

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

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

№ 3 (663)  
Март 2014 г.

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
П.А. Дмитриев, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)  
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.  
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.  
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113  
Тел./факс +7 (383) 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 27.03.14. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Усл. печ. л. 10,85+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 5555

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Немировский Ю.В., Болтаев А.И.** Метод расчета деревянных стропильных покрытий зданий. Сочинение 1. Моделирование и общие закономерности 5

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Хархардин А.Н., Строкова В.В., Кожухова Н.И.** Вывод уравнений для критических размеров кластеров, нано- и микрочастиц. Часть 2 ..... 14

- Рахимбаев Ш.М., Половнева А.В.** Теоретическое обоснование энергоэффективной тепловой обработки бетона ..... 22

- Володченко А.Н., Лесовик В.С.** Силикатные материалы автоклавного твердения на основе алюмосиликатного сырья как фактор оптимизации системы «человек — материал — среда обитания» ..... 27

- Ильина Л.В., Бердов Г.И., Гичко Н.О., Теплов А.Н.** Повышение прочности цементного камня при введении дисперсных минеральных добавок ..... 34

### САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

- Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И.** Разработка способов снижения объема аспирации при перевозках сыпучих материа-

лов ковшовыми элеваторами. С о б щ е н и е 2. Снижение объемов аспирации	42
<b>Костин В.И., Кармишина А.В.</b> Влияние величины теплотехнической неоднородности наружных ограждающих конструкций на толщину утеплителя .....	52
<b>Рохлецова Т.Л., Кияница Л.А., Рогов Д.В.</b> Возможности применения распределительных гребенок теплоснабжения из труб прямоугольного сечения в ЦТП и ИТП .....	61
<b>Самарин О.Д.</b> О подтверждении вероятностно-статистических соотношений между расчетными параметрами наружного климата .....	66
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Попов Д.А.</b> Дроссельно-беззолотниковые пневматические ударные механизмы и их физико-математическое описание .....	70
<b>Тищенко И.В.</b> Модели пневматических импульсных генераторов с переменной структурой ударной мощности .....	79
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Семикин П.П.</b> Критерии отбора высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии .....	88
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Коротких А.В., Просянников Б.Д., Крылов И.И.</b> Особенности работы болтовых соединений с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных оцинкованных профилей .....	93
<b>Митасов В.М., Коянкин А.А.</b> Работа диска сборно-монолитного перекрытия .....	103
<b>Дмитриева Т.Л., Ле Чан Минь Дат.</b> Сравнительная оценка результатов оптимального проектирования ферм с использованием программных средств .....	110
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Степанова Л.Н., Чернова В.В.</b> Исследование процесса разрушения образцов из композиционных материалов методом акустической эмиссии .....	118

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER  
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

# **CONSTRUCTION**

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

**N 3 (663)**

March 2014

*Editor-in-Chief* V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,  
Honour. Mem. RAACS

*Editorial Board:*

- A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.  
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
P.A. Dmitriyev, DSc (Eng), Prof.  
V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof.  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.  
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.  
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:*

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008

 Phone number/fax +7 (383) 266 28 59  
 [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## **CONTENTS**

### **THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES**

- Nemirovsky Yu.V., Boltaev A.I.** Method of calculation of wooden rafter coverings of buildings. Message 1. Modelling and general regularities ..... 5

### **BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

- Kharkhardin A.N., Strokova V.V., Kozhuhova N.I.** Derivation of equations for critical sizes for clusters of nano- and microparticles. Part 2 ..... 14

- Rakhimbaev Sh.M., Polon'neva A.V.** Theoretical justification of power effective thermal treatment of concrete ... 22

- Volodchenko A.N., Lesovik V.S.** Silicate materials autoclaved hardening based on aluminosilicate materials based as an optimization factor in the «man — material — habitat» system ..... 27

- Ilina L.V., Berdov G.I., Gichko N.O., Teplov A.N.** Increase strength of cement when administered dispersive mineral supplements ..... 34

### **SANITARY ENGINEERING**

- Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I.** Development of methods for reducing the volume of aspiration during overloads of granular materials by bucket elevators. Message 2. The decrease in volumes of aspiration ..... 42

<b>Kostin V.I., Karmishkina A.V.</b> The influence of quantity heat engineering ununiformity of building envelopes on thickness insulation .....	52
<b>Rohletsova T.L., Kiyanitsa L.A., Rogov D.V.</b> Application potential of heat distribution header out of rectangular pipes in CHS and IHU .....	61
<b>Samarin O.D.</b> On verifying of probable and statistical correlation between design parameters of external climate .....	66
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Dedov A.S., Krutikov E.I., Popov D.A.</b> Throttle-without spool pneumatic percussion mechanisms and their physico-mathematical description .....	70
<b>Tishchenko I.V.</b> Variable percussion power pneumatic impulse generators .....	79
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Semikin P.P.</b> Selection criteria of high-rise buildings with renewable energy sources .....	88
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Korotkich A.V., Prosyankov B.D., Krylov I.I.</b> Features of work of connections formed by jacking connected elements of the thin-walled zinced profiles .....	93
<b>Mitasov V.M., Koyankin A.A.</b> Work of a disk combined and monolithic overlapping ....	103
<b>Dmitrieva T.L., Le Chan Minh Dat.</b> Comparative evaluation of results of optimal design truss by using software tools .....	110
<b>IN HIGHER SCHOOL LABS</b>	
<b>Stepanova L.N., Chernova V.V.</b> Research of destruction process of sample from composites by acoustic emission technique .....	118

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.011.1:539.3

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ, А.И. БОЛТАЕВ

## МЕТОД РАСЧЕТА ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ\*

Сообщение 1.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Разработана общая математическая модель деформирования деревянных стропильных покрытий зданий. Предполагается, что стропильные конструкции являются сборно-разборными с шарнирным соединением брусьев трапециевидного сечения в узлах. В общем случае допускается использование в стропильных покрытиях различных пород деревьев, учитываются нелинейные законы деформирования и свойство существенной разносопротивляемости дерева растяжению и сжатию.

**Ключевые слова:** стропильные покрытия, деревянные конструкции, растяжение, сжатие, предельные деформации, пределы прочности, брусья, законы деформирования.

**Введение.** Предполагаемое активное освоение Северо-Восточных и Приполярных районов России потребует ускоренного развития строительной индустрии для обширных удаленных районов со слабыми грунтовыми основаниями. Совершенно ясно, что массовая застройка в таких районах должна быть основана на использовании малоэтажных сборно-разборных деревянных и деревопластмассовых сооружений. Учитывая транспортные трудности и дороговизну северных завозов в эти районы, при массовой районированной застройке обживаемых районов следует делать упор на местные лесные ресурсы. Это потребует проведения специальных исследований по уточнению специфических свойств дерева как конструкционного материала и разработке методов расчета и проектирования элементов деревянных конструкций при учете этих специфических свойств. В данной статье эти вопросы будут рассмотрены применительно к конструкциям стержневого типа, моделирующим стропильные покрытия.

Разработка методов совершенствования расчета и проектирования деревянного малоэтажного строительства в настоящее время становится особенно актуальной, поскольку проблема развития малоэтажного строительства в городах рассматривается как социально-политическая и экономическая задача первостепенной важности при обеспечении населения жильем в достаточном количественном измерении по критериям доступности для большинства<sup>1</sup>.

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-01-00102.

<sup>1</sup> Загороднов Е.И. Малоэтажное домостроение в большом городе // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 5. С. 90–93.

В современном строительстве в покрытиях зданий различного назначения, при возведении мансардных этажей жилых и административных зданий широко используются стропильные деревянные системы. Они просты в изготовлении, надежны и долговечны, так как работают в условиях хорошо проветриваемых чердачных помещений. При правильном их конструировании достигается большой экономический эффект.

**1. Расчетная схема конструкции.** Рассмотрим симметричную сборную деревянную стропильную конструкцию, левая половина которой изображена на рис. 1. Считаем, что сборка осуществляется путем шарнирного закрепления в узлах  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  и  $V_5$ . Пусть  $(x_i, y_i)$  — координаты  $i$ -го узла в глобальной системе координат  $(X, Y)$ . Тогда для длины  $ij$ -го стержня, соединяющего узлы  $i$  и  $j$ , и направляющих косинусов единичного вектора вдоль этого стержня

$$l_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \quad \alpha_{ij} = \frac{x_j - x_i}{l_{ij}}, \quad \beta_{ij} = \frac{y_j - y_i}{l_{ij}}. \quad (1.1)$$

Вес и стоимость расходуемых на каркас материалов будут равны:

$$B = \sum l_{ij} A_{ij} \gamma_{ij}, \quad C = \sum l_{ij} A_{ij} \gamma_{ij} c_{ij}, \quad (1.2)$$

где  $A_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$ ,  $c_{ij}$  — соответственно площадь поперечного сечения, удельные вес и стоимость материала  $ij$ -го стержня.

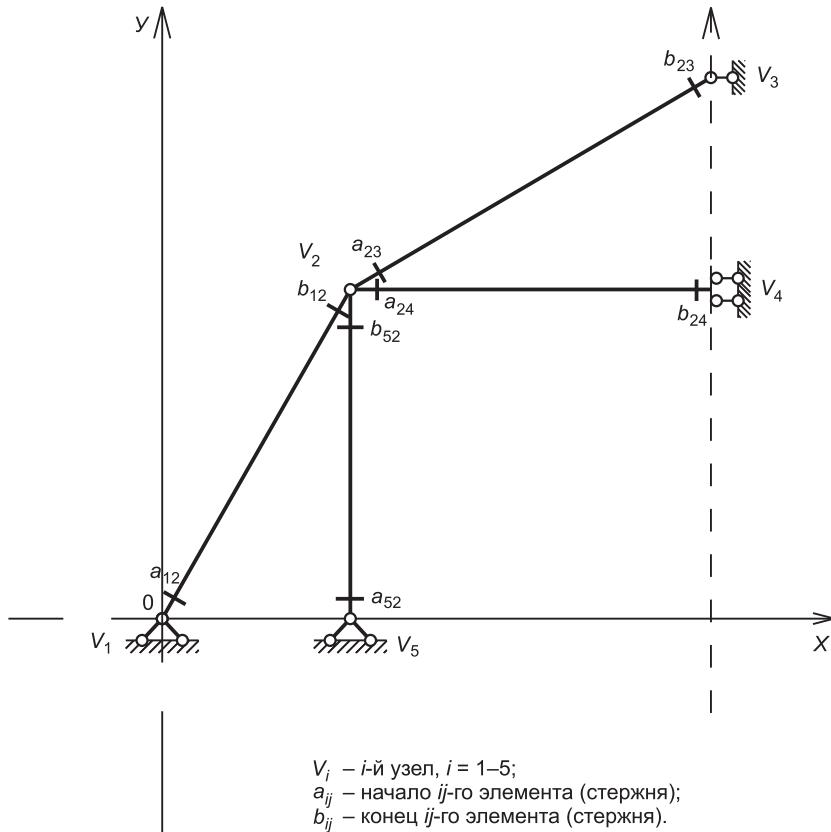


Рис. 1.

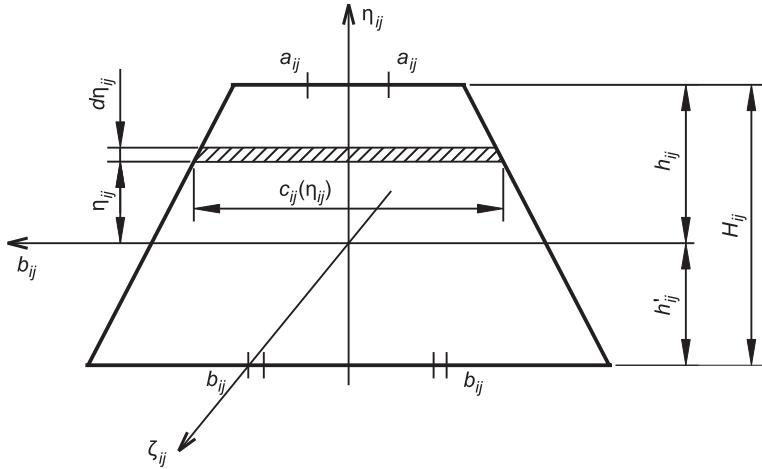


Рис. 2.

В общем случае считаем, что отдельные стержни являются брусьями трапециевидного поперечного сечения, изготовленными из различных пород дерева.

Наряду с общей системой координат ( $X, Y$ ) введем для каждого стержня локальную систему координат с продольной осью, проходящей через центр тяжести сечения и с началом координат в начальном узле соответствующего бруса. В такой локальной системе координат для сечения, изображенного на рис. 2, имеем:

$$\begin{aligned} c_{ij}(\eta_{ij}) &= k_{ij} - f_{ij}\eta_{ij}, \\ k_{ij} &= 2 \left[ b_{ij} - (b_{ij} - a_{ij}) \frac{h'_{ij}}{H_{ij}} \right], \quad f_{ij} = 2(b_{ij} - a_{ij}) \frac{1}{H_{ij}}, \\ h'_{ij} &= \frac{b_{ij} + 2a_{ij}}{3(a_{ij} + b_{ij})} H_{ij}, \quad h_{ij} = \frac{2b_{ij} + a_{ij}}{3(a_{ij} + b_{ij})} H_{ij}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Вектор распределенных нагрузок, действующих на стержень  $ij$  (рис. 3) в связанной с ним локальной системе, представим в виде:

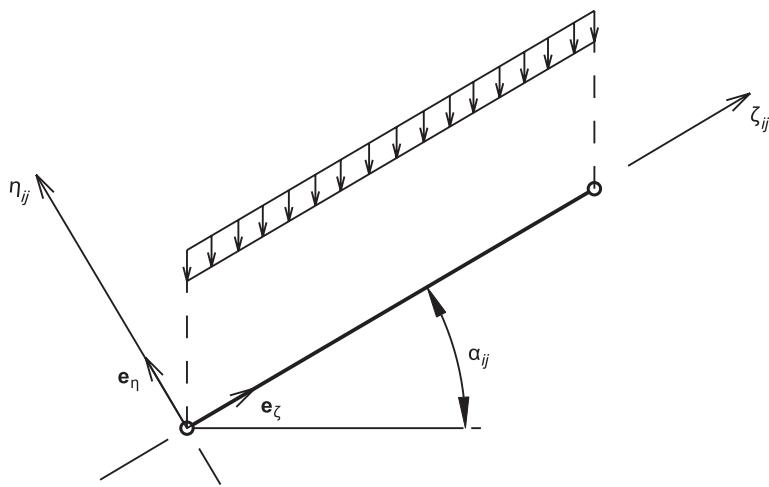


Рис. 3.

$$\begin{aligned}\vec{q}_{ij} &= q_{ij}^0 \vec{\mathbf{e}}_\zeta + p_{ij} \vec{\mathbf{e}}_n, \\ q_{ij} &= -(q_{ij}^0 + \gamma_{ij} A_{ij} \beta_{ij}), \quad p_{ij} = -(p_{ij}^0 + \gamma_{ij} A_{ij} \alpha_{ij}),\end{aligned}\tag{1.4}$$

где  $q_{ij}^0$  и  $p_{ij}^0$  — касательная и нормальная составляющие внешней распределенной нагрузки, передаваемой через покрытие;

$\gamma_{ij}$  и  $A_{ij}$  — удельный вес и площадь поперечного сечения  $ij$ -го стержня.

Кроме того,  $ij$ -й стержень будет нагружен распределенным вдоль него моментом

$$m_{ij} = q_{ij}^0 h_{ij}. \tag{1.5}$$

В таком случае уравнения равновесия для  $ij$ -го стержня (рис. 3) в локальной системе координат имеют вид:

$$\frac{dM_{ij}}{d\zeta_{ij}} - Q_{ij} - q_{ij}^0 h_{ij} = 0, \quad \frac{dQ_{ij}}{d\zeta_{ij}} - p_{ij} = 0, \quad \frac{dN_{ij}}{d\zeta_{ij}} + q_{ij} = 0. \tag{1.6}$$

Будем рассматривать брусья постоянного поперечного сечения, внешние распределенные нагрузки считаем постоянными вдоль оси стержня. Тогда, интегрируя уравнения равновесия стержня с учетом условий шарнирного закрепления в начальном и конечном узлах ( $M_{ij}(0) = 0$ ,  $M_{ij}(l_{ij}) = 0$ ) для изгибающего момента  $M_{ij}(\zeta_{ij})$ , перерезывающей  $Q_{ij}(\zeta_{ij})$  и продольной  $N_{ij}(\zeta_{ij})$  сил в  $ij$ -м стержне, будем иметь выражения:

$$\begin{aligned}M_{ij}(\zeta_{ij}) &= \frac{1}{2} p_{ij} (\zeta_{ij} - l_{ij}) \zeta_{ij}, \quad Q_{ij}(\zeta_{ij}) = p_{ij} (\zeta_{ij} - \frac{1}{2} l_{ij}) - q_{ij}^0 h_{ij}, \\ N_i(\zeta_i) &= -q_{ij} \zeta_i + N_i^0.\end{aligned}\tag{1.7}$$

Постоянные  $N_i^0$  определяются из условия равновесия сил в узловых сопряжениях. Рассмотрим равновесие сил в узле сопряжения  $V_2$  (рис. 4). Из условия равновесия узловых сил в проекциях на оси  $X$  и  $Y$  глобальной системы координат получим:

$$\begin{aligned}N_{23}^0 \alpha_{23} + N_{24}^0 - N_{12}(l_{12}) \alpha_{12} + Q_{23}(0) \beta_{23} - \\ - Q_{52}(l_{52}) - Q_{12}(l_{12}) \beta_{12} + R_{x2} = 0, \\ N_{23}^0 \beta_{23} - N_{52}(l_{52}) - N_{12}(l_{12}) \beta_{12} - Q_{23}(0) \alpha_{23} - \\ - Q_{24}(0) + Q_{12}(l_{12}) \alpha_{12} + R_{y2} = 0,\end{aligned}\tag{1.8}$$

где  $R_{x2}$ ,  $R_{y2}$  — проекции на оси глобальной системы координат внешней сосредоточенной силы в узле  $V_2$  (при ее отсутствии  $R_{x2} = R_{y2} = 0$ ). Для остальных узлов системы уравнения равновесия записываются аналогично.

Уравнений равновесия узловых сил недостаточно для определения всех искомых величин  $N_{ij}^0$ . Для получения недостающих уравнений необходимо выполнить условия непрерывности узловых перемещений и условия закрепления узлов  $V_1$  и  $V_5$  в глобальной системе координат. Если  $u_{0ij}$  и  $w_{ij}$  обозначают компоненты вектора перемещения в локаль-

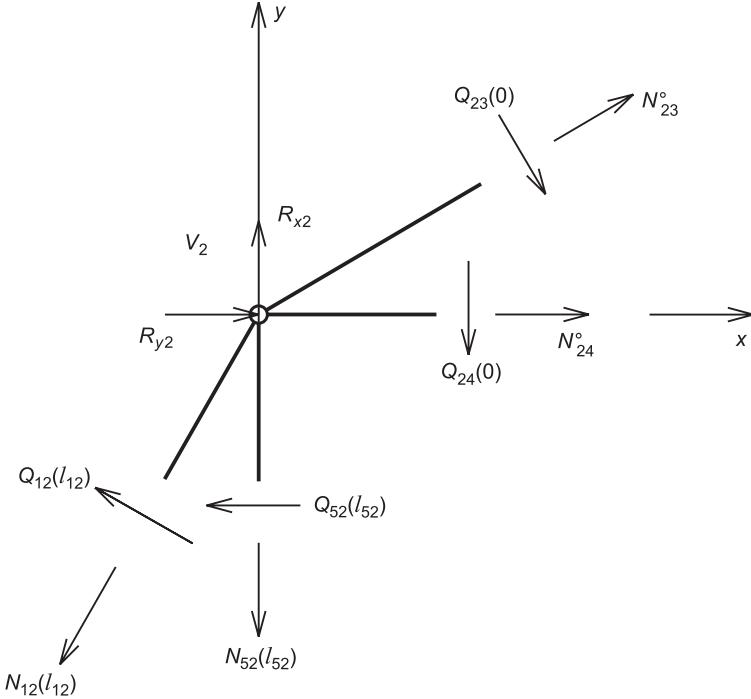


Рис. 4.

ной системе координат, то для деформаций в  $ij$ -м стержне будем иметь зависимости:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ij}(\zeta_{ij}, \eta_{ij}) &= \varepsilon_{0ij}(\zeta_{ij}) + \eta_{ij}\kappa_{ij}(\zeta_{ij}), \\ \kappa_{ij}(\zeta_{ij}) &= -\frac{d^2 w_{ij}}{d \zeta_{ij}^2}, \quad \varepsilon_{0ij}(\zeta_{ij}) = \frac{du_{0ij}}{d \zeta_{ij}}.\end{aligned}\quad (1.9)$$

Интегрируя эти равенства, получим:

$$\begin{aligned}u_{0ij}(\zeta_{ij}) &= u_{ij}^0 + \int_0^{\zeta_{ij}} \varepsilon_{0ij} d\zeta_{ij}, \\ w_{ij}(\zeta_{ij}) &= w_{ij}^0 + \varphi_{ij}^0 \zeta_{ij} - \int_0^{\zeta_{ij}} \left( \int_0^{\zeta_{ij}} \kappa_{ij}(\zeta_{ij}) d\zeta_{ij} \right) d\zeta_{ij},\end{aligned}\quad (1.10)$$

где постоянные  $u_{ij}^0$ ,  $w_{ij}^0$  и  $\varphi_{ij}^0$  определяются из условия непрерывности горизонтальных и вертикальных перемещений узловых соединений:

$$\begin{aligned}u_{0ij}(l_{ij})\beta_{ij} - w_{ij}(l_{ij})\alpha_{ij} &= u_{i(j+1)}^0\beta_{i(j+1)} - w_{i(j+1)}^0\alpha_{i(j+1)}, \\ u_{0ij}(l_{ij})\alpha_{ij} + w_{ij}(l_{ij})\beta_{ij} &= u_{i(j+1)}^0\alpha_{i(j+1)} + w_{i(j+1)}^0\beta_{i(j+1)}\end{aligned}\quad (1.11)$$

и нулевых перемещений узла  $V_1$ ,  $V_5$ :

$$u_{12}^0 = 0, \quad w_{12}^0 = 0, \quad u_{52}^0 = 0, \quad w_{52}^0 = 0. \quad (1.12)$$

Для выполнения этих требований необходимо определить функции  $\varepsilon_{0ij}(\zeta_{ij})$  и  $\kappa_{ij}(\zeta_{ij})$ , а следовательно, деформации  $\varepsilon_{ij}(\zeta_{ij}, \eta_{ij})$ , которые мо-

гут быть получены при использовании законов деформирования древесины.

**2. Аппроксимация экспериментальных данных деформирования различных пород древесины.** Выполненные для разных пород дерева испытания образцов при растяжении и сжатии [1] вдоль волокон обнаруживают важную и характерную для всех пород дерева особенность: при нагружении растяжением и сжатием диаграммы деформирования существенно различаются. При растяжении диаграмма деформирования вплоть до разрушения является слабо искривленной, а при сжатии ее форма значительно искривлена. Учитывая это обстоятельство, для единобразного описания законов деформирования различных пород деревьев, в работах [2,3] были предложены два альтернативных варианта аппроксимации диаграмм деформирования:

а) квадратичная аппроксимация [2]

$$\sigma^{\pm} = A_1^{\pm}\varepsilon + A_2^{\pm}\varepsilon^2 \quad (2.1)$$

(верхние знаки при  $\varepsilon_*^+ \geq \varepsilon \geq 0$ , нижние при  $-\varepsilon_*^- \leq \varepsilon \leq 0$ );

б) кубическая аппроксимация на всем диапазоне деформирования [3]  $-\varepsilon_*^- \leq \varepsilon \leq \varepsilon_*^+$

$$\sigma = B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_*^+, \varepsilon_*^-$  — предельные уровни деформаций при сжатии и растяжении на участках упрочнения. Возможные участки разупрочнения не рассматриваются ввиду отсутствия достоверных экспериментальных данных.

Пользуясь экспериментальными данными, приведенными в [1], и методами математической обработки, изложенными в [4], для различных пород деревьев получим значения характеристик  $A_1^{\pm}, A_2^{\pm}, B_1, B_2, B_3$  и предельных деформаций и напряжений  $\varepsilon_*^{\pm}, \sigma_*^{\pm}$ , указанных в табл. 1, 2.

**3. Связь усилий и деформаций.** Используя гипотезу Бернулли и закон деформирования материала (2.1), составим уравнения равновесия относительно локальных осей координат  $ij$ -го стержня при ( $\kappa_{ij} > 0$ ):

$$\begin{aligned} \int_{z_{0ij}}^{h_{ij}} \sigma^-(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) d\eta_{ij} + \int_{-h'_{ij}}^{z_{0ij}} \sigma^+(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) d\eta_{ij} &= N_{ij}, \\ \int_{z_{0ij}}^{h_{ij}} \sigma^-(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) \eta_{ij} d\eta_{ij} + \int_{-h'_{ij}}^{z_{0ij}} \sigma^+(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) \eta_{ij} d\eta_{ij} &= M_{ij}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $z_{0ij}$  — координата нейтральной оси  $ij$ -го стержня

Таблица 1

Порода	Характеристики							
	$A_1^+$ $10^3 \text{ кг}/\text{см}^2$	$A_1^-$ $10^3 \text{ кг}/\text{см}^2$	$A_2^+$ $10^6 \text{ кг}/\text{см}^2$	$A_2^-$ $10^6 \text{ кг}/\text{см}^2$	$\varepsilon_*^+$ $10^{-3}$	$\varepsilon_*^-$ $10^{-3}$	$\sigma_*^+$ $\text{кг}/\text{см}^2$	$\sigma_*^-$ $\text{кг}/\text{см}^2$
Сосна	162,8	232,6	-3,1	27,1	7,4	-4,6	1036,0	-498,2
Ель	142,9	170,6	0	18,2	7,0	-5,0	1000,0	-397,1
Ясень	155,1	131,9	-2,4	7,9	10,96	-7,2	1414,3	-541,9
Дуб	142,0	142,0	-4,8	8,8	7,4	-8,04	1050,0	-571,0
Береза	184,0	184,0	-4,3	17,3	10,7	-5,3	1960,0	-489,0
Лиственница	147,0	147,0	-4,4	8,8	8,4	-8,4	1240,0	-615,0

Таблица 2

Порода	Характеристики						
	$B_1$ $10^3 \text{ кг/см}^2$	$B_2$ $10^6 \text{ кг/см}^2$	$B_3$ $10^9 \text{ кг/см}^2$	$\varepsilon_*^+$ $10^{-3}$	$\varepsilon_*^-$ $10^{-3}$	$\sigma_*^+$ $\text{кг/см}^2$	$\sigma_*^-$ $\text{кг/см}^2$
Сосна	180,6	7,6	-1,77	7,4	-4,6	1036,0	-498,2
Ель	136,8	7,1	-0,88	7,0	-5,0	1000,0	-397,1
Ясень	128,9	4,5	-0,41	10,96	-7,2	1414,3	-541,9
Дуб	124,3	4,4	-0,27	7,4	-8,0	1050,0	-571,0
Береза	163,6	9,6	-0,72	10,7	-5,3	1960,0	-489,0
Лиственница	128,6	4,4	-0,26	8,4	-8,4	1240,0	-615,0

$$z_{0ij} = -\frac{\varepsilon_{0ij}}{\kappa_{ij}}, \quad (3.2)$$

здесь  $\varepsilon_{0ij}$  — деформация волокна, проходящего через центр тяжести сечения  $ij$ -го стержня.

