. 2, в) связан с распространением поперечной УЗ-волны.

На рис. 4, а показано изображение третьего донного сигнала на экране осциллографа, а на рис. 4, б — запаздывание данного сигнала при увеличении в рельсе деформации растяжения. Экспериментальные зависимости изменения времени распространения  $\Delta t$  продольной ( $l$ ) и поперечной ( $t$ ) волны от создаваемых в рельсе продольных напряжений  $\sigma_{33}$  показаны на рис. 4, в. Угол наклона представленных на рис. 4, в зависимостей подтверждает, что поперечная  $t$ -волна более чувствительна к создаваемым в рельсе механическим напряжениям, чем продольная  $l$ -волна. Использование поперечных волн позволяет получить больше информации о внутреннем строении твердых тел и их физико-механических характеристиках.

**Выводы.** 1. Поскольку время распространения УЗ-колебаний является структурно-чувствительной характеристикой металла, следовательно

но, можно определять его основные механические характеристики, такие как относительное удлинение, предел текучести, твердость.

2. При измерениях напряжений в объекте контроля предпочтительно использовать поперечные волны, так как они позволяют получить больше информации о внутреннем строении твердых тел и их физико-механических характеристиках.

3. Использование при контроле рельсов явления акустоупругости дает возможность эффективно определять их напряженное состояние. Результаты по изучению напряжений в рельсе, полученные методом акустоупругости, подтверждены тензометрией.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитина, Н.Е. Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупругости [Текст] / Н.Е. Никитина, В.А. Смирнов // В мире неразрушающего контроля. — 2009. — № 1(43). — С. 26–28.
2. Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов [Текст] / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. — Новосибирск : Наука, 1996. — 124 с.
3. Бехер, С.А. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах [Текст] / С.А. Бехер, А.Н. Курбатов, Л.Н. Степанова // Вестн. РГУПС. — 2013. — № 2. — С. 104–111.
4. Степанова, Л.Н. Ресурсные испытания конструкций с использованием микропроцессорных тензометрических систем [Текст] / Л.Н. Степанова, В.Л. Кожемякин // Дефектоскопия. — 2007. — № 7. — С. 85–90.

*СТЕПАНОВА Людмила Николаевна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: stepanova@stu.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

*БЕХЕР Сергей Алексеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: beher@stu.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

*КУРБАТОВ Александр Николаевич, ст. препод.; E-mail: kant@stu.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

*ТЕНИТИЛОВ Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: voxel@stu.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено после доработки 27.06.13

**Stepanova Lyudmila Nikolaevna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: stepanova@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Beher Sergey Alexeevich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: beher@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Kurbatov Alexandr Nikolaevich**, senior lecturer; E-mail: kant@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Tenitilov Evgeny Sergeevich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: voxel@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

#### MECHANICAL STRAINS CONDITION INVESTIGATION IN RAILS BY MEANS OF ACOUSTIC ELASTICITY AND STRAIN MEASUREMENT

Mechanical strains condition investigation in rails are made means of acoustic elasticity method. It is defined that transverse waves are most informative. Experimental results were obtained and confirmed by strain measurements in rail base, head and web zones. It is shown that transverse and longitudinal waves propagation time depends on mechanical strain level in rail.

Key words: rail, deformation, mechanical strains, acoustic elasticity, strain sensor, ultrasound, transverse and longitudinal wave.

#### REFERENCES

1. Nikitina, N.E. New mechanical strains in metal constructions definition technology based on acoustic elasticity phenomenon [Text] / N.E. Nikitina, V.A. Smirnov // Non-destructive testing world. — 2009. — N 1(43). — P. 26–28.
  2. Muraviev, V.V. Sonic speed and metals and alloys structure [Text] / V.V. Muraviev, L.B. Zuev, K.L. Komarov. — Novosibirsk : Science, 1996. — 124 p.
  3. Beher, S.A. Acoustic elasticity effect usage while investigation of mechanical strains in rails [Text] / S.A. Beher, A.N. Kurbatov, L.N. Stepanova // Bull. RGUPS. — 2013. — N 2. — P. 104–111.
  4. Stepanova, L.N. Longevity constructions test by means of microprocessor strain-gauge systems [Text] / L.N. Stepanova, V.L. Kojemyakin // Defectoscopy. — 2007. — N 7. — P. 85–90.
-

## НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

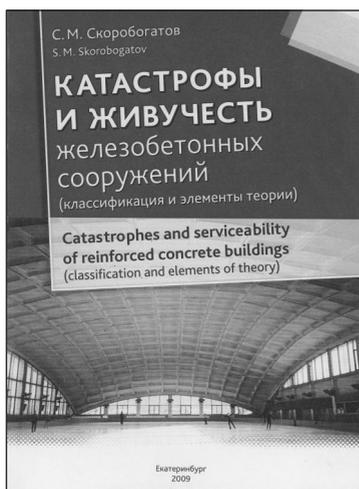
### НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ\*

Крупным ученым в области железобетонных конструкций профессором, доктором технических наук, членом-корреспондентом РААСН, заслуженным деятелем науки РФ С.М. Скоробогатовым в 2012 г. опубликовано учебно-методическое пособие «Поверочные расчеты безбалочных бескапитальных монолитных железобетонных перекрытий по второй группе предельных состояний (прогибы, трещины)».

Безбалочные бескапитальные монолитные перекрытия получили широкое применение в железобетонных каркасах высоких зданий различного назначения. Увеличение пролетов между колоннами (более 6 м) и неоправданное утолщение плит перекрытий привело к настоящей необходимости создания современного простого и надежного поверочного расчета прогибов и трещин как контроля за результатами расчетов многих компьютерных программ, не учитывающих современные тенденции норм.

Поскольку метод замещающих (балок полос) позволяет учитывать влияние провисания несущих надколонных полос на висячие пролетные полосы, он используется и объединяет другие способы расчета: применение конечных формул из сопротивления материалов, статический способ расчета пластин, опертых по контуру, и кинематический расчет пластин.

Пособие может быть использовано студентами, обучающимися по направлению «Строительство».



Также представляет интерес опубликованная ранее монография С.М. Скоробогатова «Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории)», являющаяся обобщением его многолетних научных разработок.

\* Презентация книг С.М. Скоробогатова.

Автором предложена классификация техногенных строительных катастроф для железобетонных сооружений по степени предсказуемости. Кроме того, удалось классифицировать роль человеческого фактора в проявлении катастроф. Катастрофы типа «тренд» и «срыв» во многом зависят от организационных и социальных факторов, «экстремум» — от незнания свойств материала при работе в конструкции, т.е. от научно-технических проблем, достаточно подробно рассмотренных в монографии.

В стадии предразрушения массивные тела превращаются в иерархическую систему блоков, вложенных друг в друга и разделенных сквозными или прерывистыми трещинами. Раскрытие неопределенности в трещинообразовании от начала до конца нагружения впервые описывается с помощью информационной энтропии при независимом ступенчатом появлении сигналов о разрыве связей между блоками.