Интегрируя уравнения (3.1), получаем:

$$\begin{aligned} \kappa_{ij} D_{11ij} + \kappa_{ij}^2 D_{12ij} &= N_{ij}, \\ \kappa_{ij} D_{21ij} + \kappa_{ij}^2 D_{22ij} &= M_{ij}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Преобразуя систему (3.3), получаем уравнение для нахождения  $z_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$ :

$$(M_{ij} D_{11ij} - N_{ij} D_{21ij})(D_{22ij} D_{11ij} - D_{21ij} D_{12ij}) - (N_{ij} D_{22ij} - M_{ij} D_{12ij})^2 = 0. \quad (3.4)$$

$$\kappa_{ij} = \frac{N_{ij} D_{22ij} - M_{ij} D_{12ij}}{D_{22ij} D_{11ij} - D_{21ij} D_{12ij}}, \quad (3.5)$$

$$D_{11ij} = A_{1ij}^- r_{11ij} + A_{1ij}^+ r_{12ij}, \quad D_{12ij} = A_{2ij}^- r_{13ij} + A_{2ij}^+ r_{14ij}, \quad (3.6)$$

$$D_{21ij} = A_{1ij}^- r_{21ij} + A_{1ij}^+ r_{22ij}, \quad D_{22ij} = A_{2ij}^- r_{23ij} + A_{2ij}^+ r_{24ij},$$

$$r_{11ij} = h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} - \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij} h_{ij} \left( -k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) + \frac{1}{2} z_{0ij}^2 k_{ij} - \frac{1}{6} z_{0ij}^3 f_{ij},$$

$$r_{12ij} = -h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) - z_{0ij} h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) - \frac{1}{2} z_{0ij}^2 k_{ij} + \frac{1}{6} z_{0ij}^3 f_{ij},$$

$$r_{13ij} = h_{ij}^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} - \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij} h_{ij}^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij} - k_{ij} \right) +$$

$$+ z_{0ij}^2 h_{ij} \left( k_{ij} - \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} \right) - \frac{1}{3} z_{0ij}^2 k_{ij} + \frac{1}{12} z_{0ij}^4 f_{ij},$$

$$r_{14ij} = h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} + \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij}' \right) + z_{0ij} h_{ij}'^2 \left( \frac{2}{3} f_{ij} h_{ij}' + k_{ij} \right) +$$

$$+ z_{0ij}^2 h_{ij}' \left( k_{ij} + \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' \right) + \frac{1}{3} z_{0ij}^3 k_{ij} - \frac{1}{12} z_{0ij}^4 f_{ij},$$

$$\begin{aligned}
 r_{21ij} &= h_{ij}^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} - \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij} h_{ij}^2 \left( -\frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) + \frac{1}{6} z_{0ij}^3 k_{ij} - \frac{1}{12} z_{0ij}^4 f_{ij}, \\
 r_{22ij} &= h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{3} k_{ij} + \frac{1}{4} f_{ij} h_{ij}' \right) + z_{0ij} h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) - \frac{1}{6} z_{0ij}^3 k_{ij} + \frac{1}{12} z_{0ij}^4 f_{ij}, \\
 r_{23ij} &= h_{ij}^4 \left( \frac{1}{4} k_{ij} - \frac{1}{5} f_{ij} h_{ij} \right) + z_{0ij} h_{ij}^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij} - \frac{2}{3} k_{ij} \right) + \\
 &+ z_{0ij}^2 h_{ij}^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} - \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij} \right) - \frac{1}{12} z_{0ij}^4 k_{ij} + \frac{1}{30} z_{0ij}^5 f_{ij}, \\
 r_{24ij} &= -h_{ij}'^4 \left( \frac{1}{4} k_{ij} + \frac{1}{5} f_{ij} h_{ij}' \right) - z_{0ij} h_{ij}'^3 \left( \frac{1}{2} f_{ij} h_{ij}' + \frac{2}{3} k_{ij} \right) - \\
 &- z_{0ij}^2 h_{ij}'^2 \left( \frac{1}{2} k_{ij} + \frac{1}{3} f_{ij} h_{ij}' \right) + \frac{1}{12} z_{0ij}^4 k_{ij} - \frac{1}{30} z_{0ij}^5 f_{ij}.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Для ( $\kappa_{ij} < 0$ ) в уравнениях (3.3) меняем местами  $A_{ij}^-$  и  $A_{ij}^+$  и получаем:

$$\begin{aligned}
 \kappa_{ij} (A_{ij}^+ r_{11ij} + A_{ij}^- r_{12ij}) + \kappa_{ij}^2 (A_{2ij}^+ r_{13ij} + A_{2ij}^- r_{14ij}) &= N_{ij}, \\
 \kappa_{ij} (A_{ij}^+ r_{21ij} + A_{ij}^- r_{22ij}) + \kappa_{ij}^2 (A_{2ij}^+ r_{23ij} + A_{2ij}^- r_{24ij}) &= M_{ij}.
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Аналогично для закона деформирования (2.2):

$$\int_{-h_{ij}'}^{h_{ij}} \sigma(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) d\eta_{ij} = N_{ij}, \quad \int_{-h_{ij}'}^{h_{ij}} \sigma(\varepsilon_{ij}) c_{ij}(\eta_{ij}) \eta_{ij} d\eta_{ij} = M_{ij}. \tag{3.9}$$

Интегрируем и приводим к виду:

$$\begin{aligned}
 t_{1ij} d_{1ij} + \kappa_{ij} t_{2ij} d_{2ij} + \kappa_{ij}^2 t_{3ij} d_{3ij} + \kappa_{ij}^3 t_{4ij} d_{4ij} &= N_{ij}, \\
 t_{1ij} d_{2ij} + \kappa_{ij} t_{2ij} d_{3ij} + \kappa_{ij}^2 t_{3ij} d_{4ij} + \kappa_{ij}^3 t_{4ij} d_{5ij} &= M_{ij}.
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Система уравнений (3.10) представляет собой нелинейную алгебраическую систему относительно  $\varepsilon_{0ij}$  и  $\kappa_{ij}$ .

$$t_{1ij} = B_{1ij} \varepsilon_{0ij} + B_{2ij} \varepsilon_{0ij}^2 + B_{3ij} \varepsilon_{0ij}^3, \quad t_{2ij} = B_{1ij} + 2B_{2ij} \varepsilon_{0ij} + 3B_{3ij} \varepsilon_{0ij}^2, \tag{3.11}$$

$$t_{3ij} = B_{2ij} + 3B_{3ij} \varepsilon_{0ij}, \quad t_{4ij} = B_{3ij}.$$

$$\begin{aligned}
 d_{1ij} &= k_{ij} H_{ij} - \frac{1}{2} (h_{ij}^2 - h_{ij}'^2) f_{ij}, \quad d_{2ij} = \frac{1}{2} (h_{ij}^2 - h_{ij}'^2) k_{ij} - \frac{1}{3} (h_{ij}^3 + h_{ij}'^3) f_{ij}, \\
 d_{3ij} &= \frac{1}{3} (h_{ij}^3 + h_{ij}'^3) k_{ij} - \frac{1}{4} (h_{ij}^4 - h_{ij}'^4) f_{ij}, \quad d_{4ij} = \frac{1}{4} (h_{ij}^4 - h_{ij}'^4) k_{ij} - \\
 &- \frac{1}{5} (h_{ij}^5 + h_{ij}'^5) f_{ij}, \quad d_{5ij} = \frac{1}{5} (h_{ij}^5 + h_{ij}'^5) k_{ij} - \frac{1}{6} (h_{ij}^6 - h_{ij}'^6) f_{ij}.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Предлагаемый подход является общим с точки зрения выбора топологических схем стропильных покрытий и материалов. В конечном итоге он сводится к необходимости решения систем нелинейных уравнений (3.3) или (3.10). Численные методы решения и расчеты конкретных примеров на их основе будут рассмотрены в сообщении 2 данной статьи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б о р о в и к о в, А.М. Справочник по древесине [Текст] / А.М. Боровиков, В.М. Уголов / под ред. Б.Н. Уголова. — М. : Лесн. пром-сть, 1989. — 296 с.
2. Н е м и р о в с к и й, Ю.В. Расчет и рациональное проектирование деревянных стержневых элементов [Текст] / Ю.В. Немировский // Современные проблемы совершенствования и развития конструкций в строительстве и транспорте : Сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. — Самара : Изд-во СамГАСУ, 2005. — С. 247–251.
3. Н е м и р о в с к и й, Ю.В. Метод расчета композитных стержневых систем из разномодульных материалов [Текст] / Ю.В. Немировский // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : Мат-лы V Всерос. науч. конф. (Томск, 3–5 октября, 2006 г.). — Томск : Изд-во ТГУ, 2006. — С. 288–290.
4. Б р о д с к и й, А.Д. Краткий справочник по математической обработке результатов измерений [Текст] / А.Д. Бродский, В.Л. Кан. — М. : Стандартгиз, 1960. — 167 с.

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

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

*БОЛТАЕВ Артем Иванович, студ.; E-mail: boltaev\_artem@.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 15.01.14

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

**Boltaev Artem Ivanovich**, student; E-mail: boltaev\_artem@.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## METHOD OF CALCULATION OF WOODEN RAFTER COVERINGS OF BUILDINGS

### Message 1. MODELLING AND GENERAL REGULARITIES

The general mathematical model of deformation of wooden rafter coverings of buildings is developed. It is supposed that rafter designs are collapsible with hinged connection of bars of trapezoid section in knots. Use in rafter coverings of various breeds of trees is generally allowed, nonlinear laws of deformation and property of the resilience of a tree essential differently to stretching and compression are considered.

**Key words:** rafter coverings, wooden designs, stretching, compression, limit deformations, strength, bars, deformation laws.

### REFERENCES

1. Б о р о в и к о в, А.М. Reference book on wood [Text] / А.М. Borovicov, V.M. Ugolev / under the editorship of B.N. Ugolev. — М. : Forest industry, 1989. — 296 p.
2. Н е м и р о в с к и й, Ю.В. Calculation and rational prektirovaniye of wooden rod elements [Text] / Yu.V. Nemirovsky // Modern problems of improvement and development of designs in construction and transport : the Collection of scientific works the III International scientific and technical conference. — Samara : Publishing house of SamGASU, 2005. — P. 247–251.
3. Н е м и р о в с к и й, Ю.В. Metod of calculation of composite rod systems from the raznomodulnykh of materials [Text] / Yu.V. Nemirovsky // Fundamental and applied problems of modern mechanics : Materials V of the All-Russian scientific conference (Tomsk, on October 3-5, 2006). — Tomsk : Publishing house TGU, 2006. — P. 288–290.
4. Б р о д с к и й, А.Д. Short reference book on mathematical processing of results of measurements [Text] / A.D. Brodsky, V.L. Kahn. — М. : Standartgiz, 1960. — 167 p.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.001

А.Н. ХАРХАРДИН, В.В. СТРОКОВА, Н.И. КОЖУХОВА

### ВЫВОД УРАВНЕНИЙ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КЛАСТЕРОВ, НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ\*

#### Часть 2\*\*

Описывается физическое состояние поверхностных слоев нано- и микрочастиц, а также дается вывод уравнений для расчета их критических размеров и математическое условие для размерного фактора.

Ключевые слова: дисперсные материалы, кластеры, нано- и микрочастицы, критический размер.

Независимо от способа получения и структуры наночастиц эффекты от их использования в химических и технологических процессах подают надежды на повышение качества сырьевых компонентов и строительных композитов при формировании их структуры [1]. Главный и основной вопрос в развивающейся науке о нанодисперсных объектах — это задачи о размерах, структуре и топологическом состоянии объемных и поверхностных слоев наночастиц, при которых проявляются их необычные свойства, отличающиеся от свойств массивного тела. Считается, что своеобразные их свойства связаны с относительно большой долей поверхностных атомов [2]. Известно, что в условиях образования более рыхлой упаковки атомов в поверхностных слоях, чем в ядре их скоплений или в кристаллической укладке, при охлаждении получают микро- и наночастицы обычно окружной формы с атомно-шероховатой поверхностью. В условиях переохлаждения расплава выгоднее становится кристаллическая форма. Плотность упаковки атомов в атомно-шероховатых слоях поверхности микро- и наночастиц может достигать критической величины для данного вещества.

Поскольку в критической точке исчезает различие фаз, то их удельная свободная поверхностная энергия и разность термодинамических (химических) потенциалов обращаются в нуль. При этом увеличение размера наночастиц приостанавливается. В результате взаимодействия атомов в наночастицах, начиная с глубинных слоев, действует принцип плотной упаковки. Продвижение фронта его действия зависит от условий получения (образования) наночастиц и размерного перехода от кулонов-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

\*\* См.: Хархардин А.Н., Строкова В.В., Кожухова Н.И. Принципы атомной упаковки кластеров и топологические состояния поверхностных слоев безлигандных нано- и микрочастиц. Часть 1 // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 2. С. 5–10.

ского к квантово-механическому взаимодействию. Если он перерастет барьер сферичности, то наступает рост микрокристаллов ограниченной формы. При этом чем меньше достигается плотность упаковки атомов по всему объему, тем меньше критический размер получаемых наночастиц вследствие пристеночного (размерного) фактора, который связан с относительным количеством и плотностью их упаковки в поверхностном слое.

Отличительные особенности микрочастиц объясняются различным распределением электронной плотности в поверхностном слое атомов по сравнению с объемными атомами, которое проявляется размерным эффектом. Размерный эффект обусловлен пристеночным фактором дискретных систем, который определяется различной плотностью упаковки и количеством атомов в поверхностном слое и в объемных слоях нано- и микрочастиц. Пристеночный фактор имеет место и на макроуровне: в зернистом слое и в агрегациях микрочастиц, в композиционных материалах с зернистым заполнителем и в других материалах с зернистой структурой. Критический размер микро- и наночастиц, получаемых ультразвуковым, сухим или мокрым механическими способами измельчения зернистых материалов и горных пород, определяется таким размером, при котором проявляется необычное изменение одного или комплекса их свойств по сравнению с массивным телом. По нашему мнению, необычные свойства малых частиц проявляются в интервале таких размеров, когда плотность упаковки элементов их дискретности в поверхностном слое становится заметно ниже, а количество их больше чем в удаленных к центру их объема. Известно, что с уменьшением размера частиц в процессе измельчения горных пород и материалов их удельная поверхность возрастает. С увеличением кривизны поверхности таких частиц, что обусловлено уменьшением их размера, относительное количество поверхностных атомов продуктов измельчения возрастает, а плотность их упаковки уменьшается, что связано с уменьшением координационного числа, ростом кулоновского отталкивания. К поверхностным элементам дискретности (атомы или частицы) относятся те, которые расположены в двух и более рыхлых поверхностных слоях кластеров, агрегаций микрочастиц либо в пристеночных слоях объема дисперсного или зернистого материала в сосуде. Так, по данным исследований [3] количество рыхлых поверхностных слоев с уменьшением размера аппарата с зернистым материалом возрастает до 3–4 слоев.

Для решения одной из важных задач микро- и нанодисперсных частиц воспользуемся простейшим аппаратом исследования пробуждающейся науки — дискретной топологии неупорядоченных конденсированных систем, поскольку объединяющим для них началом является дискретность изучаемых объектов. Дискретная топология неупорядоченных конденсированных систем, наделенных дискретностью на различном масштабном уровне, в своих исследованиях использует в основном две их характеристики — это плотность стохастической (случайной) упаковки элементов дискретности и их координационное число, определяющих топологическое состояние системы. Математический аппарат ее исследований основан на корпускулярно-топологических свойствах дискретных систем и состоит в основном из некоторых базовых закономерностей [4]. Основной из них является закономерность дискретного распределения

элементов дискретности (атомов, молекул, шаров, нано-, микро- или макрочастиц и пр.) по размерам при плотной случайной (произвольной) упаковке в системе [4]:

$$\frac{d_n}{d_1} = \left( \frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^p} \right)^{\frac{m}{3}(n-1)}. \quad (3)$$

Для произвольной (случайной) упаковки частиц ( $m = 3$ ) выражение (3) имеет вид

$$\frac{d_n}{d_1} = \left( \frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^3} \right)^n = \left( \frac{2,549}{10\eta_1} \right)^n = \left( \frac{0,2549}{\eta_1} \right)^n. \quad (4)$$

Из выражения (3) при  $m = 3$  и  $d_n/d_1 = 1$  можно получить уравнение для плотности случайных упаковок идентичных сферических частиц вида

$$\eta_1 = \frac{1}{10(\sqrt{3}-1)^p} = \frac{0,1}{(\sqrt{3}-1)^p}. \quad (5)$$

Из этого выражения при  $p = 3$ ,  $p = 0$  и  $p = 6$  получим соответственно первую  $\eta_{c1} = 0,2549$ , вторую  $\eta_{c2} = 0,1$  критические плотности упаковки элементов дискретности вещества и наибольшую — теоретическую плотность случайной их упаковки  $\eta_1 = 0,64976$ .

Из закономерности (3) вытекает уравнение для размерного (пристеночного) фактора дискретных систем из отношения размера наибольших пустот при  $m = 3$ ,  $n = 2$  в случайной ( $p = 3$ ) упаковке к размеру ( $m = 12$ ) частиц (шариков), наиболее плотно заполняющих эти пустоты, т.е. свободный в ней объем:

$$D \leq \left( \frac{10\eta_1}{2,549} \right)^3 \leq \left( \frac{\eta_1}{\eta_{c1}} \right)^3 \leq \left( \frac{\eta_1}{0,2549} \right)^3 \leq (3,923\eta_1)^3 \leq 60,377\eta_1^3 d. \quad (6)$$

Это выражение вытекает из закономерности (3, 4) в обратной ее зависимости, где  $D = d_1$ ,  $d = d_n$ , а  $n = 3$ :

$$D = [10\eta_1(\sqrt{3}-1)^3]^3 \cdot d = (3,923\eta_1)^3 d = 60,377\eta_1^3 d,$$

где  $D$ ,  $d$  — критический размер атомных агрегаций (кластеров, нано- и микрочастиц), агрегаций частиц дисперсных материалов и соответственно диаметр атомов в кластерах, в нано- или микрочастицах — для простых веществ и наибольший линейный размер элементарной кристаллической ячейки — для сложных веществ.

Результаты вычисления по формуле (6) критического радиуса микрочастиц в зависимости от плотности упаковки в них атомов металлов приведены в табл. 1.

Подтверждением достоверности формулы (6) является хорошее соответствие получаемых по ней критических размеров микрочастиц с экспериментальными данными. Так, согласно экспериментальным результатам С.Л. Чижика и др. [5], радиус критических микрочастиц первых четырех элементов, получаемых из металлических расплавов, находится в пределах 20...30 Å. В эти пределы хорошо укладываются результаты

*Вывод уравнений для критических размеров кластеров, нано- и микрочастиц*

Таблица 1. Размер наночастиц, получаемых из жидкой и кристаллической фазы металлов

Плотность упаковки атомов в микрочастицах, $\eta$	Радиус микрочастиц, Å (0,1 нм)					
	Zn	Pb	Sn	Au	Hg	Fe
	Радиус атома, Å (0,1 нм)					
	1,39	1,75	1,58	1,44	1,57	1,26
Кристаллическая фаза						
$\eta = 0,7405$	34,1	42,9	38,7	35,3	38,5	30,9
0,70323	29,2	36,7	33,2	30,2	33,0	26,5
0,68527	27,0	34,0	30,7	28,0	30,5	24,5
Жидкая фаза						
0,6370	21,7	27,3	24,7	22,5	24,5	19,7
0,63347	21,3	26,8	24,3	22,1	24,1	19,3
0,62634	20,6	26,0	23,4	21,4	33,3	18,7
0,60830	18,9	23,8	21,5	19,5	21,3	17,1
0,54100	13,3	16,7	15,1	13,8	15,0	12,0
0,49277	10,0	12,6	11,4	10,4	11,3	9,10
0,43406	6,96	8,76	7,91	7,21	7,86	6,31
0,4098	5,77	7,27	6,56	5,98	6,52	5,24
0,4040	5,53	6,97	6,29	5,73	6,25	5,01

(см. табл. 1) расчетов по формуле (6) для твердой кристаллической и жидкой фазы металлов.

Согласно выражению (6), критический размер микрочастиц и число атомов в образуемой агрегации из жидкой фазы зависит от плотности упаковки в них атомов. Критический размер диспергированных частиц из твердой и жидкой фазы является не просто формальным геометрическим параметром. Так, согласно С.Л. Чижику [5], с уменьшением размера металлических микрочастиц, полученных из расплавов, исчезает объемный эффект переохлаждения, становится равной нулю скрытая теплота. При критическом диаметре микрочастиц исчезает различие между жидким и кристаллическим состоянием, фазовый переход первого рода становится непрерывным. Величина критического радиуса частицы соответствует размеру в области ближнего порядка в жидкой фазе. Следовательно, замороженные флуктуации плотности в жидкости при быстром охлаждении являются в некоторой степени зародышами микрочастиц и кристаллической микрофазы. Если размер диспергированной из расплава металлической микрочастицы предельно мал, то в объеме ее укладывается плотная флуктуационная зона. В зависимости от размера микрочастиц, охлажденных из жидкой металлической фазы, в них может формироваться структура от рыхлой аморфной вплоть до кристаллической.

Так как первая критическая плотность произвольной упаковки частиц дисперсных материалов —  $\eta_{c1} = \eta_1^{(9...10,5)/3}$ , где  $\eta_1 \leq 0,6403...0,64976$  систематической (регулярной) укладки элементов дискретности вещества —  $\eta_{c1} = \eta_1^{(11...15)/3}$  [4], где  $\eta_1 = 0,6802...0,6981...0,7405$ , то выражение

для размерного интервала и среднего критического размера ( $n = 9 \dots 15$ ) кластеров и наночастиц сферической формы будет иметь вид

$$D = 60,38\eta_1^{n/3}d, \quad (7)$$

$$n = (0-3-6)-\mathbf{9} \dots \mathbf{12} \dots \mathbf{15},$$

$n = 9-10,5$  при  $0,60377 \leq \eta_1 \leq 0,64976$  — для критических размеров частиц дисперсных материалов.

Для критических размеров нано- или микрочастиц кристаллических веществ с различной кристаллической решеткой соответственно:

$$n = 10,5-11,5 \text{ при } 0,64976 \leq \eta_1 \leq 0,6802 \text{ — объемно центрированной,}$$

$$n = 11,5-12 \text{ при } 0,6802 \leq \eta_1 \leq 0,68834 \text{ — икосаэдрической,}$$

$$n = 12-12,4 \text{ при } 0,68834 \leq \eta_1 \leq 0,6981 \text{ — тригональной,}$$

$n = 12,4-15$  при  $0,6981 \leq \eta_1 \leq 0,7405$  — гексагональной плотно упакованной (ГПУ) и гранецентрированной кубической (ГЦК) решеток.

Критические размеры растущих сферических образований ( $n \geq 0$ ), в том числе и кристаллов ограниченной формы, в интервале сферичности и возможной перестройки структуры к различной их форме ( $0 \leq n \leq 16$ ), получим из выражения (6) в общем виде:

$$D = 60,38^{n/3}\eta_1^n d = (60,38^{1/3}\eta_1)^n d = (3,923\eta_1)^n d, \quad (8)$$

$$\text{где } n = (0, 1, 2, \mathbf{3})-\mathbf{6}-\mathbf{9}-\mathbf{12}-\mathbf{15} \dots$$

В табл. 2 приведены результаты расчета по уравнениям (6-8), где  $\eta_s \approx \eta_1^{1/9}$ , среднего и минимального критического размера сферических наночастиц в интервале возможной перестройки структуры и проявления их необычных свойств по сравнению с массивным телом. Приведены также размеры растущих кристаллических образований (6) в зависимости

**Таблица 2. Размеры растущих кристаллов и критический размер микрочастиц в интервале проявления их необычных свойств**

Показатель степеней, $n \dots n$	Размер микро- и наночастиц $D \times d$ с плотностью упаковки в них элементов структуры, $\eta_1$				
	0,7405 (7)	при $d = 0,3 \text{ нм}$	0,7405 (8)	0,6883 (7)	0,6403 (7)
1	2	3	4	5	6
0	<b>60-62</b>	<b>18-19 нм</b>	<b>1,0-1,1</b>	<b>60-63</b>	<b>60,4-63,0</b>
3...1	45-46	13-14 нм	2,9-3,0	42-43	38,6-40
6...2	33-34	9,9-10 нм	8,4-8,7	28,6-29,8	24,8-26
<b>9...3</b>	<b>24,5-25</b>	<b>7,4-7,5 нм</b>	<b>24,5-25,0</b>	<b>19,7-20,5</b>	<b>13,7-14,4**</b>
<b>12...4</b>	18-19	5,4-5,7 нм	71-73	<b>13,6-14,2</b>	10,0-10,5
<b>15...5</b>	<b>13-14(12,6)*</b>	<b>4,0-4,2 нм</b>	206-213	9,3-9,7	6,5-6,8
18...6	9,9-10	<b>3,0-3,1 нм</b>	601-621	6,4-6,7	4,0-4,2
21...7	7,4-7,6	<b>2,2-2,2 нм</b>	1745-1804	4,4-4,6	2,7-2,8
24...8	5,5-5,7	<b>1,6-1,7 нм</b>	5071-5243	3,0-3,1	1,7-1,8
<b>27...9</b>	4,0-4,2	<b>1,2-1,3 нм</b>	Рост	2,1-2,2	1,1-1,15
30...10	3,0-3,1	<b>0,9-0,93 нм</b>	Рост	1,4-1,5	—

\* При  $n = 16/3$ .

\*\* При  $n = 10/3$ .

от плотности упаковки в них элементов дискретности (атомов металлов и других простых веществ), размерный интервал и средний критический размер сферических наночастиц с икосаэдрической упаковкой ( $\eta_1 = 0,68834$ ) атомов при отсутствии центрального атома. Из табл. 2 и уравнения (7) следует, что наибольший размер наночастиц, при котором начинают проявляться их необычные свойства, соответствует значению  $n \geq 0$ , при  $n = 0$  он будет равен  $D = 60\text{--}63 d$ . Например, при  $d = 0,3$  нм (для металлов) получим  $D = 18\text{--}19$  нм, а при  $\eta_1 = 0,7405$  и  $n = 9; 15$  получим  $D = 7,5; 4$  нм.

Из табл. 2 также следует, что средний критический размер кристаллических наночастиц находится в пределах 7,5–19 нм, а минимальный, при котором проявляются необычные изменения физических свойств наночастиц, — 4,2 нм. Для микрочастиц дисперсных материалов при  $\eta_1 = 0,6403$  он равен соответственно  $13,7 d$ , а наибольшие средние их размеры —  $(60\text{--}63) d$ . Критические размеры наночастиц простых веществ (металлов) в табл. 2 выделены жирным шрифтом.

Для перестройки формы растущих сферических кристаллов в ограниченную форму при подходящих термодинамических условиях минимальный критический размер простых веществ равен  $(13\text{--}14) d$ , средний критический размер равен  $25 d$ , а наибольший  $(60\text{--}62) d$ .

Так как размер мономера силикатного иона кремнезема (тетраэдра)  $d = 0,324$  нм, то размер наночастиц свежеприготовленного золя, если  $\eta_c \leq 0,7405^{3\text{--}5}$ , будет равен  $8,1\text{--}4,5$  нм. Опыт показывает, что наночастицы кремнезема и других горных пород с минимальным критическим размером  $8,1\text{--}4,5$  нм в водной щелочной среде легко образуют гели. Размер устойчивых его агрегаций при  $d = 8,1$  нм равен:

$$D_1 \leq 60,377 \eta_1^{3\text{--}10/3} / \eta_1^{1/9} \cdot 8,1 \text{ нм} = 205\text{--}186 \text{ нм}.$$

Критический размер наночастиц кварца, имеющего размеры кристаллической решетки  $a = 0,49$  нм,  $b = 0,49$  нм и  $c = 0,54$  нм и  $\eta_1 \approx 0,76$ , равен:

$$D = 60,377 \cdot 0,76^{5\text{--}16/3} \cdot 0,54 \text{ нм} / 0,76^{1/9} = 8,5\text{--}7,8 \text{ нм}.$$

Подставляя в выражение (6) известные величины плотности систематических (регулярных) укладок атомов простых веществ и случайных (произвольных) упаковок сферических частиц с учетом плотности их упаковки в поверхности поперечного сечения кристаллических образований, с заполненными впадинами атомами верхних и нижних их слоев в виде усеченных шаровых сегментов —  $\eta_s^{1/3} \approx \eta_1^{1/9}$ , для различных упаковок, получим:

$$D \leq (3,923 \eta_1)^n d / \eta_1^{1/9}, \quad (9)$$

для плотнейших:

$$\eta_1 \leq 0,74048, \quad D \leq 3^n d, \quad (10)$$

для икосаэдрической:

$$\eta_1 \leq 0,74048, \quad D \leq 2,905^n d / \eta_s^{1/3}, \quad (11)$$

$$\eta_1 \leq 0,68834, \quad D \leq 2,7^n d / \eta_s^{3/4} \leq 2,7^n d / 0,9069^{3/4} \leq 2,9^n d, \quad (12)$$

для случайной (произвольной):

$$\eta_l \leq 0,64976, D \leq 2,549^n d / \eta_s^{1/3}, \quad (13)$$

$$\eta_l \leq 0,64029, D \leq 2,512^n d / \eta_s^{1/3}, \quad (14)$$

$$\eta_l \leq 0,63716, D \leq 2,50^n d / \eta_s^{1/3}, \quad (15)$$

$$\eta_l \leq 0,63405, D \leq 2,49^n d / \eta_s^{1/3}, \quad (16)$$

где  $\eta_s^{1/3} = (\pi / 2\sqrt{3})^{1/3} = 0,9069^{1/3} \approx 0,968$ ,  $\eta_s^{1/3} \approx \eta_l^{1/9} = 0,74048^{1/9} \approx 0,9672$ .

Из выражений (11, 12) при  $n = 1$ ,  $\eta_s^{1/3} = 1$  и  $\eta_s^{3/4} = 0,9293$  соответственно следует, что икосаэдрическая атомная агрегация (кластер) состоит из одного поверхностного слоя атомов. При отсутствии центрального атома размер центральной поры равен  $0,9 d$ , что соответствует размеру центральной поры в икосаэдрической упаковке атомов, контактирующих между собой. Так закладываются вакансии в кристаллах и потенциальная возможность роста сферических агрегаций. При наличии центрального атома в однослоином икосаэдрическом кластере все 12 поверхностных атомов разъединены между собою на равные расстояния, а образуемые большие впадины на поверхности кластера заполняются одиночными атомами, что способствует его росту.

Выражение для размерного интервала и среднего критического размера ( $n = 9...12...15\dots$ ) / 3 растущих ( $n = \infty\dots 0$ ) кластеров и наночастиц сферической формы из уравнения (6) получим:

$$D = 60,377 \eta_l^{n/3} d / \eta_l^{1/9}. \quad (17)$$

Обе части выражений (4) с учетом  $\eta_s$  и (17) возведем в куб и умножим на  $\pi / 6$ . После их преобразования получим критическое число элементов дискретности вещества для соответствующих их упаковок:

$$N \leq (3,923 \eta_l)^m / \eta_l^{1/3}, \quad (18)$$

$$N = 60,38 \eta_l^n / \eta_l^{1/3}. \quad (19)$$

Полученные выражения (18, 19) дают число элементов дискретности в сферических агрегациях и не определяют их число в координационных многогранниках — в кубооктаэдрах и икосаэдрах, а уравнения (9, 17) позволяют с достаточной точностью определить критические размеры кластеров и наночастиц в интервале проявления их необычных свойств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строкова, В.В. Анализ органо-минеральных композитов с учетом генезиса и размерных уровней минерального сырья [Текст] / В.В. Строкова, И.В. Жерновский, А.О. Лютенко // Вестн. БГТУ. — 2009. — № 4. — С. 28–32.
2. Уэллс, А. Структурная неорганическая химия [Текст] / А. Уэллс; пер. с англ. Ю.И. Петрова. — Т. 1. — М. : Мир, 1987. — С. 172–178.
3. Аэроп, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэроп, О.М. Тодес. — Л. : Химия, 1968. — С. 32–36.
4. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных материалов: учеб. пособие [Текст] / А.Н. Хархардин. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. — 288 с.

5. Чижик, С.Л. Размерные явления при фазовом переходе жидкость — кристалл [Текст] / С.Л. Чижик // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1985. — Т. 88, вып. 5. — С. 1706–1717.

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

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*  
**СТРОКОВА Валерия Валерьевна, д-р техн. наук, проф.**

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*  
**КОЖУХОВА Наталья Ивановна, ст. инж.**

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

Получено 16.01.14

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

**Strokoval Valeria Valerievna**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Kozhuhova Natalya Ivanovna**, principal engineer, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **DERIVATION OF EQUATIONS FOR CRITICAL SIZES FOR CLUSTERS OF NANO- AND MICROPARTICLES**

### **Part 2**

Taking into account the terms of demonstration of size factor of discrete systems in bulk of substance the equations for calculation of critical sizes of clusters, as well as nano- and microparticles are obtained whereby the appearance of their unique physical properties and growing of spherical and cut crystal is possible.

**Key words:** dispersed materials, clusters, nano- and microparticles, critical size.

### **REFERENCES**

1. Strokova, V.V. Analysis of organic-mineral composites taking into account genesis and size levels of mineral raw [Text] / V.V. Strokova, I.V. Zhernovsky, A.O. Lyutenko // Bulletin of BSTU. — 2009. — N 4. — P. 28–32.
2. Wels, A. Structural non-organic chemistry [Text] / A. Wels; translated from English by Yu.I. Petrov. — Vol. 1. — M. : Mir, 1987. — P. 172–178.
3. Aerov, M.E. Hydraulic and thermal basis of function of device with statical fluidized granular bed [Text] / M.E. Aerov, O.M. Todes. — L. : Chemistry, 1968. — P. 32–36.
4. Kharkhardin, A.N. Structural topology of dispersed materials: textbook [Text] / A.N. Kharkhardin. — Belgorod : BSTU, 2011. — 288 p.
5. Chizhik, S.L. Size phenomenon at phase transformation «liquid — crystal» [Text] / S.L. Chizhik // Journal of experimental and theoretic physic. — 1985. — Vol. 88, N 5. — P. 1706–1717.