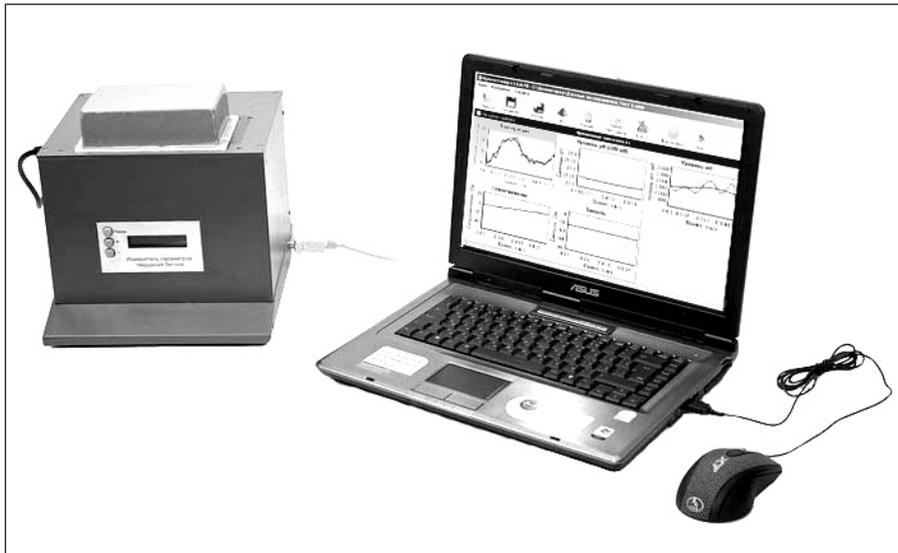
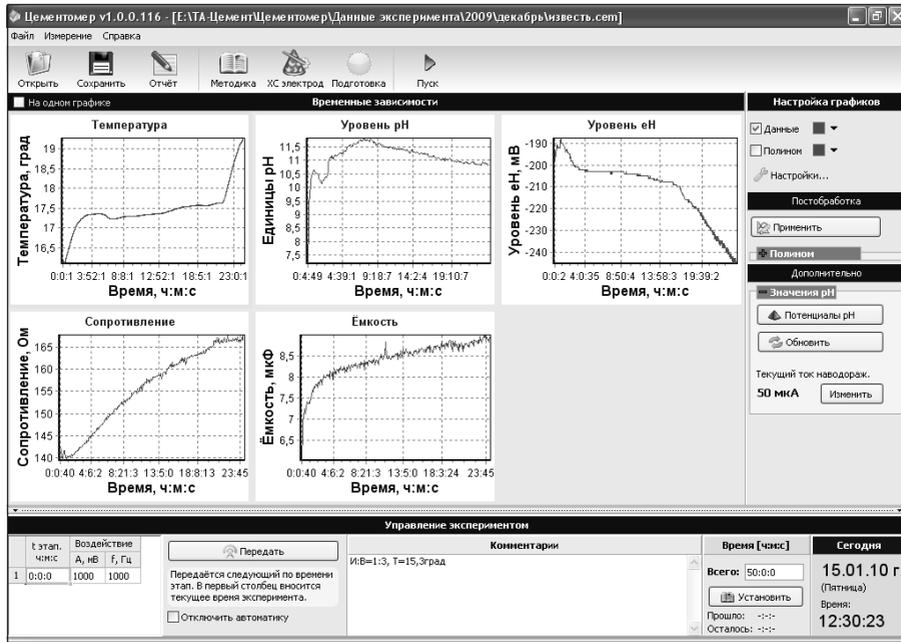
Новая концепция определения состояния конструкции при любой степени нагружения заключается в применении полученного автором параметра резерва живучести конструкции, совпадающего по характеру изменения с информационной энтропией, что позволяет ввести в расчеты масштабный коэффициент.

Новый параметр резерва живучести с учетом масштабного коэффициента способствует при обследовании установлению состояния конструкции, поврежденной нагрузкой неизвестной величины, и определению целесообразности и способов усиления. В монографии приводится анализ причин разрушения наиболее известных техногенных строительных катастроф.

По вопросам приобретения книг обращайтесь в Издательство УрГУПС: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, к. 193. Тел.: (343)221–24–90. E-mail: akoltyshev@rio.usurt.ru.

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В НГАСУ (Сибстрин) на кафедре строительных материалов и специальных технологий разработан универсальный комплекс «УККМ-1», предназначенный для изучения процессов твердения и деструкции композиционных материалов.



## ПРИМЕНЕНИЕ

Этот прибор позволяет исследовать и контролировать свойства композиционных материалов в процессе их твердения.

## ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

- |   |             |
|---|-------------|
| • рН (металлический электрод)                 | 7–14 (0,01) |
| • Окислительно-восстановительный потенциал, В | 0,5 (0,002) |
| • Электрическая емкость, мкФ                  | 0–20        |
| • Электрическое сопротивление, Ом             | 5–8000      |

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- |                           |               |
|---------------------------|---------------|
| • Переменный ток:         |               |
| ○ диапазон частот, кГц    | 10–500 000    |
| ○ напряжение, В           | 10            |
| ○ величина тока, А        | 0,4           |
| • Диапазон температур, °С | от –20 до +50 |

**Особенности работы.** В камеру прибора помещают три испытываемых образца размерами 20×20×20 мм, необходимых для измерения физико-химических характеристик, проведения воздействий электрическим током на образец и для получения материала без воздействий, который можно подвергнуть физико-механическим испытаниям. Прибор (УККМ-1) подключается к компьютеру для регистрации и обработки полученных от него данных и настройки методик для проведения испытаний.

Время проведения эксперимента может быть не ограничено.

Разработчики: **МАШКИН Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.,  
**БАЕВ Владимир Сергеевич**, канд. хим. наук, доц.