**УДК 666.97.035.5**

**Ш.М. РАХИМБАЕВ, А.В. ПОЛОВНЕВА**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА**

Работа посвящена вопросу возможности снижения энергозатрат на тепловлажностную обработку бетонных и железобетонных изделий. Изучено влияние гипса на свойства цементного бетона, твердевшего в камере ТВО, при 40 и 80 °C, а также в нормальных условиях. Даны рекомендации о продолжительности тепловлажностной обработки в зависимости от температуры теплоносителя. Полученные данные являются теоретическим обоснованием снижения температуры тепловлажностной обработки с 80 до 40 °C.

**Ключевые слова:** тепловлажностная обработка цементных бетонов, влияние гипса, цементный камень, мелкозернистый бетон.

Одним из перспективных способов повышения энергоэффективности производства изделий и конструкций сборного бетона и железобетона является снижение температуры пропарки изделий. Для этого следует в первую очередь сокращать длительность тепловой обработки, сочетая ее с другими методами ускорения твердения. К ним относятся использование быстротвердеющих высокомарочных цементов, умеренно жестких и жестких бетонных смесей, а также пластифицирующих добавок и ускорителей твердения бетона. В работах [1–3] подробно изучен механизм действия добавок — ускорителей твердения бетонов. В последние годы практикуется обработка изделий теплоносителями с температурой 40 °C, что значительно ниже, чем это практикуется в РФ (80 °C). Однако научного обоснования такого применения (40 °C) не имеется. Данная статья посвящена этому вопросу.

В работе [4] изучено влияние содержания гипса в цементе на эффективность тепловой обработки при исследовании нескольких цементных клинкеров цементного завода «Комсомолец» с содержанием  $C_3A = 2,9\%$  и высокоалюминиатного цемента Таузского завода с содержанием  $C_3A = 17,1\%$ . Помол клинкеров осуществлялся в шаровой мельнице до удельной поверхности  $400 \text{ m}^2/\text{г}$ . В процессе помола в клинкер вводилось 4 % высокопрочного полуводного гипса. Для оптимизации дозировки гипса в цемент перед затворением вводилось дополнительное его количество. Часть бетонных образцов после формования подвергалась пропариванию при 80 °C в течение 17 ч, в том числе 3 ч — на подъем температуры. На рис. 1, 2 приведены графики зависимости прочности бетонных образцов от содержания гипса.

В работе [4] установлено, что эффективность тепловой обработки бетона на алитово-алюмоферритовом цементе завода «Комсомолец» при добавке 4 % гипса значительно выше, чем на высокоалюминиатном цементе Таузского завода. Однако с повышением содержания гипса в последнем эффективность пропаривания возрастает.

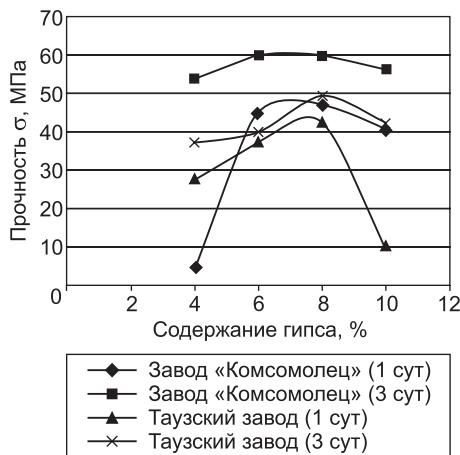


Рис. 1. График зависимости прочности  $\sigma$ , МПа, от содержания гипса, %, твердевшего в нормальных условиях

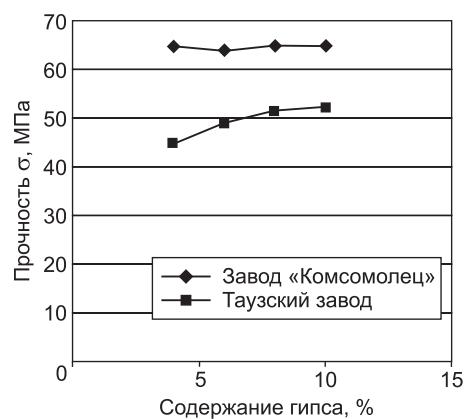


Рис. 2. График зависимости прочности  $\sigma$ , МПа, от содержания гипса, %, твердевшего в камере ТВО при 80 °C

Анализ графика рис. 1 показывает, что в образцах, твердевших в нормальных условиях, содержание гипса очень сильно влияет на прочность через 1 сут, а через 3 сут — слабо. Оптимальная дозировка гипса для образцов, твердевших в нормальных условиях, лежит в интервале 6–8 %, что соответствует общепринятым нормативам, приближая его к верхнему значению.

При этом влияние гипса на твердение образцов из алюминиатного цемента Таузского завода больше, чем из малоалюминиатного цемента завода «Комсомолец».

При ТВО изделий с температурой изотермической выдержки 80 °C количество вводимого гипса не оказывает значительного влияния на прочность образцов. Для высокоалюминиатного цемента Таузского завода прочность камня плавно растет по мере роста содержания гипса.

Прочность камня из цемента завода «Комсомолец» выше, чем Таузского, оптимальное содержание гипса равно 6–8 %.

Вопрос о поведении цемента с различным содержанием гипса в различных условиях твердения остается не до конца изученным, поэтому нами было исследовано влияние гипса на прочность мелкозернистого бетона. Образцы твердели в пропарочной камере при температуре изотермической выдержки 40 и 80 °C, режимы твердения 3+2+4+3, 3+2+6+3, 3+2+8+3. В работе был использован клинкер Белгородского цементного завода. Минеральный состав клинкера приведен в таблице.

Помол клинкера производился в вибрационной мельнице до удельной поверхности 3200 см<sup>2</sup>/г. В процессе помола в клинкер вводилось 3, 5, 8 % гипса. В качестве заполнителя применялся песок Курского месторождения

#### Минеральный состав клинкера

Клинкер	Содержание главных оксидов, %					Содержание основных минералов, %			
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Белгородский завод	66,52	21,35	5,54	0,188	3,62	66,75	11,35	8,54	11,01

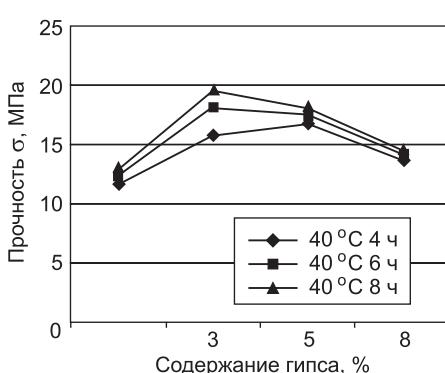


Рис. 3. График зависимости предела прочности на сжатие  $\sigma$ , МПа, 3-суточного мелкозернистого бетона от содержания гипса, %, подвергшегося ТВО при температуре 40 °C

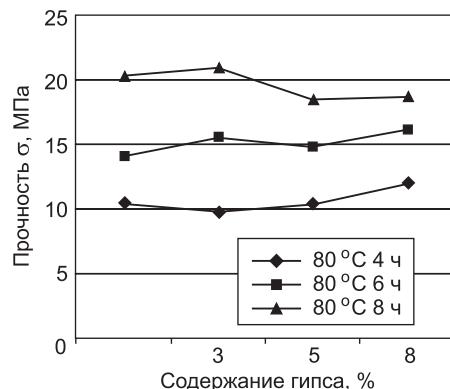


Рис. 4. График зависимости предела прочности на сжатие  $\sigma$ , МПа, 3-суточного мелкозернистого бетона от содержания гипса, %, подвергшегося ТВО при температуре 80 °C

с модулем крупности 1,6 мм. Состав бетона 1:3 (по массе),  $B/I = 0,46$ , осадка конуса составила 106 мм. После формования бетонные образцы подвергались тепловлажностной обработке при 40 и 80 °C, с различной продолжительностью изотермической выдержки 4, 6, 8 ч. Образцы испытывались на третий сутки. Результаты испытаний приведены на рис. 3, 4.

Из графиков видно, что содержание гипса оказывает влияние на прочность образцов, твердевших при температуре 40 °C. Наибольшая прочность наблюдается у образцов, содержащих 3–5 % гипса, что совпадает с общепринятым оптимальным содержанием гипса 3–5 %.

Видно, что при температуре тепловой обработки 80 °C прочность образцов незначительно зависит от содержания гипса. Можно сказать, что при высокотемпературной обработке гипс не оказывает влияния на прочность изделий.

На графиках рис. 5, 6 показана зависимость прочности образцов от длительности ТВО. Из графика рис. 5 видно, что длительность тепловой

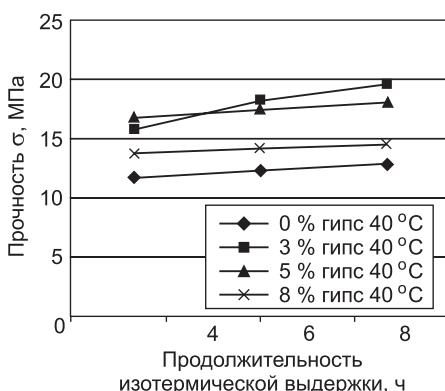


Рис. 5. График зависимости предела прочности на сжатие  $\sigma$ , МПа, 3-суточного мелкозернистого бетона от длительности тепловой обработки при температуре 40 °C

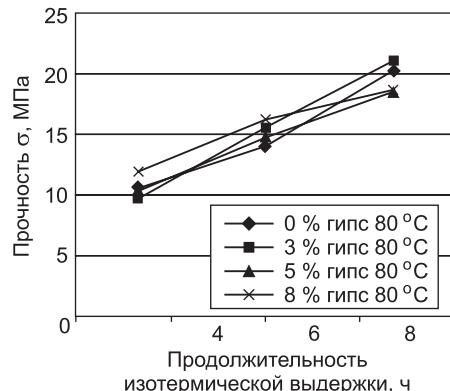


Рис. 6. График зависимости предела прочности на сжатие  $\sigma$ , МПа, 3-суточного мелкозернистого бетона от длительности тепловой обработки при температуре 80 °C

обработки мало отражается на прочности изделий. Увеличение длительности ТВО от 4 и до 8 ч незначительно влияет на прочность, особенно у образцов с содержанием гипса 0 и 8 %. При оптимальном содержании гипса 3,5 % прочность максимальна. Следовательно, можно сделать вывод, что при температуре 40 °С большая длительность пропарки малоэффективна, особенно при содержании гипса 0 и 8 %.

При тепловой обработке с температурой теплоносителя 80 °С в течение 8 ч рост прочности происходит почти линейно. Исключением является состав с 8 % гипса, у которого после 6 ч идет замедление скорости твердения. Наибольшая прочность после 8-часовой тепловой обработки при 80 °С наблюдается у образца, содержащего 3 % гипса.

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что данные по твердению цементного камня, полученные нами, согласуются с результатами исследований С.А. Миронова.

Прочность образцов, твердевших в нормальных условиях и после тепловлажностной обработки с температурой теплоносителя 40 °С, зависит от содержания гипса. Для образцов, твердевших в нормальных условиях, оптимум гипса лежит в пределах 6–8 %, для образцов, твердевших в камере ТВО при температуре 40 °С, 3–5 %.

При тепловлажностной обработке с температурой теплоносителя 40 °С нецелесообразно применять длительные режимы пропарки.

При высокотемпературной тепловлажностной обработке с температурой теплоносителя 80 °С содержание гипса мало влияет на прочность образцов.

Использовать длительные режимы пропарки целесообразно, когда температура теплоносителя в пропарочной камере достигает 80 °С.

Причина того, что гипс сильнее влияет на прочность камня, пропаренного при 80 °С, в сравнении с 40 °С, заключается в том, что эттринит, который является одним из первичных продуктов гидратации в цементных системах, при 80 °С разлагается, а при 40 °С он устойчив.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердов, Г.И. Взаимодействие алюминатных клинкерных минералов с водными растворами электролитов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 9. — С. 13–19.
2. Рахимбаев, Ш.М. О механизме действия ускорителей схватывания и твердения цементной матрицы бетона [Текст] / Ш.М. Рахимбаев, А.А. Сердюкова // Вестн. БГТУ. — 2013. — № 2. — С. 26–28.
3. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст] / Ю.М. Баженов. — М. : Изд-во АВС, 2003. — 500 с.
4. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования [Текст] / С.А. Миронов. — М. : Стройиздат, 1975. — 692 с.

*РАХИМБАЕВ Шарк Матрасулович, д-р техн. наук, проф.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ПОЛОВНЕВА Анастасия Валерьевна, асп.; E-mail: Polovnev4ik@yandex.ru  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 27.01.14

**Rakhimbaev Shark Matrasulovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Polovneva Anastasiya Valerievna**, post-graduate student; E-mail: Polovnev4ik@yandex.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **THEORETICAL JUSTIFICATION OF POWER EFFECTIVE THERMAL TREATMENT OF CONCRETE**

Work is devoted to a question of energy consumption decrease possibility for heat moist processing of concrete and ferroconcrete products. Influence of gypsum on properties of the cement concrete hardening in curing chamber is studied, at 40 and 80 °C, and also in normal conditions Recommendations about duration of heat moist processing depending on heat transfer agent temperature are made. This data is theoretical justification of decrease in temperature of heat moist processing with 80 to 40 °C.

**Key words:** heat moist processing of cement concrete, gypsum influence, cement stone, fine-grained concrete.

### **REFERENCES**

1. Berdov, G.I. Interaction aluminate clinker minerals with aqueous solutions of electrolytes [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 9. — P. 13–19.
  2. Rakhimbaev, Sh.M. Mechanism of action of accelerators and curing the cement matrix concrete [Text] / Sh.M. Rakhimbaev, A.A. Serdyukova // Vestnik BSTU. — 2013. — N 2. — P. 26–28.
  3. Bazhenov, Yu.M. Concrete technology [Text] / Yu.M. Bazhenov. — M. : Publishing house AVS, 2003. — 500 p.
  4. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting [Text] / S.A. Mironov. — M. : Stroyizdat, 1975. — 692 p.
-

**УДК 691.316**

**А.Н. ВОЛОДЧЕНКО, В.С. ЛЕСОВИК**

**СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ  
КАК ФАКТОР ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ  
«ЧЕЛОВЕК — МАТЕРИАЛ — СРЕДА ОБИТАНИЯ»**

Установлено, что в качестве энергосберегающего сырья для производства автоклавных силикатных материалов можно использовать отложения начальной стадии процессов глинообразования, которые состоят из метастабильных минералов несовершенной структуры нанодисперсного уровня, тонкодисперсного кварца и аморфных минералов, что позволит улучшить физико-механические свойства автоклавных силикатных материалов. С использованием изучаемого сырья можно получать эффективные окрашенные высокопустотные силикатные кирпичи и камни, а также ячеистые бетоны, использование которых в строительстве позволит повысить комфортность проживания человека.

**Ключевые слова:** комфортная среда проживания, песчано-глинистые породы, автоклавные силикатные материалы.

Важная и значимая задача в современных условиях — создание для человека наиболее благоприятной и комфортной среды обитания. Триада «человек — материал — среда обитания» — сложная система, для исследования которой необходимо привлечение ученых различных специальностей. В XXI в. это направление является наиболее важным [1, 2]. В соответствии с Государственной программой Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» стратегической целью государственной политики в жилищной и жилищно-коммунальной сферах на период до 2020 г. должно быть создание комфортной среды обитания и жизнедеятельности для человека, которая позволит не только удовлетворять жилищные потребности, но и обеспечить высокое качество жизни в целом.

Федеральное законодательство рассматривает комфортную среду проживания с точки зрения вопросов безопасности, включающих в себя основные параметры санитарного благополучия, противопожарной безопасности, определяются основные минимальные показатели на человека. Термин «комфорт» рассматривается как «совокупность бытовых удобств: благоустроенность и уют жилищ, общественных учреждений, средств со-общения и пр.».

Для создания комфортной среды помимо таких макромеханизмов, как власть, экономика и социум, необходимо взаимодействие целого комплекса наук, начиная со строительного материаловедения, медицины, архитектуры и т.д., т.е. необходим трансдисциплинарный подход. Система «человек — материал — среда обитания» весьма сложная и открытая, исследование ее возможно с использованием трансдисциплинарной науки — геоники. Трансдисциплинарные исследования основываются на широкомасштабном использовании и переносе знаний, закономерностей, познава-

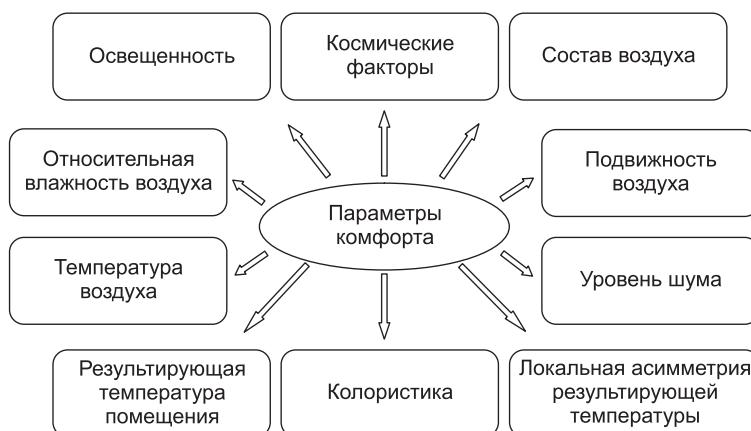
тельных схем из одних дисциплин в другие с получением эмерджентных свойств — свойствами не обладают отдельные звенья (дисциплины), но они являются следствием эффекта целостности системы.

Именно создание благоприятной для жизни человека пространственной среды должно являться целью градостроительной, архитектурной и строительной деятельности. Для создания эстетики проживания необходимы качественные архитектурные решения, такие как ландшафтный дизайн, малые архитектурные формы, организация дворовой территории, организация освещения, ограждения и т.д. Определяющее влияние на формирование лица города оказывают индивидуальность квартальной застройки и облик жилых домов.

В результате изменений в природной среде, возникших в последние годы, появилось много исследований по изучению состояния окружающей среды и его влиянию на состояние здоровья людей. Однако городской житель проводит большую часть времени в помещениях и экологический комфорт в них является более важным для здоровья человека. Зачастую концентрация загрязняющих веществ внутри помещений оказывается больше, чем в наружном воздухе. В связи с этим необходима новая парадигма проектирования и производства эффективных строительных композитов, обеспечивающих комфортные условия проживания, работоспособность и здоровье человека.

В понятие «комфорт» входят такие основные составляющие, как параметры микроклимата, уровень шума, освещенности и т.д. (рис. 1). Эти параметры для жилых и общественных зданий определены в ряде нормативных документов. Необходимо отметить, что при потере хотя бы одного из основных параметров можно потерять 100 % комфорта.

Вопросы экологичности производства строительных материалов и безопасность самих материалов сегодня приобретают все большее значение. Материалы, используемые в строительстве, не должны выделять токсичных веществ, уровень радиоактивного излучения и вред окружающей среде в процессе производства должен быть минимальным. Этим критериям более всего соответствуют природные материалы, к которым, прежде всего, относятся дерево и камень, а также материалы, изготовленные на основе природного сырья, — бетон, кирпич, стекло и др. Такая продукция обладает высоким качеством и безопасна для здоровья человека.



*Рис. 1. Основные параметры комфортного проживания*

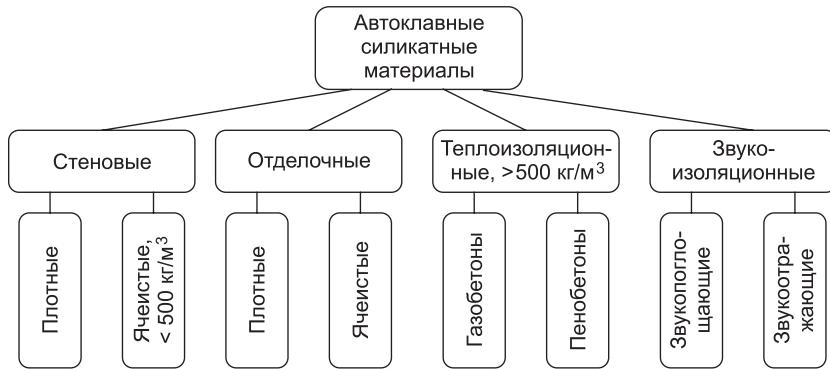


Рис. 2. Классификация автоклавных силикатных материалов

Одними из наиболее экономичных и распространенных в стране стеновых материалов являются автоклавные силикатные материалы (рис. 2).

Сырьем для их производства служат экологически чистые материалы: минеральное вяжущее, кремнеземистый компонент, гипс и вода. В качестве вяжущего используются портландцемент и молотая известь. Возможна замена извести и портландцемента молотыми шлаками (металлургическими, топливными и др.). В процессе автоклавной обработки при температуре 174–180 °С органические примеси, случайно попавшие в сырьевую смесь, выгорают и улетучиваются. Поэтому такие изделия не выделяют вредных компонентов в период эксплуатации при различных внутренних и внешних воздействиях.

Автоклавные материалы и изделия могут иметь как плотную, так и ячеистую структуру. К материалам плотной структуры относят плиты из тяжелого силикатного бетона, стеновые панели и перекрытия, крупные силикатные блоки, а также наиболее распространенный стеновой материал — силикатный кирпич. Силикатный кирпич выпускают полнотелым или облегченным с полузамкнутыми пустотами. Себестоимость производства силикатного кирпича примерно на 25–35 % ниже глиняного.

Достоинства ячеистых бетонов — низкая средняя плотность, низкая теплопроводность, относительно высокая прочность и морозостойкость. Для ячеистого бетона характерна повышенная паропроницаемость, что позволяет материалу выводить избыточную влагу из внутреннего пространства здания, благодаря чему в газобетонной стене удается избежать появления плесени и грибка. Необходимо отметить, что автоклавный газобетон, имеющий в своем объеме всего 15–25 % твердой минеральной структуры, содержит значительно меньше радионуклидов в сравнении с более плотными изделиями. Все это позволяет по своим санитарно-гигиеническим свойствам поставить газобетон на второе место после дерева.

Автоклавные силикатные материалы являются негорючим материалом и могут применяться для всех классов противопожарной безопасности. За счет низкой теплопроводности скорость потери прочности при нагревании существенно замедляется, что позволяет использовать газобетон для защиты строительных конструкций от действий огня.

По экономической эффективности при использовании в строительстве несущих стен жилых зданий газобетонные блоки превосходят такие материалы, как пустотелый кирпич, керамзитобетон, пенобетон и дерево.

Таким образом, благодаря своим физико-механическим и эксплуатационным свойствам, а также экологической безопасности автоклавные силикатные материалы являются конкурентоспособными в условиях рыночной экономики по сравнению с аналогичными по назначению материалами.

В качестве кремнеземистого компонента используется кварцевый песок. Однако запасы этого сырья ограничены, а в ряде регионов вообще отсутствуют. Анализ данных по исследованию сырьевой базы материалов автоклавного твердения позволил теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность использования вместо песка глинистых пород незавершенной фазы процессов глинообразования. Подобные глинистые породы широко распространены, а также в больших количествах попутно извлекаются при добыче рудных полезных ископаемых. Это сырье, обладающее свойствами природных наноразмерных частиц, позволяет управлять синтезом новообразований для получения материалов с заданными свойствами [1].

Глинистые породы как строительный материал применяются с древних времен. Глина обладает низкой теплопроводностью и выгодно отличается тем, что в помещениях даже в жару сохраняется комфортная температура. Кроме этого дома из глины экологически безопасны для людей, живущих в них. Однако изделия из глины обладают низкой водостойкостью. Используя в качестве сырья глинистые породы, можно совместить преимущества изделий из глины и автоклавных силикатных материалов.

Глинистые породы имеют весьма разнообразный минеральный состав и свойства. Поэтому были изучены особенности формирования цементирующего соединения в присутствии глинистых минералов, что позволило разработать методику расчета состава сырьевой смеси на основе известково-глинистого вяжущего. В основу предложенной методики положено условие, при котором содержание CaO должно составлять величину, необходимую для полного взаимодействия с глинистыми минералами, содержащимися в вяжущем:

$$C = \frac{2800 \cdot P \cdot H}{28 \cdot P \cdot H + 1000A},$$

где  $C$  — содержание CaO в известково-глинистом вяжущем, мас. %;

$P$  — содержание глинистых минералов в глинистой породе, мас. %;

$H$  — предельное поглощение глины известью, 28–30 мэв / г;

$A$  — активность извести, мас. %.

При взаимодействии породообразующих минералов глинистых пород, в том числе и нанодисперсных глинистых минералов, с известью образуются гидросиликаты кальция различной основности и гидрогранаты, что способствует формированию цементирующего соединения рациональной микроструктуры. Установлено, что наиболее эффективно управлять синтезом новообразований можно за счет введения пород, содержащих наряду с глинистыми минералами 50–70 мас. % тонкодисперсного кварца.

Результаты исследований апробированы на сырьевых ресурсах РФ и зарубежных стран [3, 4]. Разработана технология получения плотных и ячеистых силикатных материалов с высокими физико-механическими показателями по энергосберегающей технологии (см. таблицу).

**Свойства силикатных материалов на основе песчано-глинистых пород**

Автоклавные силикатные материалы	Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Морозостойкость, циклов	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °C)	Снижение энергоемкости производства, %
Прессованные	1850–2000	20–30	35–50	07–0,8	20–25
Ячеистые	Теплоизоляционные	до 400	2,2–3,0	15	0,08–0,1
	Конструкционно-теплоизоляционные	500 700	2,9–3,5 4,4–5,4	25 25	0,1–0,12 0,14–0,15

Снижение энергозатрат на производство происходит за счет уменьшения давления автоклавной обработки при сокращении времени изотермической выдержки в автоклаве в 2–3 раза, а также возможно снижение расхода извести. Высокая дисперсность изучаемого сырья сокращает время помола известково-песчано-глинистого вяжущего, а при производстве ячеистого бетона возможно исключение предварительного помола песчано-глинистого сырья.

Установлено, что песчано-глинистые породы повышают прочность сырца в 3–4 раза, что позволит улучшить формуемость сырьевой смеси, облегчить выпуск высокопустотных изделий, а также снизить брак в процессе формования.

Газобетон обладает хорошей теплоизолирующей способностью при высоких показателях прочности. Сопротивление теплопередаче стен жилых и общественных зданий, выполненных из газобетона, полностью соответствует новым требованиям СНиП. Коэффициент теплопроводности газобетона на основе известково-песчано-глинистого вяжущего в сухом состоянии составляет 0,08–0,10 Вт / (м · °C) для теплоизоляционных и 0,14–0,15 Вт / (м · °C) для конструкционных материалов. Теплопроводность этих материалов ниже, чем газобетона на основе традиционного сырья. Для контрольных известково-песчаных образцов газобетона показатели составили соответственно 0,1 и 0,16 Вт / (м · °C). Это связано с тем, что новообразования газобетона на основе известково-песчано-глинистого вяжущего имеют более сложный состав и, соответственно, более низкую теплопроводность.

Газобетон обладает хорошими теплоаккумуляционными свойствами. Особенностью дома, построенного из газобетона, является то, что на обогрев его помещений требуется ощутимо меньше энергии, чем на кирпичные помещения. Расходы на отопление дома из газобетона снижаются на 20–30 %.

Несмотря на высокопористую структуру, газобетон не является гигроскопичным. Равновесная влажность стен из газобетона находится в пределах 5–6 мас. %. Этот же показатель для стен из дерева в 4 раза выше. В газобетоне присутствуют поры как открытого, так и закрытого типа. За счет этого впитывание влаги происходит только на небольшую глубину. Наличие закрытых пор предотвращает проникновение влаги вглубь материала. При отрицательных температурах вода, расширяясь в объеме, не приводит к образованию трещин, так как при замерзании распределается в открытых порах.

Газобетон характеризуется наличием преимущественно открытых пор, которые позволяют проникать воздуху, а значит стены «дышат», что повышает комфортность климата в доме из газобетона.

Наличие сообщающихся между собой пор открытой структуры обуславливает высокую звукопоглощающую способность газобетона. В зданиях из газобетона обеспечиваются действующие требования по звукоизоляции. По официальным нормам этот показатель для бытовых помещений должен составлять не менее 41 Дб.

Одним из важнейших показателей безопасности строительных материалов является их радиоактивность. Автоклавные силикатные материалы на основе известково-песчано-глинистого вяжущего не содержат природных радионуклидов выше нормативных показателей. Согласно исследованиям, удельная эффективная активность естественных радионуклидов  $A_{\text{эфф}}$  в них не превышает 100 Бк / кг, т.е. эти материалы относятся к I классу и пригодны для строительства жилых и общественных зданий без ограничений.

Песчано-глинистые породы в зависимости от их минерального состава имеют различную окраску, за счет чего можно получать объемно окрашенные силикатные материалы. Выпуск высокопустотного цветного силикатного кирпича позволяет существенно повысить его конкурентную способность на рынке строительных материалов. Благодаря объемному окрашиванию можно также использовать колотый кирпич для лицевой кладки с поверхностью под карьерный камень. Гладкая лицевая кладка в сочетании с кладкой из колотого цветного силикатного кирпича придаст особую архитектурную выразительность жилым и общественным зданиям.

Таким образом, в качестве энергосберегающего сырья для производства автоклавных силикатных материалов можно использовать отложение начальной стадии процессов глинообразования, которые состоят из метастабильных минералов несовершенной структуры нанодисперсного уровня, тонкодисперсного кварца и аморфных минералов, что позволит улучшить физико-механические свойства автоклавных силикатных материалов. Замена традиционного сырья вскрышными песчано-глинистыми породами позволит снизить содержание отходов в отвалах, улучшить состояние окружающей среды, а также расширить сырьевую базу производства автоклавных силикатных материалов.

Эксплуатационные характеристики строительных материалов на основе глинистых пород незавершенной стадии литогенеза и гетеропористость наnano-, микро- и макроуровне способствуют созданию в живых комплексах комфортной среды обитания, что может существенно увеличить продолжительность жизни человека.

С использованием изучаемого сырья можно получать эффективные окрашенные высокопустотные силикатные кирпичи и камни, а также ячеистые бетоны, использование которых в строительстве позволит повысить комфортность проживания человека. Сокращение энергозатрат на производство силикатного кирпича составит 20–25 % и газобетона — 30–35 %, соответственно, повысится экологическая безопасность производства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик, В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород [Текст] / В.С. Лесовик. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. — 526 с.
2. Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи: монография [Текст] / В.С. Лесовик. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. — 213 с.
3. Аль-Азаб Тебет Салем. Повышение эффективности безобжиговых строительных материалов на основе глинистых пород Йемена [Текст] / Аль-Азаб Тебет Салем, В.С. Лесовик, А.Н. Володченко // Вестн. БГТУ. — 2009. — № 2. — С. 4–8.
4. Володченко, А.Н. Автоклавные ячеистые бетоны на основе магнезиальных глин [Текст] / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 5. — С. 14–21.

*ВОЛОДЧЕНКО Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: volodchenko@intbel.ru*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ЛЕСОВИК Валерий Станиславович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.;  
E-mail: naukavs@mail.ru*

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

Получено 21.01.14

**Volodchenko Anatoly Nikolaevich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: volodchenko@intbel.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Lesovik Valery Stanislavovich**, a corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering, doctor of technical sciences, professor; E-mail: naukavs@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **SILICATE MATERIALS AUTOCLAVED HARDENING BASED ON ALUMINOSILICATE MATERIALS BASED AS AN OPTIMIZATION FACTOR IN THE «MAN — MATERIAL — HABITAT» SYSTEM**

The author found that of the initial stage of clay formation can be used for the production of autoclave silicate materials. These clay formation processes consist of metastable minerals of imperfect structure of nanodispers level, as well as fine quartz and amorphous minerals. The materials will make it possible to improve mechanical properties of autoclave silicate materials. With the use of the examined materials we can get effective painted highly hollow silicate bricks and stones as well as cellular concrete. The use of such concrete in construction will increase the comfort for people.

**Key words:** comfortable living environment, sandy-clay rocks, autoclave silicate materials.

## REFERENCES

1. Lesovik, V.S. Improving the efficiency of the production of building materials with regard to the genesis of rocks [Text] / V.S. Lesovik. — M. : Publisher Association building universities, 2006. — 526 p.
2. Lesovik, V.S. Geonika. The object and purpose: a monograph [Text] / V.S. Lesovik. — Belgorod: Unit BSTU, 2012. — 213 p.
3. Al-Azab Thabet Saleem. Increase of efficiency cob of building materials on the basis of clay breeds of Yemen [Text] / Al-Azab Thabet, V.S. Lesovik, A.N. Volodchenko // Herald BSTU. — 2009. — N 2. — P. 4–8.
4. Volodchenko, A.N. Autoclaved aerated concrete based on magnesium clays [Text] / A.N. Volodchenko, V.S. Lesovik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 5. — P. 14–21.

**УДК 691.542:539.4**

**Л.В. ИЛЬИНА, Г.И. БЕРДОВ, Н.О. ГИЧКО, А.Н. ТЕПЛОВ**

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК**

При введении в состав цемента 2–11 мас. % минеральных добавок наблюдается максимум значений прочности при определенном их количестве. Если плотность добавки близка к плотности клинкерных минералов и дисперсность добавки и цемента примерно одинакова, то оптимальное количество добавки составляет около 8 мас. %. При увеличении дисперсности добавок их оптимальное количество уменьшается.

**Ключевые слова:** портландцемент, минеральные добавки, дисперсность, прочность.

При больших масштабах производства и потребления цемента вопрос его экономии и рационального использования приобретает важное значение. Одной из задач при производстве вяжущих веществ является разработка и внедрение ресурсно- и энергосберегающих технологий, предусматривающих широкое применение местного минерального сырья и техногенных продуктов [1, 2].

В настоящее время существуют несколько направлений в области сберегающих технологий. Перспективными направлениями в этой области можно считать:

1. Совершенствование традиционных технологий, введение добавок различного функционального назначения.

2. Предварительная подготовка компонентов, например, механохимическая активация вяжущих, ультразвуковая активация воды и т.д.

3. Применение новых менее энергоемких материалов, в частности производство малоклинкерных и бесклинкерных вяжущих веществ и материалов на их основе.

Определение путей максимального использования потенциальных возможностей цемента является актуальным вопросом.

Для решения данной проблемы целесообразно использовать дисперсные минеральные добавки, например, волластонит, диопсид, диабаз, известняк.

В качестве вяжущего в данной работе исследован портландцемент производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская обл.) марки ПЦ 400 Д-20. Минеральный состав его, мас. %:

$C_3S = 50-55$ ,  $C_2S = 18-22$ ,  $C_3A = 7-11$ ,  $C_4AF = 12-15$ .

Удельная поверхность  $320 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Химический состав цемента, мас. %:

$SiO_2 = 20,7$ ;  $Al_2O_3 = 6,9$ ;  $Fe_2O_3 = 4,6$ ;  $CaO = 65,4$ ;  
 $MgO = 1,3$ ;  $SO_3 = 0,4$ ; п.п. — 0,5.

Исследованы образцы цемента после хранения в течение 7 сут в стандартных условиях (температура  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , влажность не более 60 %).

---

**© Ильина Л.В., Бердов Г.И., Гичко Н.О., Теплов А.Н., 2014**

В качестве минеральных добавок использовались тонкоизмельченные горные породы: волластонит (Синюхинское месторождение, рудник «Веселый», Республика Алтай), диопсид (Буготакское месторождение, Иркутская обл., диабаз (п. Горный, Новосибирская обл.), известняковая мука представляла собой измельченную породу — известняк (г. Искитим, Новосибирская обл.). Во многих случаях они являются отходами производства. Их химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав минеральных добавок

Наименование добавки	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	п.п.п.
Волластонит	53,4	34,7	0,3	3,1	2,4	—	—	—	6,4
Диопсид	56,5	25,9	15,84	1,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,6
Диабаз	76,0	4,0	2,2	12,3	3,7	1,0			0,8
Известняк	0,5	54,7	0,5	0,2	0,1	—	—	—	40,4

Истинная плотность (кг / м<sup>3</sup>) данных добавок составляла: волластонит — 2915, диопсид — 3300, диабаз — 3000, известняк — 2600. Показатели дисперсности минеральных добавок приведены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам гранулометрического анализа

Показатели	Вид минеральной добавки			
	волластонит	диопсид	диабаз	известняк
Среднеобъемный размер частиц, мкм	28,6	27,0	8,7	12,3
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> / кг	309	393	540	470
Объемная доля частиц с размерами менее 4 мкм, %	10,6	16,3	20,0	12,3
Объемная доля частиц с размерами менее 16 мкм, %	27,9	31,9	61,6	49,3
Объемная доля частиц с размерами менее 32 мкм, %	44,9	46,9	88,5	78,6

Добавки вводились в количестве 2, 5, 7, 9 и 11 % от массы цемента. Портландцемент смешивали с указанными добавками в шаровой мельнице в течение 1,5 ч.

Исследования проводились на образцах цементного камня, размерами 20×20×20 мм, полученных в результате твердения теста нормальной густоты в условиях тепловлажностной обработки и в нормальных условиях (табл. 3). Тепловлажностная обработка проводилась по режиму: 3 ч — подъем температуры до 90 °C, 8 ч — изотермическая выдержка при данной температуре, 3 ч — снижение температуры.

Анализ полученных результатов показывает, что введение уже 2 % минеральных добавок (волластонита, диопсида, диабаза, известняка) приводит к существенному повышению прочности цементного камня. По мере увеличения количества добавок (волластонита и диопсида) до опти-

Таблица 3. Влияние минеральных добавок на прочность цементного камня при твердении в нормальных условиях в различный промежуток времени

Условия и продолжительность твердения	Прочность образцов цементного камня, МПа, в зависимости от количества добавки, % от массы вяжущего					
	0	2	5	7	9	11
<i>Волластонит</i>						
ТВО	56,2	57,9	63,9	65,1	66,7	61,4
Нормальные условия, 1 сут	10,5	11,1	12,5	14,9	15,7	10,7
Нормальные условия, 3 сут	17,9	18,0	19,5	21,5	22,8	18,9
Нормальные условия, 7 сут	33,0	34,0	37,9	38,0	39,5	35,7
Нормальные условия, 28 сут	62,7	66,5	69,9	71,6	75,0	69,0
<i>Диопсид</i>						
ТВО	56,2	66,3	70,8	77,1	71,8	67,5
Нормальные условия, 1 сут	10,5	12,4	13,8	16,3	14,9	12,2
Нормальные условия, 3 сут	18,1	21,7	24,2	27,6	26,0	21,8
Нормальные условия, 7 сут	33,6	38,5	44,0	51,2	46,4	39,3
Нормальные условия, 28 сут	62,7	72,9	80,1	86,8	81,7	74,6
<i>Диабаз</i>						
ТВО	56,2	66,3	63,7	60,6	57,9	55,3
Нормальные условия, 1 сут	10,6	12,9	11,4	10,6	9,3	9,1
Нормальные условия, 3 сут	18,1	22,1	20,5	18,9	18,1	16,7
Нормальные условия, 7 сут	33,6	39,4	37,1	35,3	33,8	30,5
Нормальные условия, 28 сут	62,7	72,1	70,2	65,5	63,4	61,6
<i>Известняк</i>						
ТВО	56,2	65,8	62,0	53,0	59,1	61,3
Нормальные условия, 1 сут	10,6	13,5	12,7	10,0	10,9	11,5
Нормальные условия, 3 сут	18,1	27,8	25,2	24,3	22,0	21,4
Нормальные условия, 7 сут	33,6	43,7	40,7	35,6	36,3	34,5
Нормальные условия, 28 сут	62,3	76,3	70,9	68,6	64,7	60,2

мального значения прочность образцов повышается (рис. 1–3). При этом оптимальное количество волластонита составляло 9 %, диопсида — 7 %. При дальнейшем увеличении количества добавок наблюдается снижение прочности цементного камня. Добавление к цементу 9 % волластонита приводит к увеличению прочности до 19,6 %.

Из числа рассмотренных добавок диабаз оказывает наименьшее влияние на прочность цементного камня. Введение 2 % диабаза приводит к увеличению прочности на 11,8 %. При дальнейшем увеличении добавки диабаза прочность цементного камня снижается.

При анализе влияния минеральных добавок на механическую прочность цементного камня необходимо учитывать их упругие свойства. Если модуль упругости минеральной добавки больше, чем у цементного камня, то при действии внешних нагрузок больший уровень напряжений будет приходиться на материал добавки, который является более прочным, чем

цементный камень. Это обеспечивает повышение прочности цементного камня в целом.

Из числа рассматриваемых силикатных материалов наибольшей твердостью (6,5–7 по шкале Мооса), т. е. и наибольшим значением модуля упругости обладает диопсид. Меньше твердость (5,5–6 по шкале Мооса) у волластонита. Это будет определять перераспределение напряжений между компонентами цементного камня и большую эффективность действия диопсида по сравнению с волластонитом.

Добавление 2 % известняка приводит к повышению прочности цементного камня до 22,5 %.

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

В цементном камне можно выделить три основных элемента структуры, определяющих механическую прочность: частицы твердого наполнителя, цементное связующее и контактную зону между ними. Разрушение будет происходить по наиболее слабым элементам структуры. Рассматриваемые наполнители отличаются высокой прочностью. Наиболее вероятно, что слабое место структуры — контактная зона или цементное связующее. По-видимому, влияние  $\text{CaCO}_3$  проявится в наибольшей мере на контактной зоне системы. Оптимальное содержание добавки будет определяться ее воздействием на процесс гидратации цемента, формирование контактной зоны между частицами добавки и цементным камнем. В рассматриваемом случае оптимальное содержание известняковой муки составляет 2 мас. %.

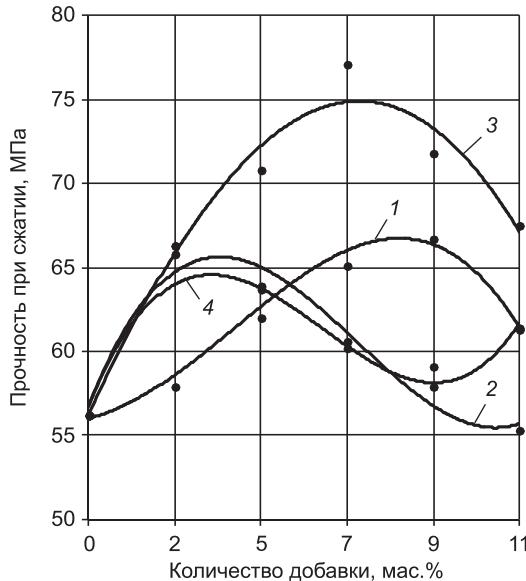


Рис. 1. Влияние количества минеральных добавок на прочность цементного камня после тепловой обработки

1 — волластонит, 2 — диабаз, 3 — диопсид, 4 — известняк

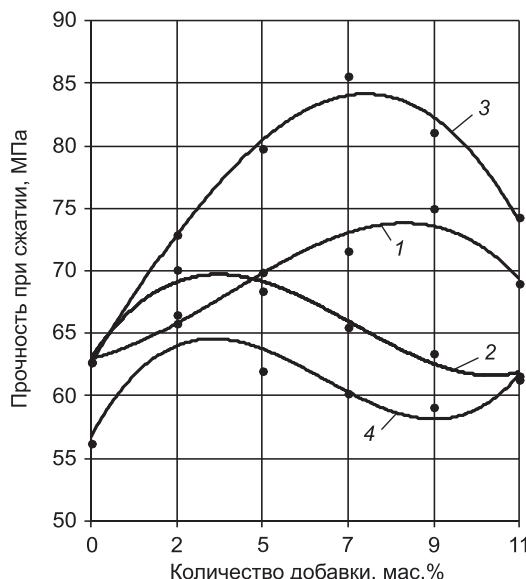


Рис. 2. Влияние количества минеральных добавок на прочность цементного камня после 28 сут твердения в нормальных условиях

1 — волластонит, 2 — диабаз, 3 — диопсид, 4 — известняк

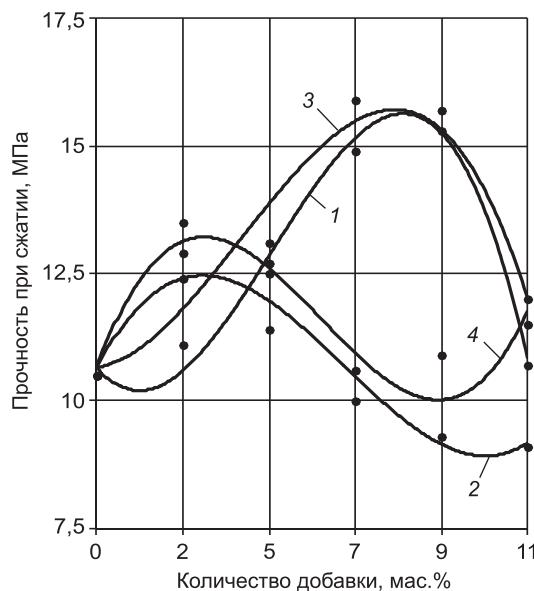


Рис. 3. Влияние количества минеральных добавок на прочность цементного камня после 1 сут твердения в нормальных условиях

1 — волластонит, 2 — диабаз, 3 — диопсид, 4 — известняк

— действуют на процесс гидратационного твердения цемента;  
— могут выполнять роль подложек, на которых происходит рост кристаллов гидратных новообразований. При этом важно, чтобы добавки были достаточно близки по составу, типу химических связей, физико-химическим характеристикам (удельной энталпии образования, удельной энтропии) к безводным исходным вяжущим и продуктам их гидратации.

Для обеспечения высокой эффективности действия минеральных микронаполнителей важны не только их свойства, но и вводимое их количество и дисперсность. Следует отметить, что количество вводимых минеральных добавок во многих случаях выбирается достаточно произвольно и измеряется от долей процента до нескольких десятков процентов от массы вяжущего вещества. Дисперсность добавок учитывается далеко не всегда и в некоторых случаях в публикациях не анализируется.

Взаимодействие наполнителей с минеральными вяжущими осуществляется в зоне контакта частиц этих компонентов. Очевидно, оптимальная концентрация добавок соответствует случаю, когда частица добавки со всех сторон плотно окружена частицами гидратированного вяжущего. Меньшее количество добавки приведет к снижению эффективности их действия. При большем их содержании возможны прямые контакты между частицами добавок, что также снизит эффективность их влияния.

Предположив, что частицы как цемента, так и добавок имеют сферическую форму и одинаковые размеры и частицы добавки распределены по объему равномерно, получаем при формировании плотной структуры объемную долю добавки, равную  $1/12$  от объемной доли вяжущего, т.е. 8,3 %. Если плотность добавки отличается от плотности вяжущего, то

Эффективное использование дисперсных минеральных наполнителей зависит от химического состава и дисперсности как вяжущего вещества, так и вводимой минеральной добавки.

Эффективность действия минеральных добавок обусловлена тем, что они:

- микроармируют образующий цементный камень;
- препятствуют распространению в нем микротрещин при действии нагрузок;
- вызывают перераспределение механических напряжений между частицами добавки и искусственным камнем; при этом модуль упругости материала добавки должен быть выше, чем у искусственного камня;

массовая доля добавки, %, может быть определена по соотношению плотностей [3]:

$$m_{\text{д}} = 8,3 \frac{\rho_{\text{д}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{д}}$  — процент вводимой добавки от массы вяжущего;

$\rho_{\text{д}}$  — плотность добавки, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  — плотность вяжущего, г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, можно предположить, что оптимальное содержание добавки при условии, что ее дисперсность и плотность близки к дисперсности и плотности вяжущего, составляет 8–8,5 %. Если же плотность добавки заметно ниже, чем вяжущего, то ее оптимальное количество будет меньшим.

Рассматривая частицы вяжущего и добавки как сферические, можно ориентировочно определить массовую долю добавки при различной ее дисперсности [3] для случая плотнейшей упаковки частиц по соотношению:

$$n_{\text{д}} = k \cdot \frac{\frac{\pi D_{\text{д}}^3}{6} \cdot \rho_{\text{д}}}{k \cdot \frac{\pi D_{\text{в}}^3}{6} \cdot \rho_{\text{в}}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{D_{\text{д}}^3}{D_{\text{в}}^3} \cdot \frac{\rho_{\text{д}}}{\rho_{\text{в}}}. \quad (2)$$

Здесь  $D_{\text{д}}$  — диаметр частиц добавки;

$D_{\text{в}}$  — диаметр частиц вяжущего;

$k$  — координационное число, т. е. количество частиц вяжущего, плотно окружающих частицу добавки. Его можно ориентировочно определить в соответствии с первым правилом Полинга.

Количественная оценка влияния дисперсности добавок является достаточно четкой: с увеличением их дисперсности оптимальное количество уменьшается. Так, если диаметр частицы добавки в 2 раза меньше диаметра частиц цемента, то оптимальное количество добавки будет равно 2 % от объема частиц вяжущего. Таким образом, при увеличении дисперсности добавки ее концентрация, соответствующая наиболее эффективному ее действию, снижается.

Из полученных результатов (рис. 1–3) следует, что для добавок, имеющих удельную поверхность, близкую к удельной поверхности цемента, оптимальное количество, обеспечивающее максимальные значения прочности, составляет 7–9 мас. %, что близко к полученному расчетом по формуле (1). Для добавок, имеющих дисперсность существенно более высокую, чем у цемента, оптимальное количество составляет 2–5 %, что соответствует формуле (2).

После тепловлажностной обработки прочность цементного камня существенно меньше полученной после 28 сут твердения в нормальных условиях. При введении минеральных добавок в количестве 2–9 % прочность цементного камня при сжатии во всех случаях после тепловлажностной обработки (ТВО) больше, чем у образцов без добавки (рис. 3). При этом прочность после ТВО у образцов с добавкой превышает прочность образцов без добавки после 28 сут твердения в нормальных условиях при введении: 5–9 % волластонита, 2–11 % диопсида, 2–5 % диабаза, 2 %

известняковой муки. То есть введение указанного количества этих добавок позволяет после ТВО получить значение прочности более высокое, чем у образцов без добавки после 28 сут твердения в нормальных условиях.

Сравнение значений прочности образцов после твердения в течение 28 сут в нормальных условиях показало, что увеличение прочности происходит при введении 2–11 % диопсида, 2–11 % волластонита, 2–9 % диабаза, 2–9 % известняковой муки (см. рис. 2).

Анализируя факторы, обусловливающие повышение прочности цементного камня при твердении в нормальных условиях, можно отметить следующее. При введении оптимальных количеств диопсида и волластонита армирующее влияние в ранние сроки твердения (1–3 сут) (см. рис. 3) проявляется более значительно, чем в более поздних сроках (28 сут). То есть такие добавки сильнее влияют на упрочнение структуры в более раннем возрасте.

При введении добавки известняковой муки ее действие также резко проявляется в начальные сроки твердения (1–3 сут). При этом значения прочности в этот период сопоставимы с теми, которые обеспечиваются введением волластонита и диопсида.

Таким образом, наибольшая эффективность действия минеральных веществ, составляющих микронаполнитель, определяется оптимальным количеством добавок, зависящим от их дисперсности.

Максимальное увеличение прочности цементного камня в рассматриваемом случае достигается при введении 9 % волластонита, 7 % диопсида, 2 % известняка и диабаза. Такое количество добавки является оптимальным как при твердении цементного камня в условиях тепловлажностной обработки, так и при твердении в нормальных условиях. В обоих случаях наиболее эффективно действие добавки диопсида. Увеличение прочности при сжатии цементного камня составляет 36,5 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова, Т.В. Бетоны — пути развития [Текст] / Т.В. Кузнецова, Б.Э. Юдович // Цемент и его применение. — 2005. — № 5. — С. 68–69.
2. Гусев, Б.В. Бетоноведение — фундаментное и прикладное направление [Текст] / Б.В. Гусев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2005. — № 10. — С. 20–21.
3. Бердов, Г.И. Влияние количества и дисперсности минеральных добавок на свойства цементных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 11–12. — С. 11–16.

*ИЛЬИНА Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ГИЧКО Николай Олегович, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ТЕПЛОВ Александр Николаевич, студ.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 13.01.14

**Ilina Liliya Vladimirovna**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

**Gichko Nikolay Olegovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Teplov Aleksandr Nikolaevich**, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **INCREASE STRENGTH OF CEMENT WHEN ADMINISTERED DISPERSIVE MINERAL SUPPLEMENTS**

When administered in the cement of 2–11 % mas. mineral supplements, there is a maximum strength values at a certain number of them. If the density of the additive is close to the density and fineness of clinker minerals, additives and cement is approximately the same, the optimum amount of additives is about 8 % by weight. By increasing the dispersion of the optimal amount of additives decreases.

**Key words:** portland cement, mineral supplements, dispersion, strength.

### **REFERENCES**

1. Kuznetsova, T.V. Concrete — the development [Text] / T.V. Kuznetsova, B.E. Yudovich // Cement and its applications. — 2005. — N 5. — P. 68–69.
  2. Gusev, B.V. Study of concrete — foundation and applied direction [Text] / B.V. Gusev // Building materials, equipment, technologies of XXI century. — 2005. — N 10. — P. 20–21.
  3. Berdov, G.I. Influence of the number and dispersion of mineral additives on the properties of cementations materials [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 11–12. — P. 11–16.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.5:533.6

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА, Е.И. ТОЛМАЧЕВА

### РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ОБЪЕМА АСПИРАЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ КОВШОВЫМИ ЭЛЕВАТОРАМИ\*

#### Сообщение 2. СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМОВ АСПИРАЦИИ

Разрабатываются схемы аспирации элеваторных перегрузок. Составлены балансовые уравнения воздухообмена аспирируемых укрытий. Сформулированы и решены системы уравнений для определения расходов перетекаемого воздуха для стандартного узла перегрузки. Предлагаются и аналитически обосновываются способы снижения производительности аспирационных систем.

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

В статье продолжается нумерация формул и рисунков сообщения 1 [1].

**3. Объемы аспирации.** Расход воздуха, удаляемого из укрытия местными отсосами аспирационной системы, определяется уравнением воздушного баланса. Так, для аспирируемых укрытий элеваторных перегрузок сыпучего материала имеем:

— для укрытия «башмака» элеватора в силу (16)

$$Q_e = Q_0 + Q_2 + Q_h - Q_1 = Q_0 + \Delta Q + Q_h; \quad (45)$$

— для укрытия места загрузки сыпучего материала из элеватора на верхний конвейер в силу (18)

$$Q_a = Q_3 + Q_k. \quad (46)$$

Величины расхода воздуха, поступающего в укрытие через неплотности, определяются величиной разрежения, поддерживаемого местным отсosом, и площадью неплотностей.

Для укрытия «башмака» элеватора рекомендуется поддерживать разрежение  $h_h = 10 \div 30$  Па, тогда расход воздуха, поступающего через неплотности в силу (14), (21) и (22):

$$Q_h = \sqrt{h_h / R_h} = 0,913 F_h \sqrt{h_h / \rho}.$$

Для верхнего конвейера оптимальное разрежение определяется конструктивным типом укрытия и составляет для сыпучего материала при  $d_e > 3$  мм  $h_k = 6$  для укрытия с двойными стенками и  $h_k = 11$  для укрытия с одинарными стенками.

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-31069-мол\_а), программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова, Совета по грантам Президента РФ (проект МК-103.2014.1).

Расход воздуха, поступающего в укрытие через неплотности, в силу (12), (21) и (22) равен:

$$Q_k = \sqrt{h_k / R_k} = 0,913 F_k \sqrt{h_k / \rho}.$$

Расход воздуха, протекающего по загрузочному желобу, определяется уравнением (36). Разделив обе части этого равенства на  $L_{k0}$ , получим следующее уравнение перетекания воздуха в безразмерном виде:

$$\varphi_0^2 = \frac{Bu}{3} [|1 - \varphi_0|^3 - |n - \varphi_0|^3] + Eu_0,$$

где  $\varphi_0 = \frac{Q_0}{L_{k0}} = \frac{u_0}{v_{k0}}$ ;  $n = \frac{v_{n0}}{v_{k0}}$ ;  $u_0$  — скорость воздуха в загрузочном желобе, м/с;

$v_{n0}, u_{k0}$  — скорости потока сыпучего материала в начале и в конце загрузочного желоба, м/с;

$Bu$  — число Бутакова–Нейкова [2], равное в данном случае:

$$Bu_0 = 3 \cdot E_0 \frac{L_{k0}}{R_n + R_0} = K_0 \Psi_{y0} \frac{1,5}{d_e} \cdot \frac{G_m v_{k0}}{\rho_m S_0 a_{t0} \sum \zeta_0}; \quad \sum \zeta_0 = \zeta_0 + \zeta_n \left( \frac{S_0}{F_n} \right)^2;$$

$$Eu_0 = \frac{h_h}{(R_n + R_0)L_{k0}^2} = \frac{2h_h}{\sum \zeta_0 v_{k0}^2 \rho} \text{ — число Эйлера.}$$

Можно написать аналогичное критериальное уравнение и для разгрузочного желоба:

$$\varphi_3^2 = \frac{Bu_3}{3} [|1 - \varphi_3|^3 - |n - \varphi_3|^3] + Eu_3 - \frac{h_b}{0,5 \zeta_3 v_{k3}^2 \rho};$$

$$Bu_3 = K_0 \Psi_{y3} \frac{1,5}{d_e} \cdot \frac{G_m v_{k3}}{\rho_m S_3 a_{t3} \zeta_3}; \quad Eu_3 = \frac{h_k}{0,5 \zeta_3 v_{k3}^2 \rho}.$$

Однако найти расход воздуха, перетекающего по этому желобу, не удается, так как неизвестна величина разрежения в неаспирируемом укрытии «головки» элеватора.

Поэтому расходы перетекаемого воздуха будем определять методом итерации с использованием процедуры (40). Алгоритм программы расчета объемов аспирации включает определение методом бисекции величин  $Q_0$  и  $Q_3$ , а расходы  $Q_1$  и  $Q_2$  — по формулам (41) и (42).

В качестве примера рассмотрим элеваторную перегрузку со следующими параметрами

для загрузочного желоба:  $E_0 = 4$ ;  $L_{k0} = 1,6$ ;  $L_{n0} = 1$ ;  $h_h = \text{var}$  ( $h_h = 16,8$  при построении графиков рис. 5);  $R_0 = 50$ ;

для кожухов рабочей и холостой ветвей конвейера элеватора:  $E_1 = 200$ ;  $R_1 = 21$ ;  $L_1 = L_2 = 1$ ;  $E_2 = 400$ ;  $h_b = \text{var}$ ;  $R_2 = 22$ ;

для разгрузочного желоба:  $E_3 = 5$ ;  $L_{k3} = 2$ ;  $L_{n3} = 0,5$ ;  $R_b = \text{var}$  ( $R_b = 40$  при построении графиков рис. 4);  $R_3 = 10$ ;  $h_k = 10$ .

Результаты расчетов расходов перетекаемого воздуха приведены на рис. 4 и 5. Как видно из этих данных, при увеличении разрежения в аспирируемом укрытии башмака элеватора (см. рис. 4) возрастают расходы

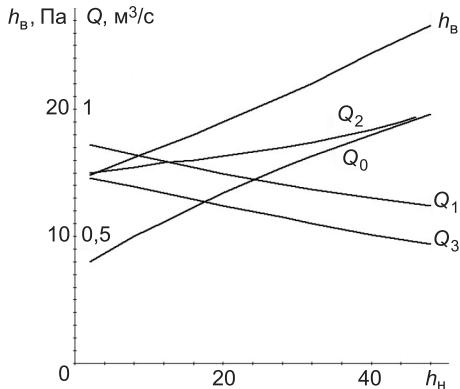


Рис. 4. Изменение расходов воздуха ( $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$ ) в каналах и разрежения ( $h_b$ ) в укрытии головки элеватора в зависимости от разрежения в укрытии башмака элеватора

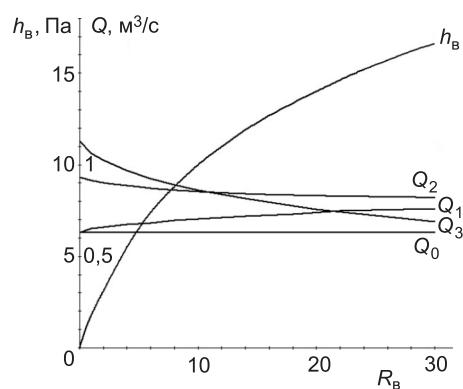


Рис. 5. Изменение расходов воздуха ( $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$ ) в каналах и разрежения в кожухе головки элеватора в зависимости от степени герметизации

эжектируемого воздуха в загрузочном желобе  $Q_0$  и расход воздуха в кожухе холостой ветви конвейера, а также растет разрежение в укрытии головки элеватора  $h_b$ . Уменьшаются лишь расходы эжектируемого воздуха в разгрузочном желобе  $Q_3$  и в кожухе рабочей ветви конвейера  $Q_1$ . Объясняется это тем, что увеличение разрежения  $h_h$  снижает эжектирующую способность потока сыпучего материала в разгрузочном желобе (непосредственно из-за увеличения  $h_b$ ) и груженых ковшей в кожухе рабочей ветви нории.