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

E-mail: [ntio@sibstrin.ru](mailto:ntio@sibstrin.ru)

Internet: [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)

Тел./факс: (383) 266-28-89

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Специалистами НГАСУ (Сибстрин) г. Новосибирска разработана технология подготовки питьевой воды из подземных источников с повышенным содержанием железа, марганца, солей жесткости, фенолов, сероводорода.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРЕДУСМАТРИВАЕТ

- обработку исходной воды в дегазаторе-окислителе новой конструкции;
- умягчение и осветление воды в разработанной конструкции реактора-осветлителя с предварительной обработкой реагентами;
- фильтрование через дробленые горелые породы и при значительном содержании органических примесей;
- доочистку на сорбционных фильтрах.



Для подземных вод с нормативной жесткостью из предлагаемой технологической схемы может быть исключена ступень обработки в реакторе-осветлителе.

Для сооружений производительностью более 25000 м<sup>3</sup>/сут предусматриваются радиальные фильтры.

Замкнутая система использования промывной воды с обработкой реагентом «Кемфлок» и СК-1, а также утилизация осадков по разработанной эффективной технологии позволяет отнести ее к категории экологически безопасных.

Технология внедрена в населенных пунктах Кемеровской и Новосибирской областей.

Высокое качество питьевой воды и минимальные затраты при очистке подземных вод по разработанной технологии позволят решить социальную проблему питьевого водоснабжения населенных пунктов и в других регионах.

На новую технологию получен патент № 2328454, Россия, «Станция водоподготовки», заявка № 2006107840 от 13.03.2006, опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19.

Разработчики: СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф.,  
ВОЙТОВ Евгений Леонидович, д-р техн. наук, доц.

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

E-mail: [unir@sibstrin.ru](mailto:unir@sibstrin.ru)

Internet: [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)

Тел./факс: (383) 266-28-89

## **ГИДРОФОБНАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ**

Гидрофобизация — один из наиболее эффективных способов предотвращения поглощения материалом воды.

В НГАСУ (Сибстрин) на кафедре строительных материалов и спецтехнологий разработаны новые виды гидрофобизаторов на основе кремнийорганических соединений (силанов, силоксанов), обладающих способностью химически взаимодействовать с поверхностью покрываемых изделий благодаря наличию активных функциональных групп и технологии гидрофобной обработки различных строительных материалов.

### **В РЕЗУЛЬТАТЕ ГИДРОФОБНОЙ ОБРАБОТКИ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ:**

- снижение поглощения воды поверхностью материала в 5–20 раз;
- повышение водо-, воздухо-, морозостойкости материалов в 5–10 раз;
- увеличение срока эксплуатации материалов, конструкций и в целом зданий и сооружений;
- увеличение сроков между ремонтами в 2–10 раз;
- сохранение и улучшение на 10–30 % теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;
- улучшение внешнего вида зданий за счет устранения мокрых пятен, высолов, отслоения защитно-отделочных покрытий;
- предотвращение промокания и промерзания стыков, образования плесени;
- уменьшение капиллярного подсоса грунтовых вод.

При этом на длительный срок обеспечиваются гидрофобные свойства, не изменяется внешний вид и сохраняется воздухопроницаемость материалов стеновых конструкций.

Применение гидрофобизаторов требует соблюдения технологии. Оптимальные расход гидрофобизатора, концентрация рабочего раствора и способ обработки должны подбираться для конкретного материала индивидуально. По этим вопросам на кафедре можно получить исчерпывающую информацию.

На современном этапе развития строительной отрасли эти передовые технологии должны быть в арсенале любой строительной и ремонтно-строительной организации.

**Разработчик ЕРШОВА Светлана Георгиевна**

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

**E-mail: [ntio@sibstrin.ru](mailto:ntio@sibstrin.ru)**

**Internet: [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)**

**Тел./факс: (383) 266-28-89**

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:  
— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью 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").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: *фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;

— почтовые адреса, телефоны и *e-mail авторов*;

— *название статьи на английском языке*;

— *аннотацию на английском языке*;

— *ключевые слова на английском языке*;

— *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. 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 следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *п*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2013 г. — из расчета 750 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(SI).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присылать 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. *Корректурa 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 2013 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический  
В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2100 р.

Цена отдельного номера — 350 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 (655) 2013**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Г.П. Рыжкова*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*