Величина  $h_b$  особенно резко растет при увеличении степени герметизации укрытия головки элеватора (рис. 5). В связи с этим уменьшаются расходы  $Q_3, Q_2$  и увеличивается расход эжектируемого воздуха в кожухе рабочей ветви элеватора  $Q_1$ .

Что касается объемов аспирации (рис. 6), то они, естественно, отражают отмеченные закономерности перетекания воздуха по каналам элеваторных перегрузок. Так, объемы аспирации для укрытия башмака элеватора  $Q_h$  растут при увеличении разрежения  $h_h$  и не только за счет увеличения  $Q_0$ , но и за счет роста эжектирующей способности ковшей и просыпи сы-

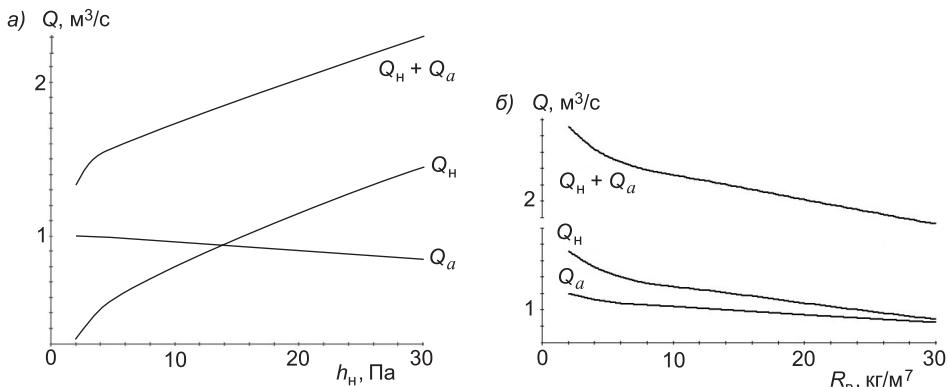


Рис. 6. Изменение объемов аспирации от величины разрежения в укрытии башмака элеватора при  $R_b = 40, h_k = 10 \text{ Па}$  (а) и от степени герметизации укрытия головки элеватора при  $h_h = 16,8 \text{ Па}$  (б)

пучего материала в кожухе холостой ветви конвейера нории, а также за счет увеличения расхода воздуха, поступающего в рассматриваемое укрытие через неплотности при повышении разрежения  $h_n$  (см. рис. 6, а). А при увеличении разрежения  $h_b$ , которое возникает при снижении площади неплотностей укрытия элеватора (при росте  $R_b$ ), наблюдается некоторое снижение объемов аспирации  $Q_n$  и  $Q_a$  (см. рис. 6, б). Объем аспирации  $Q_a$  снижается и при увеличении разрежения в нижнем укрытии  $h_n$ .

Суммарный объем аспирации в первом случае (при увеличении  $h_n$ ) растет из-за увеличения объемов просасываемого воздуха через неплотности укрытия башмака элеватора. При герметизации верхнего укрытия общая производительность местных отсосов уменьшается (рис. 6, б). Несмотря на это, необходимый объем аспирации остается достаточно высок даже при небольших разрежениях, поддерживаемых в укрытиях (при  $h_n = 16,8$  Па и  $h_k = 10$  Па и  $F_b = 0,1 \text{ м}^2$  ( $R_b = 14,4$  Па/(\text{м}^3/\text{с})<sup>2</sup>), в рассматриваемом примере суммарный объем аспирации составляет 2,06 м<sup>3</sup>/с).

**4. Снижение необходимых объемов аспирации при байпасировании элеваторных перегрузок.** Производительность аспирационной системы определяется общим расходом воздуха, поступающего через все аспирируемые и неаспираторные укрытия, но аэродинамически связанные с первыми. Для снижения объемов аспирации необходима не только герметизация укрытия, но и уменьшение величины разрежения  $h_n$  и  $h_k$ .

Как известно [3], применение укрытий с двойными стенками позволяет существенно снизить оптимальное разрежение (при  $d_3 \geq 3$  мм оптимальное разрежение в одинарном укрытии места загрузки конвейера составляет  $h_k = 11$  Па, а при применении укрытия с двойными стенками и жесткой перегородки  $-h_k = 6$  Па).

Для снижения величины разрежения в неаспираторных укрытиях они специально соединяются обводными каналами (байпасами) с зоной повышенного давления. Возникающая при этом внутренняя циркуляция воздуха снижает общий расход отсасываемого воздуха.

Рассмотрим роль этих байпасов на примере аспирации узлов загрузки и разгрузки элеватора. Пусть нижняя часть загрузочного желоба снабжена специальной (буферной) камерой, полость которой соединена обводными каналами с укрытием приводного барабана питателя и с кожухом головки элеватора. Из камеры перегружаемый сыпучий материал поступает в кожух башмака элеватора через отверстие пылевого затвора типа мигалки. В этом случае из-за аэродинамического сопротивления затвора в камере формируется избыточное давление, за счет которого часть эжектируемого воздуха по обводному каналу возвращается в верхние укрытия, создавая внутренние циркулирующие потоки воздуха с расходами  $Q_4$  и  $Q_6$ .

Укрытие кожуха головки элеватора может быть также соединено байпасом с внутренней камерой укрытия с двойными стенками загрузки верхнего конвейера (роль пылевого затвора здесь играет жесткая перегородка).

Таким образом, могут быть три циркуляционных потока с расходами  $Q_4$ ,  $Q_6$  и  $Q_7$  (см. рис. 5).

Прежде всего рассмотрим классический узел перегрузки сыпучего материала с ленточного питателя на ленточные конвейеры (рис. 7).

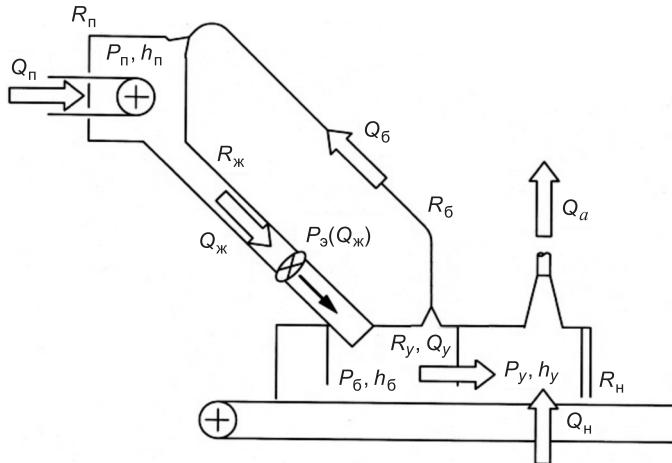


Рис. 7. Схема аспирации перегрузочного узла, оборудованного байпасом

При использовании укрытия с двойными стенками (для локализации пылевыделений при загрузке сыпучего материала на ленточный конвейер) байпасный канал соединяет внутреннюю камеру этого укрытия с неаспирируемым укрытием приводного барабана питателя. Положительный эффект достигается при указанном на схеме направлении движения воздуха. В этом случае  $Q_y = Q_{\pi} - Q_{\delta} = Q_{\pi}$ , т.е. расход воздуха, поступающего из внутренней камеры в аспирируемую (внешнюю) камеру  $Q_y$ , меньше расхода воздуха  $Q_{\pi}$ , перетекаемого по желобу за счет эжекционного напора  $P_{\delta}(Q_{\pi})$  и разрежения во внешней камере  $h_y$ , обусловленного рабочей вентилятора аспирационной системы.

Запишем очевидные уравнения потерь давления в каналах:

$$P_{\pi} + P_{\delta}(Q_{\pi}) - P_{\delta} = R_{\pi} Q_{\pi}^2 = h_{\pi} + P_{\delta}(Q_{\pi}) - h_{\pi}; \quad (47)$$

$$P_{\delta} - P_{\pi} = P_{\delta} Q_{\delta} | Q_{\delta} | = h_{\pi} - h_{\delta}; \quad (48)$$

$$P_{\delta} - P_y = R_y Q_y^2 = h_y - h_{\delta}; \quad (49)$$

$$P_a - P_y = R_y Q_y^2 = h_y; \quad (50)$$

$$P_a - P_{\pi} = R_{\pi} Q_{\pi}^2 = R_{\pi} Q_y^2 = h_{\pi} \quad (51)$$

и уравнения воздушных балансов:

$$Q_{\pi} = Q_{\pi} - Q_{\delta}; \quad (52)$$

$$Q_{\pi} = Q_{\delta} + Q_y; \quad (53)$$

$$Q_a = Q_y + Q_H. \quad (54)$$

Из (47) имеем:

$$P_{\delta}(Q_{\pi}) - R_{\pi} Q_{\pi}^2 = h_{\pi} - h_{\delta}.$$

Учитывая, что эжекционное давление в рассматриваемом случае больше потерь давления в желобе, разрежение в укрытии питателя должно быть больше разрежения в буферной (внутренней) камере:

$$h_{\pi} \geq h_{\delta}.$$

Это неравенство, обеспечивающее экономический эффект, можно записать в развернутом виде, учитывая (51) и (49):

$$R_n Q_y^2 \geq h_y - R_y Q_y^2. \quad (55)$$

Найдем минимальное значение расхода  $Q_y$ :

$$Q_y^{\min} = \sqrt{\frac{h_y}{R_n + R_y}}. \quad (56)$$

Развернутое условие эффективной работы байпаса (55) можно представить в другом виде

$$R_y \geq \left( \frac{h_y}{h_n} - 1 \right) R_n, \quad (57)$$

откуда видна роль буферной камеры. При ее отсутствии ( $R_y = 0$ ) условие (57) примет вид  $h_n \geq h_y$ , что в реальных условиях (учитывая трудности герметизации укрытия питателя) трудно осуществимо. Таким образом, буферная камера повышает вероятность эффективной работы байпаса.

Как же зависит расход  $Q_y$  от технологических и конструктивных параметров желоба, укрытий и байпасного канала?

Обозначим

$$P_*(Q_{*}) - R_* Q_{*} |Q_{*}| = L(Q_{*}). \quad (58)$$

Тогда из совместного решения уравнений (47) и (48) имеем

$$Q_6 = \frac{L(Q_{*})}{\sqrt{|L(Q_{*})| R_6}}, \quad (59)$$

а из (48), (49) и (51):  $(R_n + R_y) Q_y^2 = h_y + R_6 Q_6 |Q_6|$ , откуда

$$Q_y = \frac{h_y + R_6 Q_6 |Q_6|}{\sqrt{|h_y + R_6 Q_6 |Q_6| |(R_n + R_y)|}}. \quad (60)$$

Подставляя полученные выражения для  $Q_6(Q_{*})$  и  $Q_y(Q_6(Q_{*}))$  в уравнение (53), получим следующее функциональное уравнение для определения  $Q_{*}$ :

$$F(Q_{*}) = Q_{*} - Q_6(Q_{*}) - Q_y(Q_6(Q_{*})) = 0. \quad (61)$$

Найдя корень уравнения и подставляя его значение в (58), (59) и (60), найдем искомые величины  $Q_{*}$ ,  $Q_6$  и  $Q_y$ .

В качестве примера рассмотрим перегрузочный узел со следующими параметрами. Эжекционный напор, определяемый в виде (34), имеет следующие показатели:  $E = 4$ ;  $L_k = 1,6$ ;  $L_n = 1$ . Аэродинамическая характеристика желоба составляет  $R_{*} = 25$ .

Рассмотрим два случая: хорошая герметизация верхнего укрытия  $R_n = 25$  и посредственная герметизация  $R_n = 5$ . Будем изменять величину поддерживаемого разрежения в нижнем укрытии ( $h_y = 5, 10$  и  $20$  Па) и аэродинамические характеристики буферной камеры (перегородки) в диапазоне  $R_y = 0 - 300$  и байпасного канала  $R_6 = 0 - 150$  (для сравнений рассмотрим случай отсутствия байпаса, т.е.  $R_6 = 15 \cdot 10^9$ ).

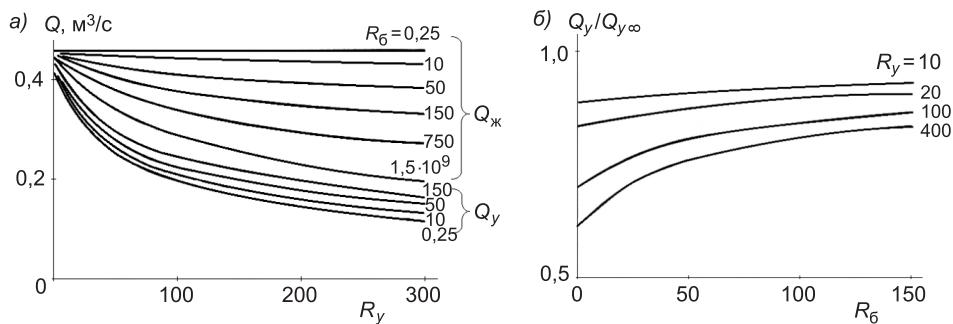


Рис. 8. Изменение расходов воздуха  $Q_y$  и  $Q_{xk}$  в зависимости от сопротивлений буферной камеры и байпаса (при хорошем уплотнении верхнего укрытия ( $h_y = 5$ ;  $R_n = 25$ ))

При отсутствии байпаса расход воздуха, поступающего из внутренней (буферной) во внешнюю камеру ( $Q_{y\infty}$ ), заметно выше, чем при устройстве обводного канала (рис. 8). Причем чем выше сопротивление перегородки укрытия и больше поперечное сечение байпаса ( $R_b < 20$ ), тем заметнее отклонение расхода  $Q_y$  от  $Q_{y\infty}$  ( $Q_y$  — расход воздуха, поступающего во внешнюю камеру, при наличии байпаса).

Изменение расходов воздуха в каналах и разрежения в неаспирирующем укрытии приводного барабана питателя представлено на рис. 9–13.

Графики кривых  $Q_{xk}$ ,  $Q_b$ ,  $Q_y$  построены по уравнениям (59), (60) и (61), а разрежение по формуле (51). Как видно из этих графиков, расход воздуха, поступающего по желобу ( $Q_{xk}$ ), уменьшается с увеличением аэродинамической характеристики буферной камеры (рис. 9, 10) и байпасного канала (рис. 11, 12).

Что касается расхода воздуха в последнем ( $Q_b$ ), то его величина рассчитывается с увеличением сопротивления перегородки и падает при уменьшении поперечного сечения байпаса. Причем в случае посредственной герметизации укрытия питателя направление течения воздуха в байпасе изменяется при небольшом сопротивлении буферной камеры (см. рис. 9 при  $R_y < 20$ ).

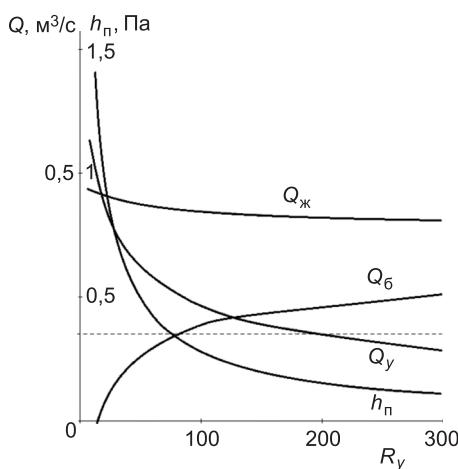


Рис. 9. Изменение расходов воздуха и разрежения в зависимости от увеличения сопротивления буферной камеры перегрузочного узла при посредственной герметизации верхнего укрытия ( $R_n = 5$ ;  $h_y = 5$ ;  $R_b = 25$ )

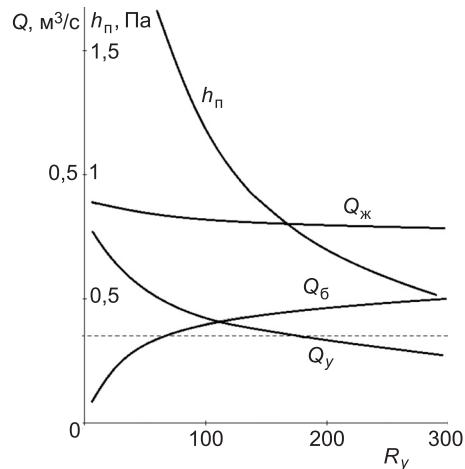


Рис. 10. Изменение расходов воздуха и разрежения в зависимости от сопротивления перегородки буферной камеры при хорошей герметизации верхнего укрытия ( $R_n = 25$ ;  $h_y = 5$ ;  $R_b = 25$ )

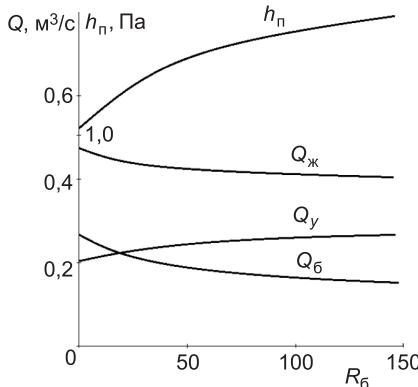


Рис. 11. Изменение расходов воздуха и разрежения в зависимости от сопротивления байпаса при средней величине потерь давления в буферной камере ( $R_n = 100$ ;  $h_y = 5$ ;  $R_6 = 25$ )

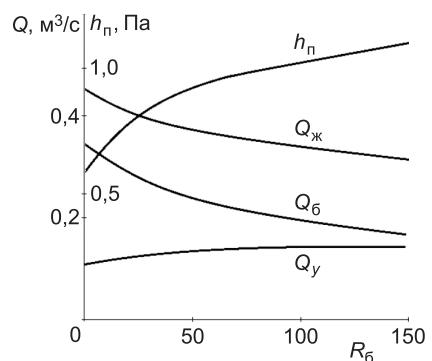


Рис. 12. Изменение расходов воздуха и разрежения в зависимости от сопротивления байпаса при повышенной потере давления в буферной камере ( $R_y = 400$ ;  $h_y = 5$ ;  $R_n = 25$ )

Эта зона расширяется до  $R_y = 40 - 90$  при увеличении разрежения в укрытии конвейера до 20 Па (рис. 13). Объясняется это падением разности давлений на концах байпасного канала при увеличении зазора между перегородкой укрытия и лентой конвейера. При этом расход воздуха, поступающего во внешнюю камеру укрытия, становится больше расхода воздуха в желобе ( $Q_y > Q_{ж}$ ).

Байпас служит каналом, по которому параллельно основному потоку эжектируемого воздуха поступает дополнительный объем воздуха. Для изменения этой ситуации необходимо увеличить герметизацию укрытия питателя. Как видно из рис. 10, расход воздуха  $Q_y$  будет меньше  $Q_{ж}$  и при небольшом сопротивлении перегородки укрытия.

Величина этого расхода будет намного меньше  $Q_{ж}$  при увеличении этого сопротивления. При  $R_y > 200$  расход  $Q_y$  меньше расхода воздуха в желобе почти в три раза, а расход рециркулируемого воздуха  $Q_b$  достигает 60 % от  $Q_{ж}$ . Однако следует иметь в виду, что расход воздуха в желобе при наличии байпаса выше, чем при его отсутствии (см. рис. 8, а). Это объясняется тем, что байпасный канал соединен параллельно и общее сопротивление системы «желоб-байпас» ниже, чем сопротивление каждого

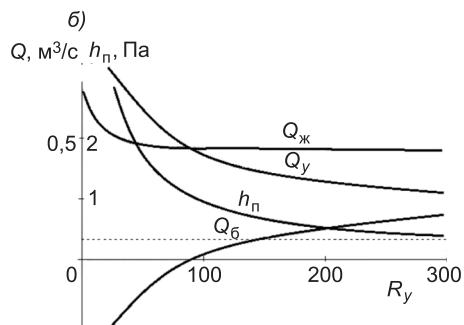
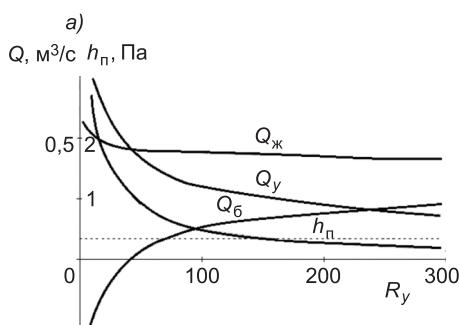


Рис. 13. Изменение расходов воздуха в зависимости от сопротивления буферной камеры для случая посредственной герметизации верхнего укрытия при повышенном разрежении в нижнем укрытии ( $R_n = 5$ ;  $R_6 = 25$ ;  $h_y = 10 - a$ ;  $h_y = 20 - b$ )

элемента этой системы. Поэтому при эжекционном нагнетании расход воздуха увеличивается, подобно тому как увеличивается расход воздуха, нагнетаемого вентилятором при параллельном соединении воздуховодов. Следовательно, более корректно сопоставлять расход  $Q_y$  с расходом  $Q_{\infty}$  при отсутствии байпаса (см. рис. 8, б). Так при  $R_y = 100$  и небольшом со- противлении байпасного канала ( $R_b = 25$ ) расход воздуха, поступающего из буферной камеры, в рассматриваемом примере будет составлять 70 % от расхода воздуха в желобе  $Q_{y\infty}$  (при отсутствии байпаса  $Q_{y\infty} = Q_{\infty}$ ). А объем циркулируемого воздуха составляет 30 % от  $Q_{\infty}$ .

Разрежение в укрытии питателя с увеличением потерь давления в буферной камере уменьшается и может достигнуть величины, при которой возможно из-за падения скорости в неплотностях поступление пыли в рабочее помещение за счет диффузационного переноса. Защитная скорость в проемах не должна снижаться менее 0,5 м/с [4]. В этом случае (при к.м.с. неплотностей 2,4) разрежение в неплотностях не должно опускаться ниже 0,36 Па (на рис. 9, 10, 13 предельная граница разрежения очерчена пунктирной горизонтальной линией). Таким образом, экономично применение байпаса с буферной камерой и хорошей герметизацией укрытий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев, И.Н. Разработка способов снижения объема аспирации при перегрузках сыпучих материалов ковшовыми элеваторами. Сообщение 1. Особенности расчетной схемы аспирации элеваторных перегрузок [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 2. — С. 46–56.
2. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — СПб. : Химиздат, 2005. — 659 с.
3. Минко, В.А. Обеспыливающая вентиляция [Текст] / В.А. Минко, И.Н. Логачев, К.И. Логачев и др. — Т. 2. — Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. — 565 с.
4. Недин, В.В. Борьба с пылью на рудниках [Текст] / В.В. Недин, О.Д. Нейков. — М. : Недра, 1965. — 200 с.

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

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*  
*ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*  
*АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*  
*ТОЛМАЧЕВА Елена Игоревна, инж.*

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

Получено 14.01.14

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

**Logachev Konstantin Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Averkova Olga Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Tolmacheva Elena Igorevna**, engineer; Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **DEVELOPMENT OF METHODS FOR REDUCING THE VOLUME OF ASPIRATION DURING OVERLOADS OF GRANULAR MATERIALS BY BUCKET ELEVATORS**

### **Message 2. THE DECREASE IN VOLUMES OF ASPIRATION**

The schemes of aspiration of elevator overloads have been developing. Balance equations of ventilation of aspiration covers are compiled. The system of equations for determination of the volumes of ventilating air for a standard node overload are formulated and solved. Ways of reducing productivity of aspiration systems are offered and analytically substantiated.

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

### **REFERENCES**

1. Logachev, I.N. Development of methods for reducing the volume of aspiration during overloads of granular materials by bucket elevators. Message 1. Features of the settlement scheme aspiration of elevator overloads [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova, E.I. Tolmacheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 2. — P. 46–56.
2. Logachev, I.N. Aerodynamic basis of suctions [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev. — SPb. : Khimizdat, 2005. — 659 p.
3. Minko, V.A. Dedusting ventilation [Text] / V.A. Minko, I.N. Logachev, K.I. Logachev et al. — Vol. 2. — Belgorod : Printing Office of the V.G. Shukhov State Technology University of Belgorod, 2010. — 565 p.
4. Nedin, V.V. Dust control at mines [Text] / V.V. Nedin, O.D. Neykov. — M. : Nedra, 1965. — 200 p.

УДК 699.86:536.2

В.И. КОСТИН, А.В. КАРМИШКИНА

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТОЛЩИНУ УТЕПЛИТЕЛЯ

Рассмотрена необходимость проведения детального расчета узлов наружных ограждающих конструкций с использованием температурных полей при определении толщины утеплителя.

Ключевые слова: температурные поля, теплотехническая однородность, ограждающие конструкции.

Как известно, система отопления должна компенсировать потери теплоты в холодный период года через наружные конструкции, а при отсутствии механической вентиляции еще и нагревание холодного воздуха. Формула (1), по которой определяют потери теплоты через наружную отапливаемую оболочку здания, была достаточно точной при проектировании теплотехнически однородных конструкций (например, массивных кирпичных стен). При этом сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции в целом  $R$ ,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , определялось простым суммированием значений  $R_i$  отдельных слоев, расположенных перпендикулярно тепловому потоку:

$$Q = A(t_p - t_{ext})(1 + \Sigma \beta)n/R, \quad (1)$$

где  $A$  — расчетная площадь ограждающей конструкции,  $\text{м}^2$ ;  $R$  — сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $t_p$ ,  $t_{ext}$  — расчетные температуры воздуха,  $^\circ\text{C}$ , соответственно в помещении и наружного воздуха для холодного периода года;  $\beta$  — добавочные потери теплоты в долях от основных потерь;  $n$  — коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху.

Современные ограждающие конструкции отличаются большой неоднородностью, за счет разделения слоев на несущий и теплоизоляционный и большого количества конструктивных теплопроводных включений. Поэтому учитывать сумму отдельно взятых компонентов (слоев) в этих случаях будет некорректно, необходимо вводить понижающий коэффициент теплотехнической однородности.

Значение  $R$  определяется в разделе «Мероприятия по обеспечению соблюдения требований энергетической эффективности и требований оснащенности зданий, строений и сооружений приборами учета используемых энергетических ресурсов», являющимся обязательным разделом проектной документации [1]. Порядок определения значения  $R$  регламентируется СНиП 23-02-2003 [2] и СП 50.13330.2012 [3]. Свод правил [3] обязывает учитывать неоднородности наружных ограждающих поверхностей, рассчитанные с помощью температурных полей, п. 5.4 [3], а также оговаривает ус-

ловие, допускающее невыполнение расчета: если данные расчеты выполнены в официальных и общедоступных документах (Приложение Е, п. Е.6 [3]).

Применяемые в настоящее время конструктивные узлы требуют сложных теплотехнических расчетов, невыполнение которых приведет к серьезным ошибкам в выборе толщины тепловой изоляции. Примером может служить здание детского дошкольного учреждения, расположенного в г. Новосибирске. В качестве расчетных условий была принята, согласно п. 5.3 [1], средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,98, составившая  $t_h = -41$  °С, внутренняя температура  $t_b = 22$  °С. Отделка наружных стен выполняется навесным вентилируемым фасадом (далее НВФ). В качестве наружного слоя утеплителя применяются минераловатные плиты Венти-Баттс (коэффициент теплопроводности  $\lambda_A = 0,038$  Вт/(м · °С)), внутреннего слоя — минераловатные плиты Лайт-Баттс ( $\lambda_A = 0,039$  Вт/(м · °С)). Несущими стенами являются продольные и поперечные кирпичные стены. Перекрытия — сборные железобетонные многопустотные плиты. Здание двухэтажное с цокольным техническим этажом. Коэффициент компактности здания  $K_{комп} = 0,57$  м<sup>-1</sup>, остекленности  $f = 0,16$ . С помощью программы ANSYS Mechanical были выполнены расчеты двух- и трехмерных температурных полей, на основании которых вычислено значение теплового потока через следующие участки:

- край плиты покрытия, заделанный в кирпичную кладку и утепленный сверху;
- край плиты перекрытия технического этажа, заделанный в кирпичную кладку и утепленный снизу;
- наружный угол стены;
- стальной анкер, прикрепляющий кронштейны несущей фасадной системы к кирпичной кладке;
- тарельчатые дюбели из стеклопластика, прикрепляющие слой минераловатной плиты к кирпичной кладке;
- верхний, нижний и боковой оконные откосы, образованные кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты и монтажной пены, оштукатуренный изнутри.

Полученные результаты сведены в таблицу, из которой видно, что при подсчете сопротивления теплопередаче без температурных полей учитывается только 49,17 % теплопотерь через наружные стены. Наибольший вклад от неоднородных включений при данных конструктивно-планировочных решениях составляют потери теплоты от парапетной части наружных стен, заделки анкера несущей фасадной системы в наружной стене и заделки плит перекрытий технического этажа в наружной стене. В результате моделирования основных узлов получилось приведенное значение теплопередачи наружных стен  $R_{ct}^{\text{прив}} = 1/0,2522 = 3,965$  м<sup>2</sup> · °С/Вт, при нормируемой величине  $R_{ct}^{\text{норм}} = 3,807$  м<sup>2</sup> · °С/Вт, коэффициент теплотехнической однородности наружных стен составил  $r = 0,124/0,2522 = 0,49$ . Общая толщина минераловатного утеплителя в системе НВФ 280 мм. В рамках статьи приводятся результаты расчета по некоторым неоднородным участкам наружных стен (рис. 1–6).

**Потери тепла через наружные стены с учетом неоднородных включений**

Позиция	Элементы фрагментов	Удельный поток теплоты, от каждого элемента, Вт/(м <sup>2</sup> · °C)	Доля общего потока теплоты через фрагмент, %	Коэффициент теплотехнической однородности от каждого элемента
1	Кирпичная кладка, утепленная слоем минераловатной плиты и наружной отделкой НВФ	0,124	49,17	1,00
2	Край плиты покрытия, заделанный в кирпичную кладку и утепленный сверху	0,0437	17,33	0,739
3	Стальной анкер, прикрепляющий кронштейны несущей фасадной системы к кирпичной кладке	0,0332	13,16	0,789
4	Край плиты перекрытия технического этажа, заделанный в кирпичную кладку и утепленный снизу	0,0252	10,00	0,831
5	Наружный угол стены	0,0134	5,31	0,903
6	Тарельчатые дюбели из стеклопластика, прикрепляющие слои минераловатной плиты к кирпичной кладке	0,005	1,98	0,961
7	Боковой оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты и монтажной пены, оштукатуренный изнутри	0,0040	1,59	0,969
8	Верхний оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты и монтажной пены, оштукатуренный изнутри	0,0019	0,75	0,985
9	Нижний оконный откос, образованный кирпичной кладкой, утепленной слоем минераловатной плиты и монтажной пены, закрытый подоконной доской	0,0018	0,71	0,986
Итого		$1/R^{\text{пр}} = 0,2522$	100 %	

Значение коэффициента теплотехнической однородности  $r = 0,49$  достигнуто благодаря следующим условиям:

— установке светопрозрачных конструкций в слое утеплителя, а не в несущей части стены (рис. 4). Для определения оптимального расположения окна относительно наружного утепления стен были просчитаны несколько вариантов. На рис. 7 представлена зависимость теплопотерь наружной стены с оконным откосом от положения светопрозрачных конструкций относительно плоскости стен. Чем дальше от наружной теплоизоляции установлено окно, тем больше потери теплоты оконного откоса стены. Сама конструкция оконного блока устанавливается на анкерные пластины, закрепленные в несущем слое стены;

— утеплению четверти оконных откосов позволили снизить теплопотери через расчетный узел на 59,50 %. Анализ температурных полей данных узлов показал, что основной утечкой тепла является неутепленный монтажный шов;

— устройству утепленного парапета покрытия плоской кровли с дополнительной теплоизоляцией по периметру наружных стен снизило теплопотери через расчетный узел на 36,20 % (см. рис. 1).

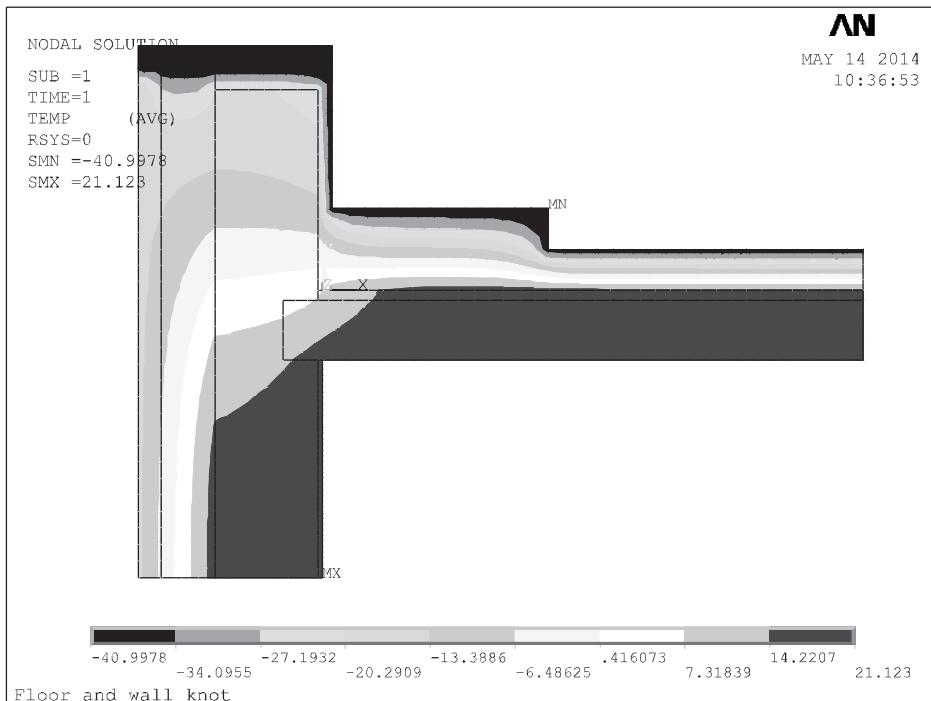


Рис. 1. Температурное поле узла опирания плиты покрытия на наружную стену

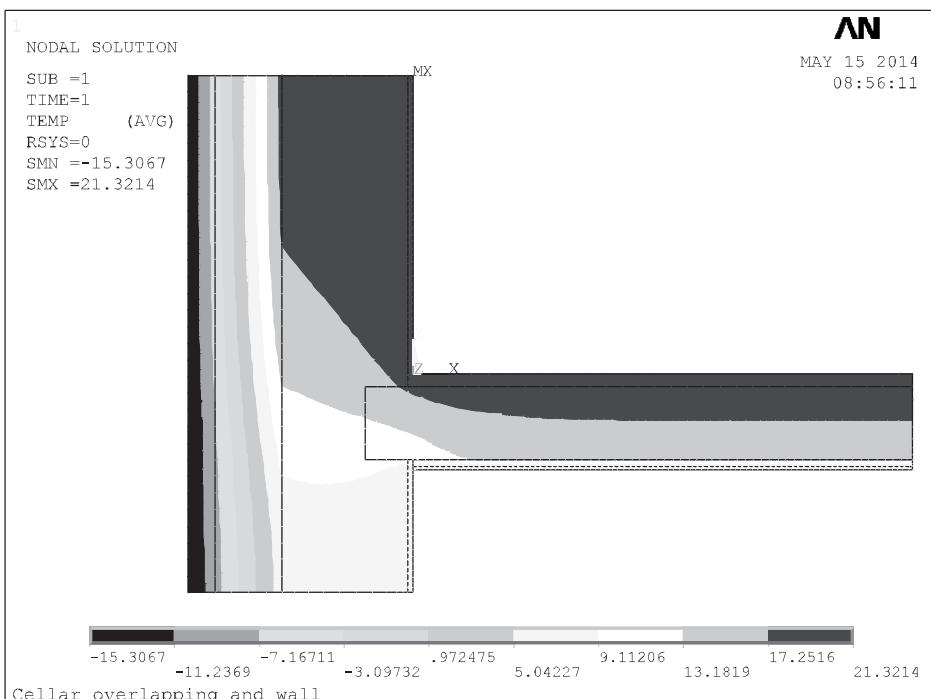
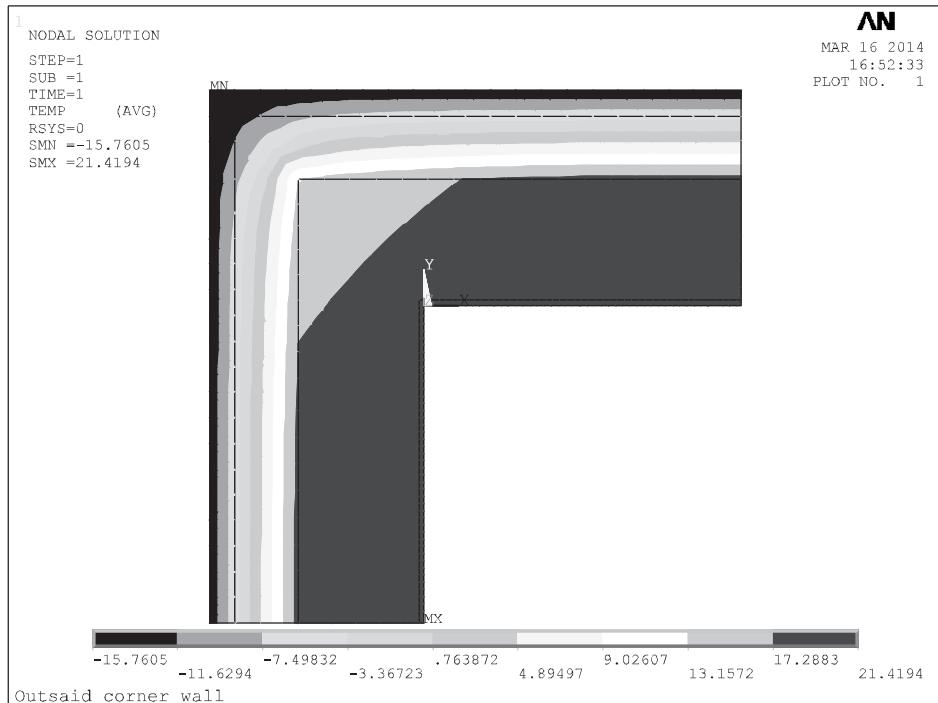
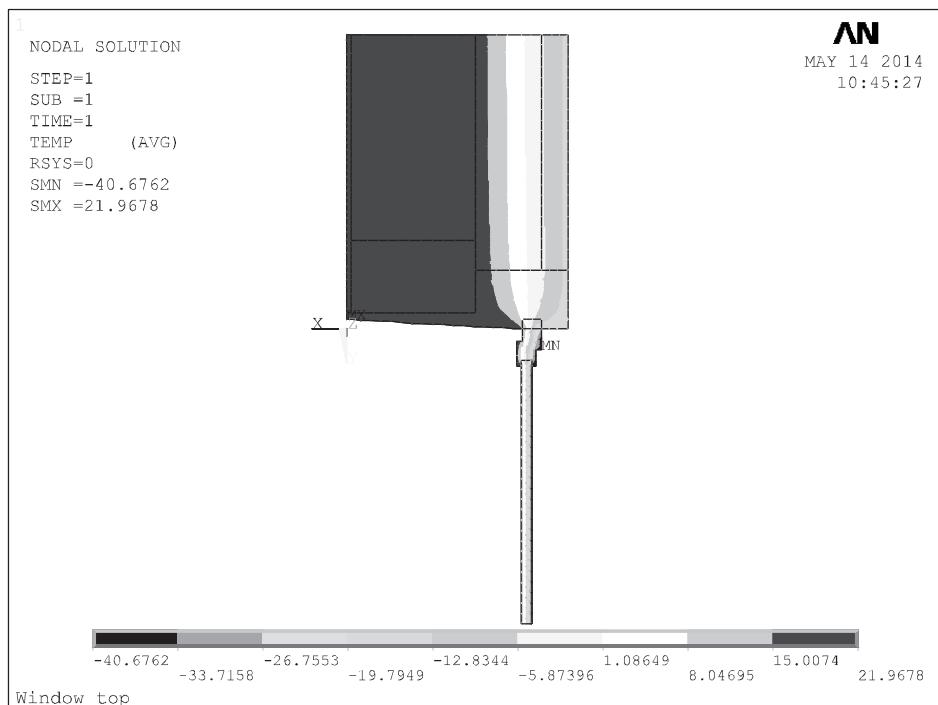


Рис. 2. Температурное поле узла опирания плиты перекрытия технического этажа на наружную стену



*Рис. 3. Температурное поле узла наружного угла стены*



*Рис. 4. Температурное поле узла верхнего оконного откоса с железобетонной несущей перемычкой*

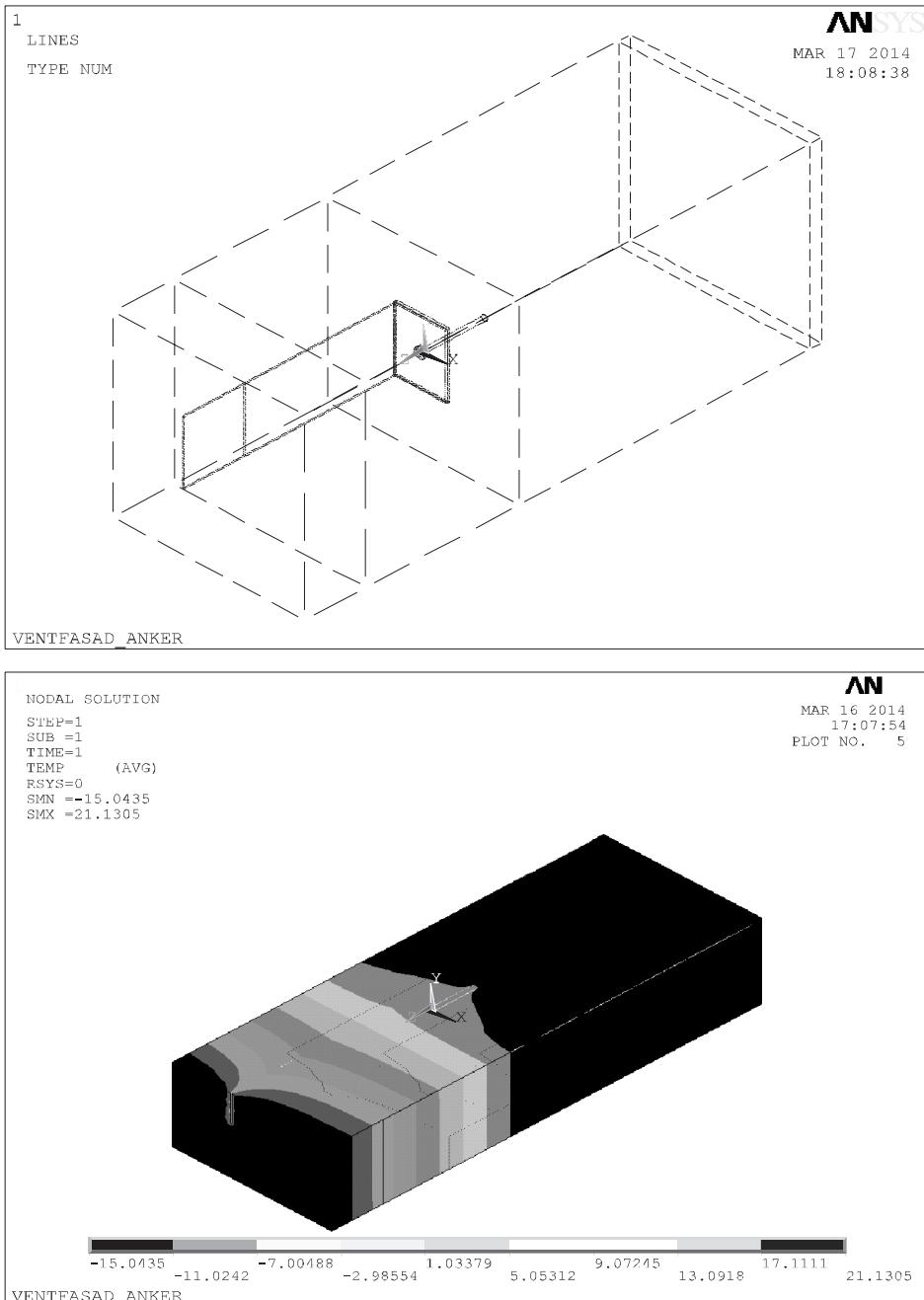


Рис. 5. Схематическое изображение узла крепления анкера несущей фасадной системы к наружной стене (слева) и трехмерное температурное поле узла в разрезе (справа)

Следовательно, при обычных «типовых» проектных решениях без учета анализа и доработок коэффициент теплотехнической однородности  $r$  будет еще ниже.

Без расчета температурных полей толщина утеплителя обычно определяется по формуле (2):

$$\delta_{yt} = (R_{ct}^{\text{норм}} - \sum R_i^{\text{костр.слой}}) \cdot \lambda_{yt}, \quad (2)$$

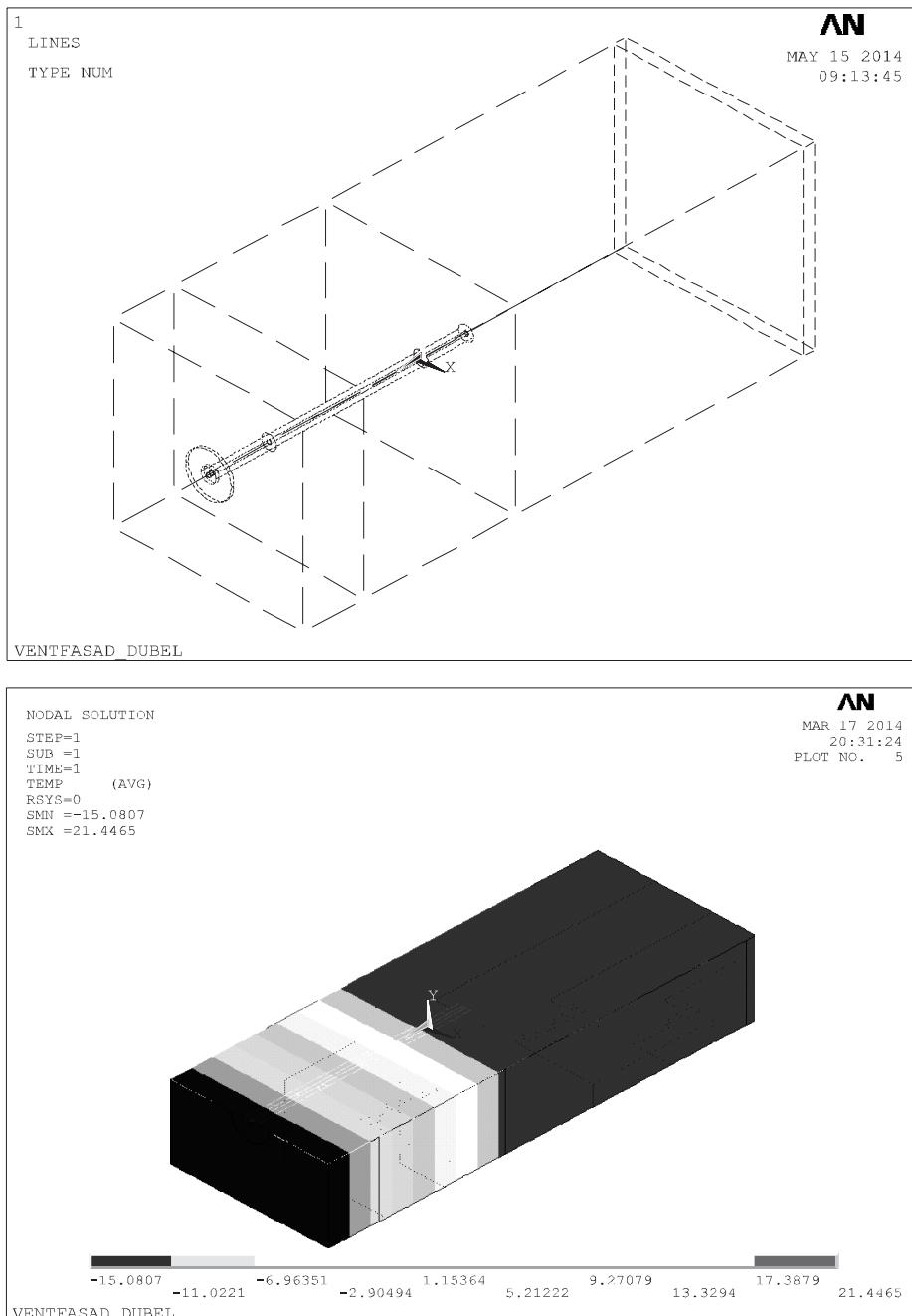


Рис. 6. Схематическое изображение узла крепления утеплителя тарельчатым дюбелем к наружной стене (слева) и трехмерное температурное поле узла в разрезе (справа)

$$\delta_{yt} = \left( 3,807 - \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,76} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{1}{10,8} \right) \right) \cdot 0,039 = 0,12 \text{ м.}$$

В качестве конструктивных слоев принят штукатурный слой толщиной 15 мм и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_A = 0,76 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  и кирпичная кладка толщиной 380 мм и коэффициентом теплопроводности

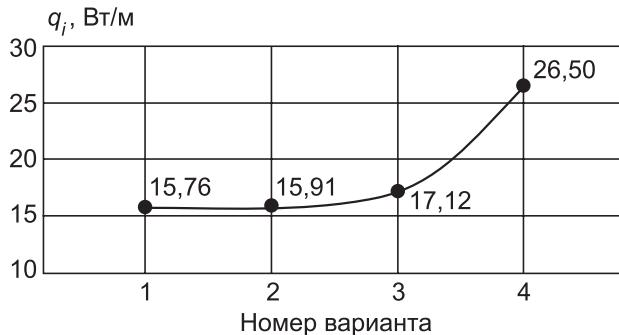


Рис. 7. Зависимость тепловых потерь от расположения светопрозрачных конструкций в плоскости наружных стен

1 — оконный блок расположен в плоскости утеплителя; 2–4 — сдвиг оконного блока на 50, 100, 150 мм соответственно от наружной поверхности утеплителя внутрь толщи стены

$\lambda_A = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ . Полученная толщина утеплителя в 2 раза меньше толщины, определенной с учетом неоднородностей ограждающих конструкций.

**Выводы.** Необходимо изменить технологию проектирования, и окончательное решение в выборе конструктивных узлов должно приниматься после теплотехнических расчетов. Тогда применение актуализированного свода правил [3] позволит еще на стадии проектирования отнести все худшие решения, сэкономив при этом на строительных ресурсах, затратах на исправления дефектов и обеспечив соблюдение требуемых температур воздуха в помещении и сохранность строительных конструкций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию [Текст] : Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 26.03.2014 № 230) // Собрание законодательства РФ. — № 8. — С. 744.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст]. — Введ. 2003-10-01. — М. : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. — 30 с.
3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 [Текст]. — Введ. 2013-07-01. — М. : Минрегион России, 2012. — 100 с.

*КОСТИН Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КАРМИШКИНА Анна Валентиновна, инж.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 20.01.14

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

**Karmishkina Anna Valentinovna**, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **THE INFLUENCE OF QUANTITY HEAT ENGINEERING UNIFORMITY OF BUILDING ENVELOPES ON THICKNESS INSULATION**

The necessity of carrying out detailed calculation nodes external fencing structures in the determination of thickness insulation by using the temperature fields.

**Key words:** temperature fields, heat engineering uniformity, building envelopes.

### **REFERENCES**

1. On the composition of the sections of the project documentation and requirements to their contents [Text] : Resolution of the Government of the Russian Federation of 16 February 2008 N 87 (as amended Regulations of the RF government of 26.03.2014 N 230) // Collection of legislation of the Russian Federation. — 2008. — N 8. — P. 744.
  2. Building Code 23-02-2003. Thermal protection of buildings [Text]. — Enacted 2003-10-01. — M. : Gosstroy, FSUE Center for design products, 2004. — 30 p.
  3. Formulary 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated edition Building Code 23-02-2003 [Text]. — Enacted 2013-07-01. — M. : Ministry of Regional Development of Russia, 2012. — 100 p.
-

УДК 697.34:697.444

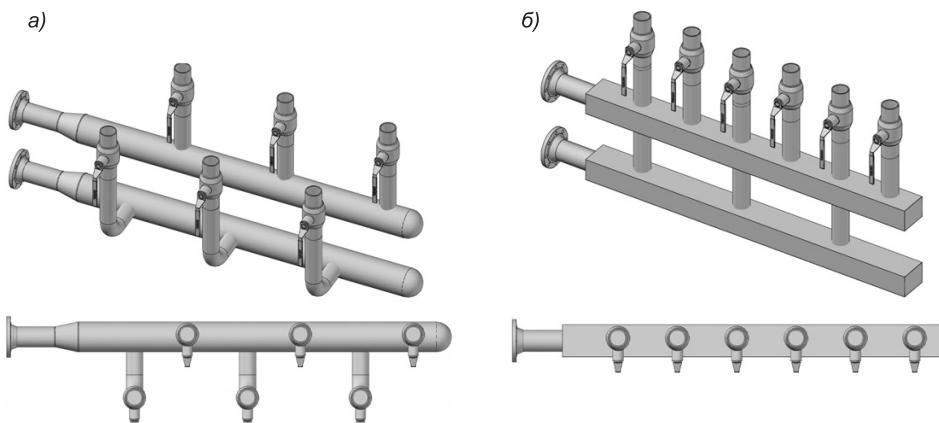
Т.Л. РОХЛЕЦОВА, Л.А. КИЯНИЦА, Д.В. РОГОВ

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГРЕБЕНОК ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ИЗ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В ЦТП И ИТП

Возможность применения труб квадратного сечения для распределительных гребенок теплоснабжения в ЦТП и ИТП исследована на основании моделирования распределения и падения (повышения) температур и напоров по длине как самой гребенки, так и присоединенных к ней патрубков теплопотребляющих систем с помощью программного пакета Solid Works Flow Simulation.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, ЦТП, ИТП, распределительная гребенка.

В современных условиях при строительстве тепловых пунктов применяют модульную технологию. Как правило, тепловой пункт должен быть размещен в помещении минимальной площади и объема, что требует от проектировщиков очень продуманного и компактного размещения всего теплотехнического оборудования ИТП или ЦТП. Присоединение теплопотребляющих систем осуществляется через камеру выравнивания давления — гребенку, площадь сечения которой должна быть не менее суммы площадей присоединяемых патрубков. Присоединение патрубков к гребенке должно осуществляться в одном направлении вверх. Нижняя врезка отводящих и подводящих трубопроводов в коллектор не рекомендуется [1]. В соответствии с этими рекомендациями распределительная гребенка имеет вид, представленный на рис. 1, а. При этом на обвод трубопроводами, присоединенными к нижней и верхней гребенке, тратится значительная доля как площади, так и объема помещения и ТП. Причем чем больше диаметр гребенки и диаметры патрубков, тем больше места требуется на размещение гребенки в помещении и ТП.



*Рис. 1. Общий вид распределительной гребенки в тепловом пункте*  
*а — традиционный вариант присоединения патрубков к круглой трубе; б — исследуемый вариант присоединения патрубков к трубе прямоугольного сечения*

Для более компактного размещения трубопроводов и теплотехнического оборудования в ТП предлагаются использовать распределительные гребенки из труб квадратного или прямоугольного сечения без обвода присоединяемых патрубков, а пропуская патрубки, присоединяемые к нижней гребенке, напрямую через верхнюю гребенку (рис. 1, б). С точки зрения технологии монтажа такая конструкция гребенки не представляет сложности: трубопроводы легко ввариваются в плоскую стенку прямоугольной трубы. С точки зрения теплотехники и гидравлики такая конструкция гребенки требует анализа и обоснования.

Для обоснования возможности применения гребенок такой конструкции был проведен численный эксперимент, в ходе которого проводилось моделирование процессов теплопередачи и гидравлики в Solid Works Flow Simulation.

Моделирование проводилось для следующих условий:

1) эквивалентный диаметр гребенки прямоугольного сечения принимался наиболее ходовых типоразмеров: 50, 100 и 200 мм;

2) расчетный температурный график тепловых сетей: а)  $T_{1p} = 150^{\circ}\text{C}$ ; б)  $T_{1p} = 110^{\circ}\text{C}$ ; в) температуры воды в тепловой сети в точке «срезки» при температуре наружного воздуха, когда температура воды в сети  $T_{1n} = 70^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{2n} = 42^{\circ}\text{C}$ .

Для каждого условного диаметра гребенки, каждого графика температур воды в тепловой сети были получены зависимости:

- повышения температуры теплоносителя в патрубках при прохождении через верхнюю гребенку;

- понижения температуры теплоносителя в верхней гребенке (подающей);

- повышения температуры теплоносителя в нижней гребенке (обратной);

- падения давления в верхней гребенке (подающей).

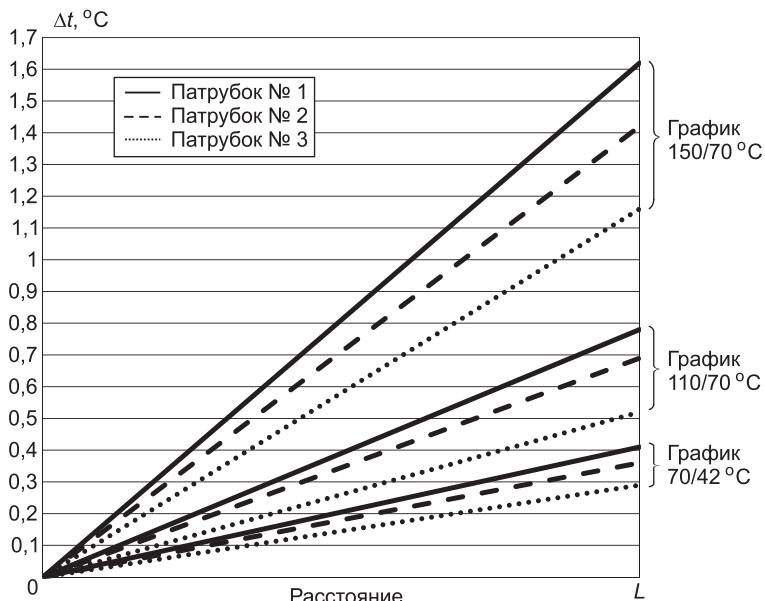
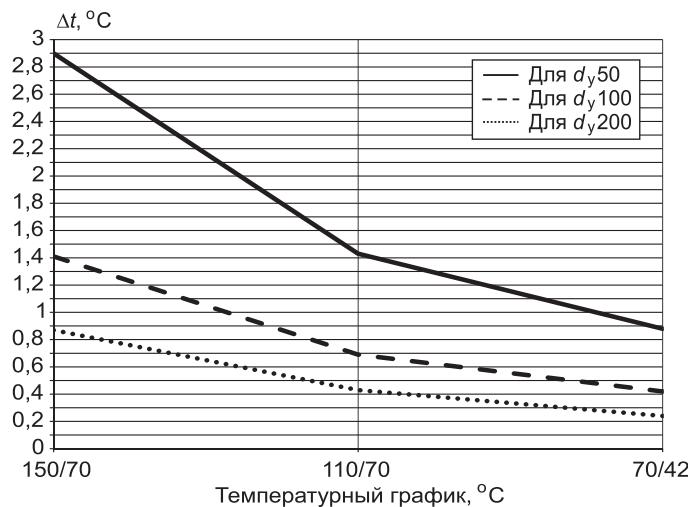


Рис. 2. Повышение температуры воды в обратных патрубках теплопотребляющих систем при прохождении через подающую гребенку

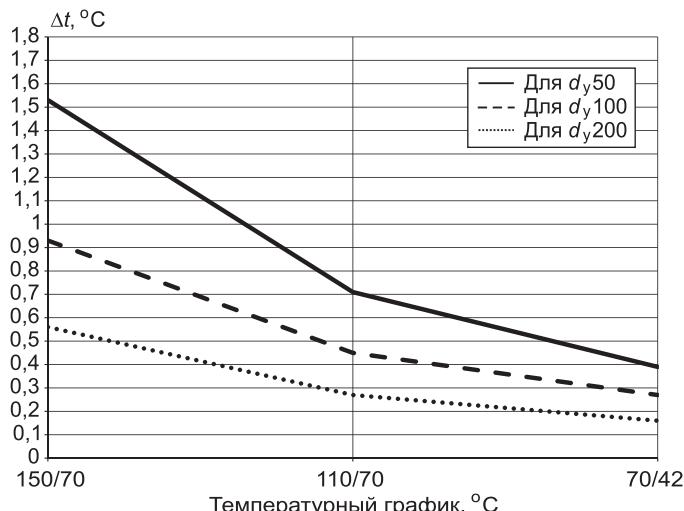
Результаты обработки тепловых расчетов представлены в виде графиков на рис. 2–4, а результаты обработки гидравлических расчетов даны в таблице.

Из анализа графиков рис. 2–4 и таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Применение гребенок прямоугольного сечения с эквивалентным диаметром менее 100 мм не рекомендуется, так как: а) по длине гребенки наблюдается значительное падение давления; гребенка перестает выполнять свою основную функцию — быть камерой постоянного давления; б) резко понижается температура воды в подающих патрубках теплопотребляющих систем; неучет этого явления приведет к «недотопу» в теплопотребляющих системах.



*Рис. 3. Понижение температуры воды в подающем трубопроводе гребенки при прохождении через нее обратных патрубков теплопотребляющих систем*



*Рис. 4. Повышение температуры воды в обратном трубопроводе гребенки*

**Потери давления в подающей гребенке при пропуске через нее патрубков теплопотребляющих систем**

Условный диаметр гребенки, мм	$d_y$ 50	$d_y$ 100	$d_y$ 200
Падение давления в подающей гребенке при пропуске через нее патрубков, Па	787	311	196

2. Применение гребенок прямоугольного сечения целесообразно при эквивалентном диаметре более 100 мм. Причем чем больше эквивалентный диаметр гребенки, тем меньше влияние проходящих патрубков через подающую гребенку как на гидравлику, так и на изменение температур.

3. Понижение температуры теплоносителя в подающей гребенке для эквивалентных диаметров более 100 мм даже для высокотемпературных графиков не превышает 1,5 °С при расчетных температурах наружного воздуха и 0,5 °С при температуре наружного воздуха, соответствующей перелому графика температур воды в тепловой сети. С учетом того, что расчетная температура наружного воздуха держится очень непродолжительное число дней в течение отопительного сезона, понижением температуры воды в подающей гребенке можно пренебречь.

В заключение следует отметить, что приведенные результаты являются иллюстрацией возможности и целесообразности применения распределительных гребенок прямоугольного сечения с эквивалентным диаметром более 100 мм рассматриваемой конструкции (см. рис. 1, б) при компоновке тепломеханического оборудования в тепловых пунктах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов [Текст] — М. : Госстрой России, 2004.

*РОХЛЕЦОВА Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*КИЯНИЦА Лаврентий Александрович, студ.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*РОГОВ Данила Викторович, инж., руководитель группы инженеров по расчетам  
тепловых пунктов  
ООО «ГЕА Машимпэкс», г. Новосибирск*

Получено 12.01.14

**Rohletsova Tatiana Lavrentevna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kianitsa Lavrentiy Alexandrovich**, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Rogov Danila Viktorovich**, engineer, head of the Heating unit estimation group LLC «GEA Mashimpeks», Novosibirsk, Russia

## **APPLICATION POTENTIAL OF HEAT DISTRIBUTION HEADER OUT OF RECTANGULAR PIPES IN CHS AND IHU**

Application potential of rectangular pipes for heat distribution header in CHS and IHU analyzed on the basis of simulating the distribution and increase (decrease) of temperatures and pressure drop along the length of both the header and connecting nozzles of heat-consuming systems using Solid Works Flow Simulation software package.

**Key words:** heating, CHS (Central Heating System), IHU (Individual Heating Unit), distribution header.

### **REFERENCES**

1. СП 41-101-95. Designing heating system. — М. : Gosstroy of Russia, 2004.
-

**УДК 697.132.2**

**О.Д. САМАРИН**

## **О ПОДТВЕРЖДЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ РАСЧЕТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НАРУЖНОГО КЛИМАТА**

Рассмотрены вероятностно-статистические закономерности соотношения параметров наружного климата в холодный период года. Подтверждена полученная ранее статистическая связь градусо-суток отопительного периода и температуры наружного воздуха с использованием данных СП 131.13330.

**Ключевые слова:** температура, отопительный период, градусо-сутки, аппроксимация, коэффициент корреляции.

Вероятностно-статистические соотношения между расчетными параметрами наружного климата необходимы для расчетов и принятия оптимальных решений по энергосбережению в случае, если одновременно используется несколько различных климатических параметров, например, температура наиболее холодной пятидневки и средняя температура отопительного периода, а проводимые многовариантные расчеты требуют установления функциональной связи между данными параметрами. Особенno это характерно для расчетов по укрупненным показателям, что неизбежно на начальной стадии проектирования, в том числе на этапе ТЭО. В таких ориентировочных расчетах, особенно если они имеют большой объем, целесообразно в наибольшей степени сократить количество исходных данных.

В работе [1] автором были предложены выражения, связывающие основные параметры холодного периода года — среднюю температуру наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92  $t_{h5}$ , среднюю температуру наружного воздуха за отопительный период  $t_{op}$  и его продолжительность  $z_{op}$  для граничной температуры начала и конца этого периода, равной +8 °C, а также градусо-сутки отопительного периода ГСОП по климатическим данным для 150 городов РФ из СНиП 23-01-99\* «Строительная климатология». Они имеют следующий вид:

$$t_b - t_{op} = (0,484 \pm 0,046)(t_b - t_{h5}), \text{ °C}; \quad (1)$$

$$\text{ГСОП} = (2,05 \pm 0,18)(t_b - t_{h5})^2, \text{ К·сут}. \quad (1a)$$

Здесь  $t_b$  — расчетная температура внутреннего воздуха в зданиях. Ее значение при установлении зависимостей (1), (1a) было принято равным +18 °C, что соответствует среднему уровню для основной части гражданских зданий по требованиям ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». Коэффициент корреляции в первом случае составляет 0,997, во втором — 0,99, т.е. они чрезвычайно близки к единице, поэтому можно говорить о практической достоверности полученных результатов. Общий вид зависимости (1) был

ранее приведен в работе [2], но с более приближенным числовым коэффициентом 0,5, а структура соотношения (1а) была получена автором, исходя из сопоставления (1) и аналогичной по характеру прямой пропорциональности между  $z_{\text{оп}}$  и  $(t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})$ .

Однако в 2013 г. была принята и введена в действие актуализированная редакция СНиП 23-01 — свод правил СП 131.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* «Строительная климатология». Поэтому, безусловно, требуется проверка и при необходимости уточнение формул (1), (1а) с использованием данных СП 131.13330. Сделать это можно таким же образом, как и при получении соотношений (1), (1а), а именно с помощью регрессионного анализа. На рис. 1 представлено поле корреляции разностей температур  $(t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})$  и  $(t_{\text{в}} - t_{\text{H5}})$ , а на рис. 2 — поле корреляции ГСОП =  $z_{\text{оп}}(t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})$  и квадрата разности  $(t_{\text{в}} - t_{\text{H5}})^2$ . В первом

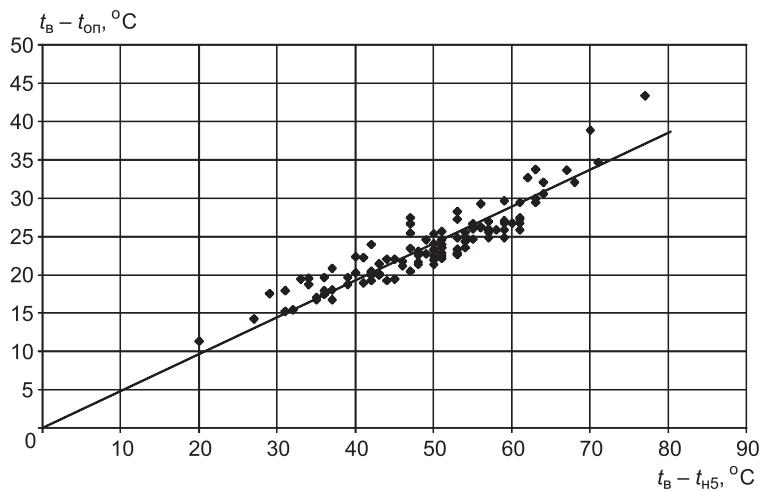


Рис. 1. Корреляционная связь средней  $(t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})$  и расчетной  $(t_{\text{в}} - t_{\text{H5}})$  разности температур внутреннего и наружного воздуха. Сплошная линия — аппроксимация по (2)

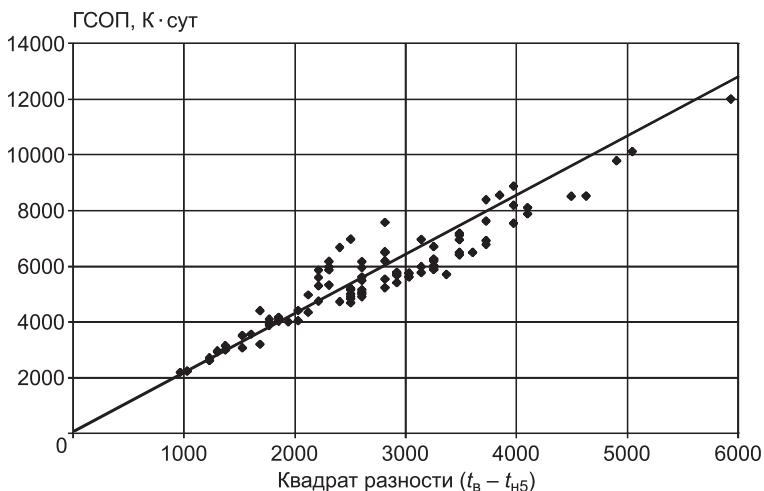


Рис. 2. Корреляционная связь градусо-суток отопительного периода ГСОП и величины  $(t_{\text{в}} - t_{\text{H5}})^2$ . Сплошная линия — аппроксимация по (2a)

случае использованы данные для 110 городов РФ из СП 131.13330, для которых была обновлена климатическая информация при пересмотре [1], во втором — для 97, с исключением из рассмотрения некоторых наиболее южных городов, для которых наблюдаются существенные отклонения от общей зависимости для ГСОП.

Соответствующие корреляционные соотношения можно представить в следующем виде:

$$t_{\text{в}} - t_{\text{оп}} = (0,485 \pm 0,043)(t_{\text{в}} - t_{\text{н5}}), ^{\circ}\text{C}; \quad (2)$$

$$\text{ГСОП} = (2,11 \pm 0,24)(t_{\text{в}} - t_{\text{н5}})^2, \text{К} \cdot \text{сут}. \quad (2a)$$

Коэффициенты корреляции равны соответственно 0,92 и 0,94, т.е. несколько ниже, чем в предыдущем случае, но тоже достаточно велики. Их снижение можно объяснить уменьшением числа использованных статистических данных. Тем не менее легко видеть, что формулы (2), (2a) в пределах выявленного среднеквадратического отклонения  $\sigma$  не отличаются от составленных по значениям, приведенным в [1]. Заметим, что если сделать пересчет величины  $\sigma$  из выражения (2a) на число наблюдений, использованных при выводе (1a), находим

$$\sigma_{1a} = \sigma_{2a} \sqrt{(97-1)(150-1)} = 0,19 [3],$$

что практически совпадает с полученным для (1a). Иначе говоря, больший разброс результатов, даваемых зависимостью (2a), тоже объясняется меньшим объемом использованной статистики. А при пересчете отклонения из (2) оказывается, что

$$\sigma_{1a} = \sigma_{2a} \sqrt{(110-1)(150-1)} = 0,037$$

даже ниже, чем в (1), т.е. несмотря на уменьшение количества принятых наблюдений, корреляция между  $(t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})$  и  $(t_{\text{в}} - t_{\text{н5}})$  по данным СП 131.13330 оказывается даже более четкой, чем по СНиП 23-01.

Таким образом, обнаруженные результаты дают основания считать, что основные параметры наружного климата в процессе его потепления меняются согласованно, и установленные между ними зависимости сохраняют свою силу, подтверждая тем самым предложенную в [4] вероятностно-статистическую модель. Чрезвычайная статистическая устойчивость полученных соотношений и практическая независимость их числовых коэффициентов от абсолютных значений климатических параметров доказывают закономерный характер выявленных корреляционных связей. Корни данных закономерностей лежат в особенностях вероятностного распределения температур наружного воздуха в течение года, причем эти особенности не зависят от района строительства, а значит, от конкретного температурного диапазона [4].

Погодные условия формируются под влиянием большого количества достаточно независимых факторов, действие которых суммируется. Но тогда в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей [3] сумма должна подчиняться нормальному закону. То же самое можно утверждать, исходя из существенной турбулентности атмосферных течений, влияющих на погодные процессы. При этом характерно, что в соответствии со способом получения рассматриваемого результата данный закон относится не только к чисто стохастической компоненте изменения срочной температуры наружного воздуха  $t_{\text{н}}$ , т.е. к ее текущему отклонению от среднемноголетнего значения для той или иной даты, но и к

колебаниям  $t_n$  в целом, хотя последние, на первый взгляд, содержат явно закономерную (в первом приближении синусоидальную) сезонную составляющую [5].

Соотношения (2), (2а) можно применять в расчетах энергопотребления системами обеспечения микроклимата здания, причем не только отоплением, но и вентиляцией, и системами кондиционирования воздуха. Кроме того, они имеют простой инженерный вид и требуют минимального объема исходной информации, а потому могут быть рекомендованы для использования в инженерной практике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин, О.Д. Термофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность [Текст] / О.Д. Самарин. — М. : Изд-во АСВ, 2011. — 296 с.
2. Соловьев, С.П. Рекомендации по проектированию светопрозрачных ограждений общественных зданий массового строительства [Текст] / С.П. Соловьев, С.И. Пермяков, Б.А. Крупнов. — ЦНИИЭП учебных зданий. — М. : Стройиздат, 1989. — 136 с.
3. Мацкевич, И.П. Высшая математика. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / И.П. Мацкевич, Г.П. Свирид. — Минск: Вышэйшая школа, 1993. — 270 с.
4. Кувшинов, Ю.Я. Основы обеспечения микроклимата зданий [Текст] / Ю.Я. Кувшинов, О.Д. Самарин. — М. : Изд-во АСВ, 2012. — 200 с.
5. Самарин, О.Д. О вероятностно-статистическом моделировании взаимосвязи расчетных параметров наружного климата [Текст] / О.Д. Самарин // Сб. докл. конф. НИИСФ. — 2001. — С. 312–318.

*САМАРИН Олег Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.  
Московский государственный строительный университет*

Получено 16.01.14

**Samarin Oleg Dmitrievich**, candidate of technical sciences, assistant professor,  
Moscow State University of Civil Engineering, Russia

#### ON VERIFYING OF PROBABLE AND STATISTICAL CORRELATION BETWEEN DESIGN PARAMETERS OF EXTERNAL CLIMATE

Probable and statistical relationships for the parameters of external climate in the cold season are considered. The earlier obtained statistical relationship of the degree-day of the heating season with the external air temperature is verified.

**Key words:** temperature, heating season, degree-day, approximation, correlation coefficient.

#### REFERENCES

1. Самарин, О.Д. Термофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность [Текст] / О.Д. Самарин. — М. : Publishing house ASV, 2011. — 296 p.
2. Соловьев, С.П. Guideline to design of transparent constructions in civic buildings of mass production [Text] / S.P. Solovyev, S.I. Permyakov, B.A. Krupnov. — CNIIEP of educational buildings. — M. : Stroyizdat, 1989. — 136 p.
3. Мацкевич, И.П. Higher mathematics. Theory of probability and mathematical statistics [Text] / I.P. Matskevich, G.P. Svirid. — Minsk : Higher school, 1993. — 270 p.
4. Кувшинов, Ю.Я. The foundations of building microclimate provision [Text] / Yu.Ya. Kuvshinov, O.D. Samarin. — M. : Publishing house ASV, 2012. — 200 p.
5. Самарин, О.Д. On probable and statistical modeling of mutual relation of the design parameters of external climate [Text] / O.D. Samarin. — Pap. of the conf. of the NIISF. — 2001. — P. 312–318.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.524.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ,  
Е.И. КРУТИКОВ, Д.А. ПОПОВ

### ДРОССЕЛЬНО-БЕЗЗОЛОТНИКОВЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрены некоторые варианты оригинальных пневматических механизмов ударного действия с элементами усовершенствования.

Ключевые слова: пневматический ударный механизм, камера рабочего хода, камера холостого хода, распределительная камера, камера сетевого воздуха, управляющий впуском стержень.

**Введение.** Материалы включают краткое описание и особенности совершенствования известных решений [1, 2] с применением известных классификационных признаков [3]. Приведены физико-математическое описание и основные баро- и термодинамические ограничения синтезированного пневматического механизма ударного действия.

Аналогами для усовершенствования механизмов послужили пневматические ударные механизмы [4, 5]. Указанные механизмы содержали кольцевую камеру атмосферного давления воздуха со стороны рабочего хода ударника ступенчатой формы. Таким образом, в камерах не формировался силовой импульс от давления воздуха и механизмы не реализовывали достаточно высоких энергий единичного удара.

Однако механизм [5] не содержал жесткого закрепления стержня относительно фланца, а следовательно, корпуса, чем исключались перекосы в паре штоковая часть ударника — поршневая часть стержня (клапана), деформация и поломка стержня и предполагалось увеличение ресурса механизма. Увеличить энергию единичного удара представляется возможным за счет увеличения подачи сжатого воздуха в кольцевую камеру посредством дополнительного канала, выполненного на боковой поверхности штоковой части ударника.

**Усовершенствованные технические решения механизма.** Рассмотрены варианты усовершенствованных механизмов [1, 2].

Пневматический ударный механизм [1] (рис. 1, а, б) включает цилиндрический корпус 1 с втулкой 2 и выпускными каналами 3, 4, рабочий инструмент 5 с хвостовиком 6, ступенчатый ударник 7 со штоковой 8 и основной 9 частями со сквозным отверстием 10 и втулкой 11 с каналом-пазом 12 в штоковой части ступенчатого ударника. Ступенчатый ударник разделяет полость цилиндрического корпуса на кольцевую камеру 13 рабочего хода со стороны штоковой части ударника, камеру 14 хо-

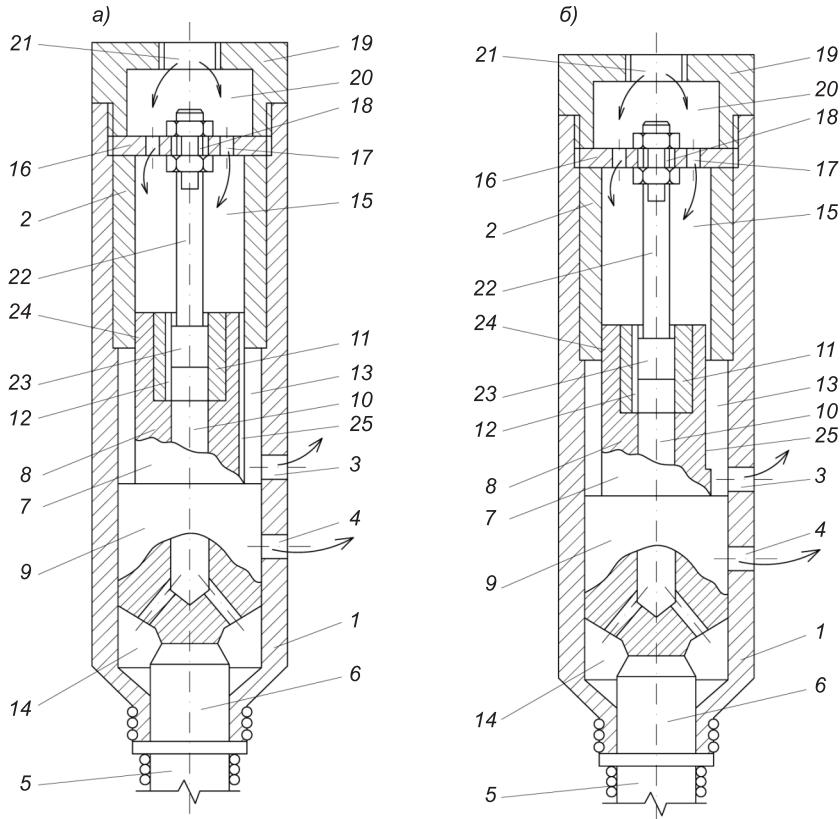


Рис. 1. Пневматический ударный механизм с дроссельно-беззолотниковым воздухораспределением [1]

лостого хода со стороны хвостовика рабочего инструмента и кольцевую распределительную камеру 15 во втулке цилиндрического корпуса со стороны штоковой части ударника.

Кольцевой фланец 16 выполнен с каналом 17 подвода воздуха в кольцевую распределительную камеру и сквозным осевым отверстием 18. Крепежный стакан 19 закреплен относительно цилиндрического корпуса. Камера 20 сетевого воздуха образована стаканом с воздухоподводящим каналом 21 и кольцевым фланцем. Стержень 22, закрепленный в сквозном осевом отверстии кольцевого фланца, с поршневой частью 23, постоянно находящейся в сквозном отверстии ударника, взаимодействует с каналом-пазом и втулкой поршня. Стержень поршневой частью соединяет периодически, в зависимости от положения ступенчатого ударника, распределительную камеру и камеру холостого хода между собой. На участке взаимодействия кольцевой ступени втулки цилиндрического корпуса со штоковой частью поршня выполнен кольцевой зазор 24 с расчетным проходным сечением, а на штоковой части поршня выполнен дроссельный перепускной канал-паз 25 (рис. 1, а), постоянно сообщающий кольцевую распределительную камеру с кольцевой рабочей камерой. Дроссельный перепускной канал-паз на штоковой части поршня может быть выполнен в поперечном сечении прямоугольной, квадратной, трапециальной, овальной, треугольной форм и в виде лыски (рис. 1, б).

Техническое предложение позволяет исключить перекосы в контактной паре штоковой части поршня и втулки корпуса за счет кольцевого зазора (дросселя) и повысить ресурс механизма; в расчетном режиме работы механизма обеспечить за счет паза или лыски на штоковой части ударника подачу необходимого количества воздуха для создания расчетного силового импульса давления воздуха со стороны кольцевой камеры рабочего хода.

Механизмам [1, 2, 4], как и подобным механизмам [3], свойственен общий недостаток: жестко закрепленный стержень относительно фланца-крышки корпуса. Это обуславливает при нагружении соосности трех деталей — корпуса, ступенчатого ударника и стержня изменение режима работы пневматического ударного механизма за счет создававшегося дополнительного трения между контактирующими парами, деформаций, поломок стержня и снижения ресурса механизма.

Техническое решение пневматического ударного механизма 5 устраняет недостатки механизмов [1, 2, 4] в части жесткого закрепления стержня. Устройство [5] и его работа с учетом ранее описанных механизмов и им подобных излагается в сокращенном виде и поясняется рис. 2.

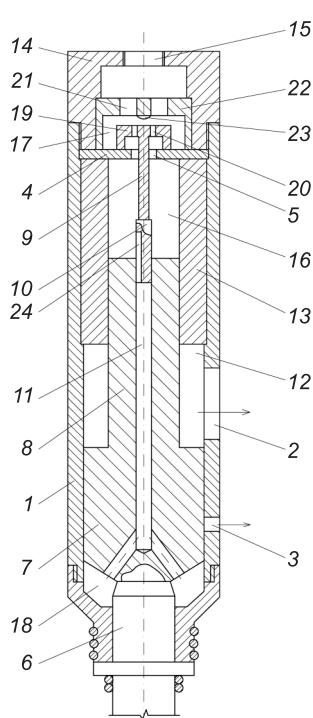


Рис. 2. Пневматическое устройство ударного действия [5]

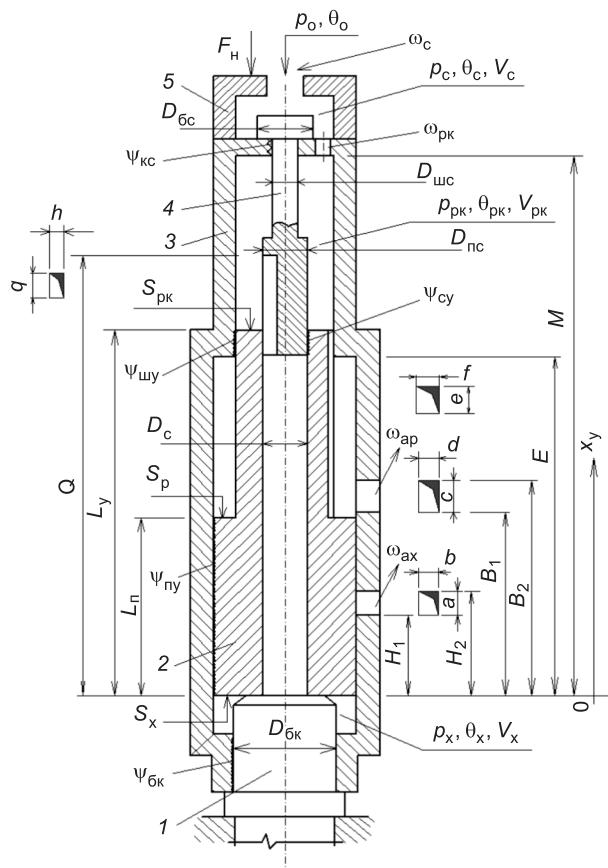


Рис. 3. Расчетная схема пневматического ударного механизма с дроссельно-беззолотниковым воздухораспределением

1 — хвостовик; 2 — ударник; 3 — корпус; 4 — стержень; 5 — крышка

Пневматический ударный механизм включает цилиндрический корпус 1 с выпускными каналами 2, 3, кольцевой фланец 4 со сквозным центральным отверстием 5, рабочий инструмент с хвостовиком 6, ступенчатый ударник 7 со штоковой частью 8, установленный в центральном отверстии кольцевого фланца, стержень 9 с поршневой частью 10, постоянно находящейся в сквозном осевом отверстии 11 ступенчатого ударника, кольцевую камеру 12 пневматического буфера, втулку 13 цилиндрического корпуса с отверстием для пропуска штоковой части и образующую со стороны кольцевой камеры пневматического буфера кольцевой перешеек, ограничивающий величину перемещения ступенчатого ударника, закрепленный относительно цилиндрического корпуса стакан 14 с каналом 15 для подвода воздуха, кольцевую распределительную камеру 16 во втулке цилиндрического корпуса, камеру 17 сетевого воздуха со стороны кольцевого фланца, камеру 18 холостого хода со стороны хвостовика рабочего инструмента, удерживаемого пружиной относительно цилиндрического корпуса. Стержень установлен в центральном отверстии кольцевого фланца с расчетным калиброванным зазором относительно поверхности штоковой части стержня, снабженного со стороны камеры сетевого воздуха буртиком 19 со сквозными отверстиями 20 с проходным сечением не менее проходного сечения калиброванного зазора и проходного сечения сквозных отверстий 21 впуска в камеру сетевого воздуха, образованную кольцевым фланцем и установленной крышкой 22 со стопором 23, ограничивающим величину осевого перемещения стержня, опертой и закрепленной стаканом относительно кольцевого фланца и цилиндрического корпуса, а канал 24, соединяющий периодически камеру холостого хода и кольцевую распределительную камеру, выполнен на поршневой части стержня.

Техническое решение позволяет увеличить ресурс стержня и штоковой части ударника и пневматического ударного механизма в целом.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 3) введены следующие обозначения для параметров синтезированного ударного механизма.

Объемы камер:

$V_c$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_p$ ,  $V_x$  — соответственно объемы камер сетевой, распределительной, рабочего и холостого ходов.

Давление воздуха в камерах, сети и окружающем пространстве (атмосфере):

$p_c$ ,  $p_{pk}$ ,  $p_p$ ,  $p_x$ ,  $p_o$  — соответственно давление воздуха в камерах  $V_c$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_p$ ,  $V_x$  и сети.

Температура воздуха в камерах и сети:

$\theta_c$ ,  $\theta_{pk}$ ,  $\theta_p$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_o$  — соответственно температура в камерах  $V_c$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_p$ ,  $V_x$  и сети.

$D_{bc}$ ,  $D_{shc}$ ,  $D_c$ ,  $D_{bk}$  — соответственно диаметры буртика стержня, штока стержня, канала в ударнике, буксы корпуса.

Параметры впуска воздуха в камеры:

$\omega_c$ ,  $\omega_{pk}$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_x$  — площади дросселей впуска воздуха между камерами: из сети в камеру сетевого воздуха, в камеру регулирования впуском из камеры сетевого воздуха, в кольцевую камеру рабочего хода из камеры регулирования, в камеру холостого хода из камеры регулирования впуском.

Параметры выпуска воздуха из камер:

$\omega_{ap}$ ,  $\omega_{ax}$  — площади геометрических сечений каналов выпуска в атмосферу (или окружающее пространство в виде камеры выпуска или пространство скважины) из камер рабочего и холостого хода.

Бародинамические параметры процессов впуска и выпуска воздуха:

$\Phi_c$ ,  $\Phi_{pk}$ ,  $\Phi_p$ ,  $\Phi_x$ ,  $\Phi_{ap}$ ,  $\Phi_{ax}$  — соответственно для геометрических площадей  $\omega_c$ ,  $\omega_{pk}$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_{ap}$ ,  $\omega_{ax}$ .

Перетечки воздуха между камерами посредством возможных зазоров между парами характеризуются их площадями и бародинамическими параметрами, учет которых выполним, применив обозначения:

$\Psi_{kc}$ ,  $\Psi_{sh}$ ,  $\Psi_{cy}$ ,  $\Psi_{pu}$ ,  $\Psi_{bk}$  — соответственно площади зазоров: корпус — стержень, штоковая часть ударника — корпус; поршневая часть стержня — стенка центрального канала штока ударника; поршневая часть ударника — корпус и хвостовик инструмента — букса корпуса;

$\Phi_{kc}$ ,  $\Phi_{sh}$ ,  $\Phi_{cy}$ ,  $\Phi_{pu}$ ,  $\Phi_{bk}$  — соответственно бародинамические параметры процесса перепуска воздуха через площади зазоров  $\Psi_{kc}$ ,  $\Psi_{sh}$ ,  $\Psi_{cy}$ ,  $\Psi_{pu}$ ,  $\Psi_{bk}$ .

Термодинамические параметры состояния воздуха в камерах пневмодинамического механизма:

$\Omega_c$ ,  $\Omega_{pk}$ ,  $\Omega_p$ ,  $\Omega_x$  — соответственно в камерах: сетевого воздуха, распределительной, рабочего и холостого ходов с объемами  $V_c$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_p$ ,  $V_x$  во взаимозависимостями с бародинамическими функциями  $\Phi_c$ ,  $\Phi_{pk}$ ,  $\Phi_p$ ,  $\Phi_x$ .

Термодинамические параметры в процессах перепуска, впуска и выпуска:

$\Omega_{kc}$ ,  $\Omega_{sh}$ ,  $\Omega_{cy}$ ,  $\Omega_{pu}$ ,  $\Omega_{bk}$ ,  $\Omega_{ap}$ ,  $\Omega_{ax}$  — соответствуют бародинамическим  $\Phi_{kc}$ ,  $\Phi_{sh}$ ,  $\Phi_{cy}$ ,  $\Phi_{pu}$ ,  $\Phi_{bk}$ ,  $\Phi_{ap}$ ,  $\Phi_{ax}$ .

Бародинамические параметры перетечек, впуска и выпуска воздуха подчиняются закономерностям Сен-Венана — Вантцеля в виде:

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

где индексы  $ij$  и  $ji$  обозначают направление течения воздуха: при  $i$  — откуда и  $j$  — куда.

Термодинамические параметры  $\Omega_i$  в зависимости от  $\Phi_i$  представим в виде:

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \Phi_{ij} > 0 & k-1, \\ \Phi_{ij} \leq 0 & k-(\theta_i / \theta_j), \\ \Phi_{ji} > 0 & k-1, \\ \Phi_{ji} \leq 0 & k-(\theta_j / \theta_i). \end{cases} \quad (2)$$

Следуя изменениям направлений течения воздуха в (1) и (2), будут учитываться или  $\Phi_{ij}$  и  $\Omega_{ij}$ , или  $\Phi_{ji}$  и  $\Omega_{ji}$ .

Ограничения для перемещений ударника и корпуса механизма:

$$\begin{cases} \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_0 = -k_k \left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Физико-математическое описание рабочего процесса представлено тремя составляющими.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_c/dt = k/V_c [W(\omega_c \varphi_c - \omega_{pk} \varphi_{pk} - \psi_{kc} \varphi_{kc})], \\ dp_{pk}/dt = k/(V_{pk} - x_y S_{pk}) [W(\omega_{pk} \varphi_{pk} + \psi_{kc} \varphi_{kc} - \omega_x(x_y) \varphi_x - (\omega_p \varphi_p)^* - \psi_{cy} \varphi_{cy} - \psi_{wy} \varphi_{wy}) + p_{pk}(dx_y/dt) S_{pk}], \\ dp_p/dt = k/(V_p - x_y S_p) [W((\omega_p \varphi_p)^* + \psi_{wy} \varphi_{wy} - \psi_{ny} \varphi_{ny} + \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap}) + p_p(dx_y/dt) S_p], \\ dp_x/dt = k/(V_x + x_y S_x) [W(\omega_x(x_y) \varphi_x + \psi_{ny} \varphi_{ny} - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} - \psi_{bk} \varphi_{bk}) - p_x(dx_y/dt) S_x]. \end{cases} \quad (4)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} d\theta_c/dt = \theta_c/(p_c V_c) [W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_{pk} \varphi_{pk} \Omega_{pk} - \psi_{kc} \varphi_{kc} \Omega_{pk})], \\ d\theta_{pk}/dt = \theta_{pk}/(p_{pk} (V_{pk} - x_y S_{pk})) [W(\omega_{pk} \varphi_{pk} \Omega_{pk} + \psi_{kc} \varphi_{kc} \Omega_{kc} - \omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x - (\omega_p \varphi_p \Omega_p)^* - \psi_{cy} \varphi_{cy} \Omega_{cy} - \psi_{wy} \varphi_{wy} \Omega_{wy}) + (k-1)p_{pk}(dx_y/dt) S_{pk}], \\ d\theta_p/dt = \theta_p/(p_p (V_p - x_y S_p)) [W((\omega_p \varphi_p \Omega_p)^* + \psi_{wy} \varphi_{wy} \Omega_{wy} - \psi_{ny} \varphi_{ny} \Omega_{ny} + \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap} \Omega_{ap}) + (k-1)(dx_y/dt) S_p], \\ d\theta_x/dt = \theta_x/(p_x (V_x + x_y S_x)) [W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x + \psi_{ny} \varphi_{ny} \Omega_{ny} - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} \Omega_{ax} - \psi_{bk} \varphi_{bk} \Omega_{bk}) - (k-1)(dx_y/dt) S_x]. \end{cases} \quad (5)$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2 x_y/dt^2 = [p_x(S_y - S_c) - p_p S_p - p_{pk} S_{pk} - F_{cy} - F_{pk} - F_{wk} - F_{ck}]/m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y/dt)_o = -k_y(dx_y/dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2 x_k/dt^2 = [p_x(S_y - S_c) - p_p S_p - p_{pk} S_{pk} - F_{cy} - F_{pk} - F_{wk} - F_{ck} - F_h]/m_k & \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k/dt)_o = -k_y(dx_k/dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

\* Если  $\omega_p$  управляемое, то вместо  $(\omega_p \varphi_p)^*$  и  $(\omega_p \varphi_p \Omega_p)^*$  следует  $(\omega_p(x_y) \varphi_p)$  и  $(\omega_p(x_y) \varphi_p \Omega_p)$ .

В уравнения (4–6), кроме указанных на расчетной схеме, принятые следующие обозначения:

$x_y, x_k, x_c$  — перемещения ударника, корпуса и стержня;

$m_y, m_k, m_c$  — массы ударника, корпуса и стержня;

$F_{cy}, F_{pk}, F_{shk}, F_{ck}, F_h$  — соответственно силы трения при перемещении поршневой части стержня в отверстии штоковой части ударника, поршневой части ударника о стенки корпуса, штоковой части ударника о стенки корпуса, стержня в отверстии фланца корпуса и сила нажатия на корпус;

$k_y, k_k, k_c$  — коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента, корпуса от буртика инструмента и буртика стержня от седла отверстия в фланце корпуса;

$$W = (2kR / (k - 1))^{1/2},$$

где  $k$  — показатель баро- и термодинамического процесса;

$R$  — газовая постоянная.

Ограничения на площади сечения  $\omega_i$  каналов впуска, выпуска и перепуска воздуха между камерами и в атмосферу:

$$\omega_c = \text{const}, \omega_{pk} = \text{const}, \psi_{kc} = \text{const}, \psi_{wy} = \text{const},$$

$$\omega_{cy} = \text{const}, \psi_{py} = \text{const}, \psi_{bk} = \text{const}.$$

Ограничения  $\omega_i(x_y)$ , зависящие от выбранных координат:

$$\begin{aligned} \omega_p(x_y) &= \omega_p = \max \omega_p = f \cdot e \quad \text{при } (x_y + L_n) \leq B_1, \\ \omega_p &= \min \omega_p = f \cdot e \cdot 0,25 \quad \text{при } B_2 < (x_y + L_n) < (E - B_2), \\ \omega_p &= f \cdot e \cdot 0,5 \quad \text{при } B_2 < (x_y + L_n) \leq (E - B_2) \cdot 0,5; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \omega_x(x_y) &= \omega_x = \max \omega_x = h \cdot q \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ \omega_x &= \min \omega_x = h \cdot q \cdot 0,5 \quad \text{при } L_n < (x_y + L_y) \leq (Q - L_y) \cdot 0,5, \\ \omega_x &= 0 \quad \text{при } H_1 \leq x_y < (E - L_n); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \omega_{ap}(x_y) &= \omega_{ap} = \max \omega_{ap} = d \cdot c \quad \text{при } x_y = 0, \\ \omega_{ap} &= 0 \quad \text{при } B_2 < (x_y + L_n) \leq E, \\ \omega_{ap} &= d \cdot c \cdot 0,5 \quad \text{при } B_1 < (x_y + L_n) \leq B_2; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \omega_{ax}(x_y) &= \omega_{ax} = \max \omega_{ax} = a \cdot b \quad \text{при } H_2 \leq x_y \leq (E - L_n), \\ \omega_{ax} &= 0 \quad \text{при } x_y < H_1, \\ \omega_{ax} &= a \cdot b \cdot 0,5 \quad \text{при } H_1 < x_y \leq (H_2 - H_1) \cdot 0,5. \end{aligned} \quad (10)$$

Текущие значения для впуска воздуха (рис. 3)  $\omega_p(x_y)$  и  $\omega_x(x_y)$  будут изменяться в зависимости от положения координат ударника на участке  $(L_n, E)$ , равном  $(E - B_1)$ , с сохранением  $\omega_p = f \cdot e = \text{const}$  и  $(L_y, Q)$ , равном  $(Q - L_y)$ , с сохранением  $\omega_x = h \cdot q = \text{const}$ .

Аналогично текущие значения для выпуска  $\omega_{ap}(x_y)$  и  $\omega_{ax}(x_y)$  будут изменяться от положения координат ударника на участках  $(B_1, B_2)$ , равных  $(B_2 - B_1)$ , с сохранением геометрии полного сечения  $\omega_{ap} = d \cdot c = \text{const}$  и  $(H_1, H_2)$ , равных  $(H_2 - H_1)$ , при сохранении геометрии полного сечения  $\omega_{ax} = a \cdot b = \text{const}$ .

При этом коэффициенты расходов для  $\omega_{ap}$  и  $\omega_{ax}$  для упрощения процесса моделирования целесообразно принять равными  $\mu_p = \mu_x = \mu_{ap} = \mu_{ax} = 1$ .

При конструировании реальной конструкции механизма коэффициенты  $\mu_i$  расходов рассчитываются или определяются продувкой каналов воздухопровода.

При моделировании рабочего процесса необходимо определить значения координат:  $H_1, H_2, B_1, B_2, E, Q, M$ , а также  $L_y$  и  $L_n$ , и площадей сечений  $\omega_p$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_{ap}$  и  $\omega_{ax}$ , удовлетворяющих рациональным значениям энергетических параметров: энергии и частоте ударов, расхода воздуха, который оценивается в размерностях  $\text{м}^3/\text{Гц}$  или  $\text{кг}/\text{Гц}$ .

Ограничения на перемещения стержня.

При предварительном моделировании рабочего процесса достаточно наложить на его буртик усилие нажатия величиной:

$$F_{nc} = 1,1(\max p_c + \max p_{pk})(S_{nc} - S_{wnc}) - \max p_x S_c - \max p_c(S_{bc} - S_{wbc}), \quad (11)$$

где 1,1 — коэффициент запаса обеспечения неподвижности стержня в осевом направлении;

$S_c, S_{bc}, S_{wnc}, S_{wbc}$  — конструктивно выбранные размеры площадей, зависящие от диаметров  $D_c, D_{bc}, D_{wnc}, D_{wbc}$  (см. рис. 3).

**Выводы.** Приведенная последовательность моделирования и методология проектирования подобных пневмоударных механизмов пригодны при всех практических целесообразных сочетаниях энергии и частоты ударов при заданных удельных расходах воздуха, принятых в размерностях  $\text{м}^3$  или  $\text{кг}$  за один цикл.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2504634 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, А.В. Куликов. — Опубл. 2014, Бюл. № 2.
2. Пат. 2418146 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Е.А. Иванов, Ч.Н. Чолдак-оол. — Опубл. 2011, Бюл. № 13.
3. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. изд. [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : НГУ, 1993. — 430 с.
4. А.с. 359382 СССР. Пневматический ударный механизм [Текст] / А.Я. Земляной, Ю.Н. Смирнов, М.И. Окоцкий. — Опубл. 1973, Бюл. № 35.
5. Пат. 2432442 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Е.А. Иванов, Ч.Н. Чолдак-оол. — Опубл. 2011, Бюл. № 30.

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ПОПОВ Денис Александрович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 28.01.14

**Abramenkov Dmitry Eduardovich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

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

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

**Krutikov Evgeniy Igorevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

## **THROTTLE-WITHOUT SPOOL PNEUMATIC PERCUSSION MECHANISMS AND THEIR PHYSICO-MATHEMATICAL DESCRIPTION**

Considered some variants of the original pneumatic percussion mechanisms of action with elements of improvement.

**Key words:** pneumatic percussion mechanism, luggage stroke, luggage idling, distribution camera, network of air, managing inlet rod.

### **REFERENCES**

1. Pat. 2504634 Russian Federation. Pneumatic shock mechanism [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, A.V. Gruzin, A.V. Kulikov. — Publ. 2014, Bull. N 2.
2. Pat. 2418146 Russian Federation. Pneumatic shock mechanism [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, E.A. Ivanov, Ch.N. Choldak-ool. — Publ. 2011, Bull. N 13.
3. Abramenkov, E.A. Pneumatic mechanisms of cars of shock action: Reference media [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : NSU, 1993. — 430 p.
4. Copyright certificate 359382 USSR. Pneumatic shock mechanism [Text] / A.Ya. Earth, Yu.N. Smirnov, M.I. Okotsky. — Publ. 1973, Bull. N 35.
5. Pat. 2432442 Russian Federation. Pneumatic shock mechanism [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, E.A. Ivanov, Ch.N. Choldak-ool. — Publ. 2011, Bull. N 30.

**УДК 621.524.001**

**И.В. ТИЩЕНКО**

## **МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ УДАРНОЙ МОЩНОСТИ**

На основе клапанной схемы воздухораспределения с упругим кольцевым элементом в камере прямого хода создан типоразмерный ряд моделей устройств ударного действия с широким диапазоном регулирования частотных и энергетических параметров. Проведено исследование их рабочих циклов. Приведены примеры использования различных комбинаций устройств в качестве генераторов импульсной нагрузки при физическом моделировании системы «пневмомолот — погружаемый элемент — грунтовый массив».

**Ключевые слова:** пневмомолот, упругий клапан, давление сжатого воздуха, частота ударов, энергия ударного импульса.

Создание новых высокопроизводительных машин для земляных и специальных строительных работ неразрывно связано с изучением процессов, протекающих при взаимодействии их рабочих органов с грунтовым массивом с целью оптимизации параметров и режимов воздействия. Во многих случаях решение таких сложных многофакторных задач не может осуществляться только численно-аналитическими методами и требует проведения экспериментов с опытными образцами оборудования натуральных размеров. Так, в ходе испытаний и доводки пневмопробойников для образования подземных каналов в приповерхностном грунтовом массиве в ИГД СО РАН выполнялся обширный цикл экспериментальных исследований [1]. В ходе его проведения на полигоне «Ботанический сад» в грунтах различных категорий было пройдено большое количество скважин диаметром от 60 до 300 мм и протяженностью от 10 до 25 м. Полученные эмпирические зависимости позволили установить характерные особенности движения устройств ударного действия в упругопластичной среде, определить энергоемкость деформации грунтовых слоев рабочими органами, уточнить рациональные области применения машин данного класса, определить факторы, влияющие на точность проходки. Исследования выполнялись с привлечением большого числа опытных образцов оборудования, сопровождались значительным объемом земляных работ, требовали существенных материальных затрат на их организацию и содержание парка вспомогательной техники (передвижные компрессорные установки, автомобили, экскаваторы), а с учетом климатических условий носили сезонный характер.

Применение методов физического моделирования позволяет устанавливать оптимальные параметры машины и вносить необходимые корректировки в математический расчетный аппарат еще на стадии проектирования до изготовления опытных экземпляров. При этом появляется возможность минимизировать количество трудоемких и дорогостоящих экспериментов с оборудованием натуральных размеров, снизить матери-

альные издержки, сократить сроки исследований. Методы физического моделирования рабочих процессов землеройных и землеройно-транспортных машин разрабатывались в МАДИ под руководством профессора Баловнева и нашли широкое применение для получения закономерностей взаимодействия элементов системы «грунт — рабочее оборудование — движитель — грунт» [2]. В лаборатории механизации горных работ ИГД СО РАН такой подход использовался при создании опытных образцов устройств для образования скважин комбинированным методом с частичным уплотнением и экскавацией грунта [3]. Эксперименты выполнялись в горизонтальном канале длиной 4 м и объемом 6,5 м<sup>3</sup> грунтовой массы. Модели грунтотрещинщиков состояли из пневматических генераторов импульсной нагрузки и рабочих органов перепускного и емкостного типа. Полученный положительный опыт позволил в дальнейшем применить данную методику для физического моделирования системы «пневмомолот — погружаемый элемент — грунтовый массив» при исследовании виброударных способов погружения тел в грунт. Его целью является определение рациональных сочетаний энергетических и частотных показателей ударного воздействия, оказывающих наибольшее влияние на эффективность процесса.

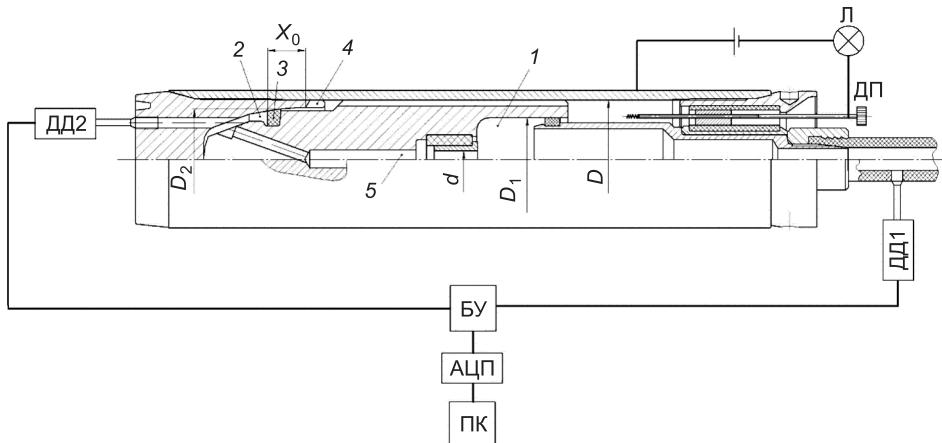


Рис. 1. Функциональная схема пневмомолота

1 — камера прямого хода; 2 — камера обратного хода; 3 — упругий клапан; 4 — выхлопной паз; 5 — дроссельный канал; ДД1, ДД2 — датчики давлений; БУ — блок усилителей; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; ПК — компьютер; ДП — датчик перемещений; Л — светодиодный элемент

Базовая часть комплекта лабораторного оборудования представляет собой модельный ряд генераторов импульсной нагрузки, обладающих возможностью ступенчатого регулирования их выходных параметров. При создании моделей за основу была взята заложенная в серийных пневмомолотах «Тайфун» схема воздухораспределения с упругим кольцевым клапаном в камере прямого хода (рис. 1), обладающая простой конструкцией и широким диапазоном изменения характеристики [4]. Конструктивные и энергетические параметры такого ударного устройства связаны соотношениями:

$$E = \left( p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) A_1 X_0 \psi, \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}, \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{X_0 \psi} \left( \frac{2}{v} + \frac{A_2}{\lambda S} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $E$  — энергия удара, Дж;

$p_0$  — магистральное давление на входе в распределительный тракт, МПа;

$\Delta p_1$  — максимальное падение давления в камере прямого хода, МПа;

$A_1$  и  $A_2$  — площади камер прямого и обратного хода,  $\text{м}^2$ ;

$X_0$  — ход ударника до начала выхлопа, м;

$\psi$  — коэффициент заброса ( $\psi \geq 1$ );

$v$  — предударная скорость, м/с;

$m$  — масса ударника, кг;

$f$  — частота ударов, Гц;

$\lambda$  — скорость движения воздушного потока через дроссельный канал, м/с;

$S$  — сечение отверстия жиклера,  $\text{м}^2$ .

Их анализ показывает, что для принятого соотношения площадей  $A_1$  и  $A_2$  камер 1 и 2, задаваемых диаметрами патрубка  $D_1$  и наковальни  $D_2$ , значения энергии  $E$  находятся в прямой, а частоты ударов  $f$  — в обратной зависимости от длины рабочего хода ударника, определяемой расстоянием  $X_0$  от точки переднего замыкания упругого клапана 3 до начала выхлопных пазов 4 (см. рис. 1). Поэтому при создании высокочастотного генератора этот конструктивный параметр необходимо уменьшать, а неизбежные энергетические потери компенсировать пропорциональным подъемом магистрального давления  $p_0$ . В случае увеличения  $p_0$  при фиксированном значении  $X_0$  достигается кратное приращение скорости соударения  $v$  подвижной массы  $m$  с наковальней и повышение энергии  $E$  ударного воздействия. И в том, и в другом варианте имеется возможность регулировки частоты ударов изменением сечения  $S$  пропускного отверстия жиклера.

В соответствии с изложенной выше концепцией разработана и изготовлена экспериментальная модель импульсного генератора с массой ударной части  $m = 1$  кг и внутренним диаметром корпуса  $D = 34$  мм (рис. 2, а). Она рассчитана на три режима настройки по магистральному давлению:  $p_0 = 0,6, 1,2, 2,4$  МПа. Основными конструктивными элементами модели (рис. 2, б) являются: корпус 1, в переднюю часть которого вворачивается одна из трех сменных наковален 2 с заданной величиной хода  $X_0 = 40, 20, 10$  мм соответственно; ударник 3; задняя гайка с патрубком 4. Ступенчатое регулирование частоты ударов в пределах каждого режима настройки достигается изменением сечения дроссельного канала за счет установки одного из сменных жиклеров 5 с отверстием  $d = 1,5, 1,7, 2,0, 2,5$  мм. Цикл воздухораспределения обеспечивается работой упругого клапана 6.

Тестирование параметров модели осуществлялось на лабораторном измерительном стенде (см. рис. 1). Оно состояло из следующих операций:

— определение фактического хода ударника по положению вмонтированного в заднюю гайку подвижного стержневого датчика перемеще-

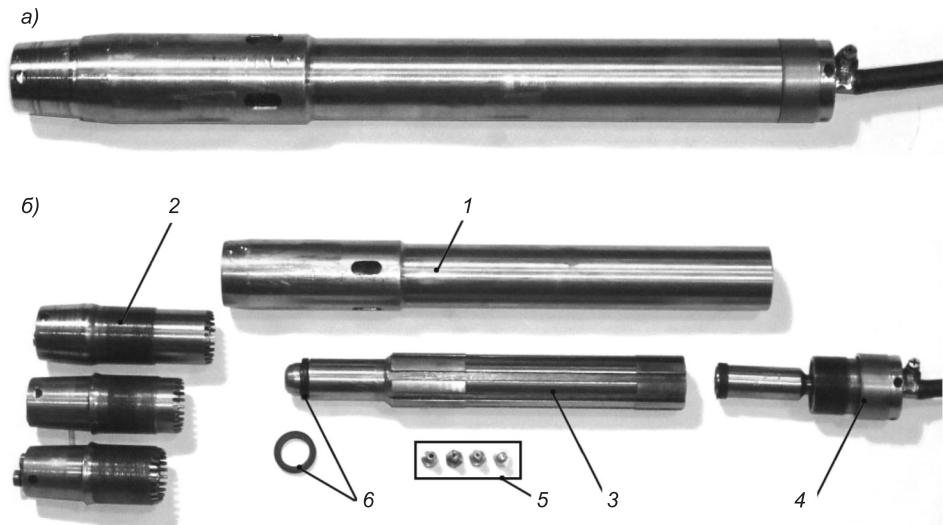


Рис. 2. Общий вид модели пневмомолота с массой ударника  $m = 1$  кг в сборе (а) и поэлементно (б)

1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — ударник; 4 — задняя гайка с патрубком; 5 — набор сменных жиклеров; 6 — упругий клапан

ния ДП в момент замыкания им электрической контактной цепи на свето-диодном элементе Л;

— регистрация изменения давлений в камерах машины и продолжительности рабочего цикла путем записи импульсных индикаторных диаграмм типовым комплектом измерительно-регистрирующей аппаратуры: датчики ДД1 и ДД2 типа Р8АР фирмы НВМ (Германия); блок усилителей аналогового сигнала БУ; аналогово-цифровой преобразователь АЦП; персональный компьютер ПК.

Данные обрабатывались стандартным пакетом программ Power Graph Professional и Excel.

Источником сжатого воздуха служил переносной компрессор высокого давления типа «Junior II-E» производства компании BAUER (Германия), оснащенный баллоном емкостью 50 л с понижающим редуктором.

Обработка импульсных индикаторных диаграмм позволила выяснить характер процесса наполнения и опорожнения управляемой передней камеры, определить уровень падения давления  $\Delta p_1$  на прямом пути ударника, зафиксировать продолжительность рабочего цикла. На основе этих данных с использованием зависимостей (1), (2) и результатов измерения полного рабочего хода, представленного как произведение  $X_0 \cdot \psi$ , уточнены фактические значения энергии удара  $E$  и скорости соударения  $v$ , установлен диапазон изменения частоты  $f$ . Полученные характеристики ударной мощности модели представлены в графическом виде на рис. 3. Как и следовало ожидать, функции энергии и частоты ударов, соответствующих устойчивому режиму работы генератора, изменяются практически по линейным законам.

Использование всего комплекта сменных наковален с тремя различными расстояниями  $X_0$  от точки замыкания клапана ударника до начала открытия выхлопных окон, при соответствующем пропорциональном изменении входного магистрального давления, позволяет существенно вли-

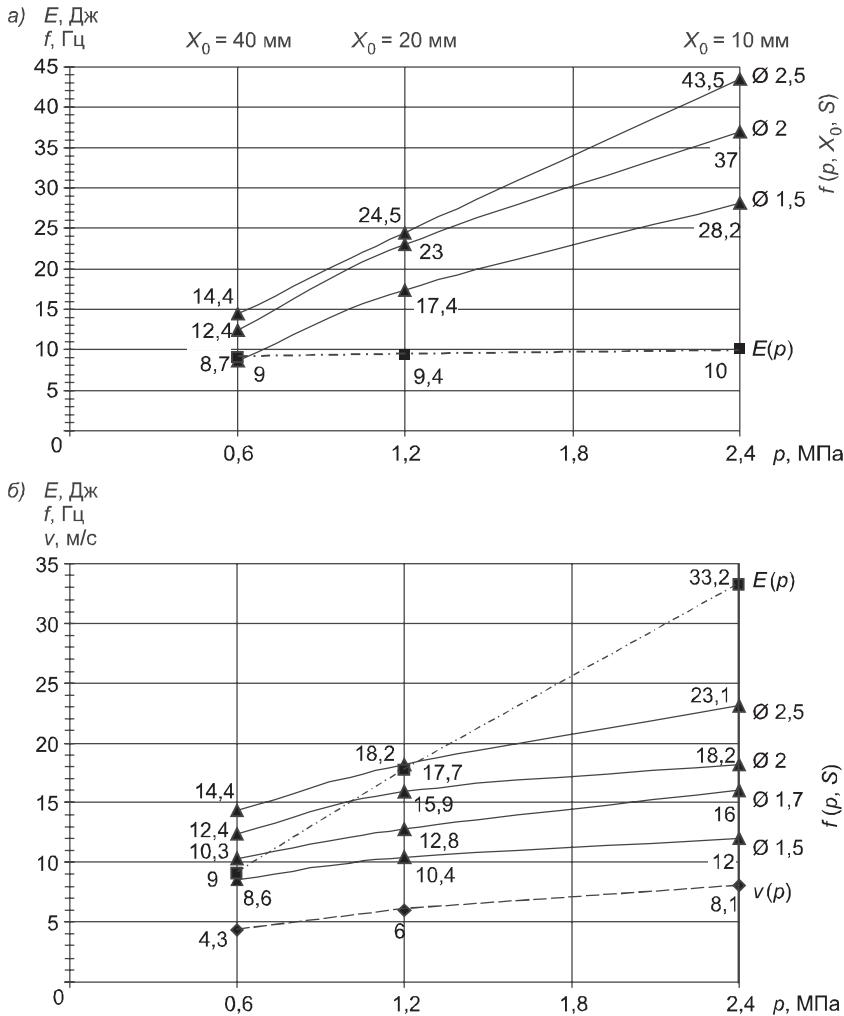


Рис. 3. Характеристики пневмомолота с  $m = 1$  кг в высокочастотном исполнении (а) и с повышенной скоростью соударения (б)

ять на частотные характеристики модели (см. рис. 3, а). Так последовательный переход от базовой настройки  $p_0 = 0,6$  МПа,  $X_0 = 40$  мм к варианту  $p_0 = 1,2$  МПа,  $X_0 = 20$  мм и  $p_0 = 2,4$  МПа,  $X_0 = 10$  мм сопровождается пошаговым увеличением частоты ударов в 1,6–2,0 раза при всех сечениях жиклеров. Полный диапазон регулирования частотной составляющей ударной мощности от минимального значения  $f = 8,6$  Гц ( $p_0 = 0,6$  МПа,  $X_0 = 40$  мм,  $d = 1,5$  мм) до максимального  $f = 43,5$  Гц ( $p_0 = 2,4$  МПа,  $X_0 = 10$  мм,  $d = 2,5$  мм) достигает пятикратной величины. При этом энергия единичного удара изменяется незначительно в пределах  $E = 9 – 10$  Дж. Разница между ними не превышает 10 %. Такой способ регулирования выходных параметров генератора позволяет при неизменной энергетической компоненте его ударной мощности исследовать влияние частоты импульсного воздействия на процесс внедрения стержневых элементов в грунтовый массив.

При постоянной величине хода  $X_0 = 40$  мм и кратном повышении магистрального давления с  $p_0 = 0,6$  МПа до  $p_0 = 1,2$  и 2,4 МПа наблюдается

практически пропорциональный рост энергии в диапазоне:  $E = 9, 17, 7, 33,2$  Дж за счет соответствующего увеличения скорости соударения ударника с инструментом:  $v = 4,3, 6,0, 8,1$  м / с (см. рис. 3, б). Полученные частотные характеристики позволяют подобрать такие варианты настройки, при которых значение этого параметра поддерживается на уровне, близком к постоянному, установкой соответствующих жиклеров:  $p_0 = 0,6$  МПа,  $f = 12,4$  Гц при  $d = 2$  мм;  $p_0 = 1,2$  МПа,  $f = 12,8$  Гц при  $d = 1,7$  мм;  $p_0 = 2,4$  МПа,  $f = 12$  Гц при  $d = 1,5$  мм. Такое исполнение модели необходимо для изучения закономерностей движения стержневых элементов в грунтовом массиве под действием импульсной нагрузки, создаваемой генератором с переменной величиной энергии, определяемой скоростью разгона ударника, и фиксированной частотой нанесения ударов.

Для расширения области поисковых экспериментальных работ в дополнение к описанному выше устройству создана линейка пневмомолотов под общим названием «Тайфун» с кратным изменением массы ударной части  $m = 0,5, 1, 2, 4$  кг и соответствующим каждому ее значению уровнем энергии единичного удара  $E = 4,6, 9, 17, 35$  Дж (рис. 4). Все представленные модели имеют единую схему воздухораспределения с упругим кольцевым клапаном в камере прямого хода (см. рис. 1), рассчитаны на давление сжатого воздуха  $p_0 = 0,6$  МПа и отличаются своими масштабаритными показателями.

Первый этап физического моделирования системы «пневмомолот — погружаемый элемент — грунтовый массив» осуществлялся в горизонтальном канале, заполняемом супесчаной смесью с необходимым увлажнением и послойным трамбованием. В качестве внедряемого тела использовалась труба диаметром 75 мм длиной 4 м с закрытым передним торцом, а генератором ударной нагрузки служила модель «Тайфун-4» с пошаговым изменением частоты  $f = 9,2, 12,6, 18,4, 21,3$  Гц при постоянной энергии<sup>1</sup>  $E = 35$  Дж. В дальнейшем задавались новые внешние факторы и параметры воздействия. Опыты проводились в полевых условиях и заключались в вертикальном погружении трубчатого элемента диаметром 33 мм с конусным наконечником в грунт естественного залегания на глубину 3,5 м. Источником импульсной нагрузки являлась модель «Тайфун-1» с выбранным частотным диапазоном ударного воздействия  $f = 12,4, 23, 37$  Гц при энергии<sup>2</sup>  $E = 9$  Дж. Полученные результаты позволили обосновать критерии эффективности увеличения выходной мощности пневмомолотов за счет ее частотной компоненты и показать перспективность создания и применения высокочастотных устройств для погружения различных металлических элементов и профилей в грунтовый массив.

Целью следующего цикла исследований являлась проверка возможности повышения производительности виброударных методов внедрения путем присоединения к системе «пневмомолот — погружаемый элемент —

<sup>1</sup> Смоляницкий Б.Н., Тищенко И.В., Червов В.В., Гилета В.П., Ванаг Ю.В. Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. 2008. № 5. С. 72–80.

<sup>2</sup> Червов В.В., Тищенко И.В., Смоляницкий Б.Н. Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержня в грунт // ФТПРПИ. 2011. № 1. С. 61–70.

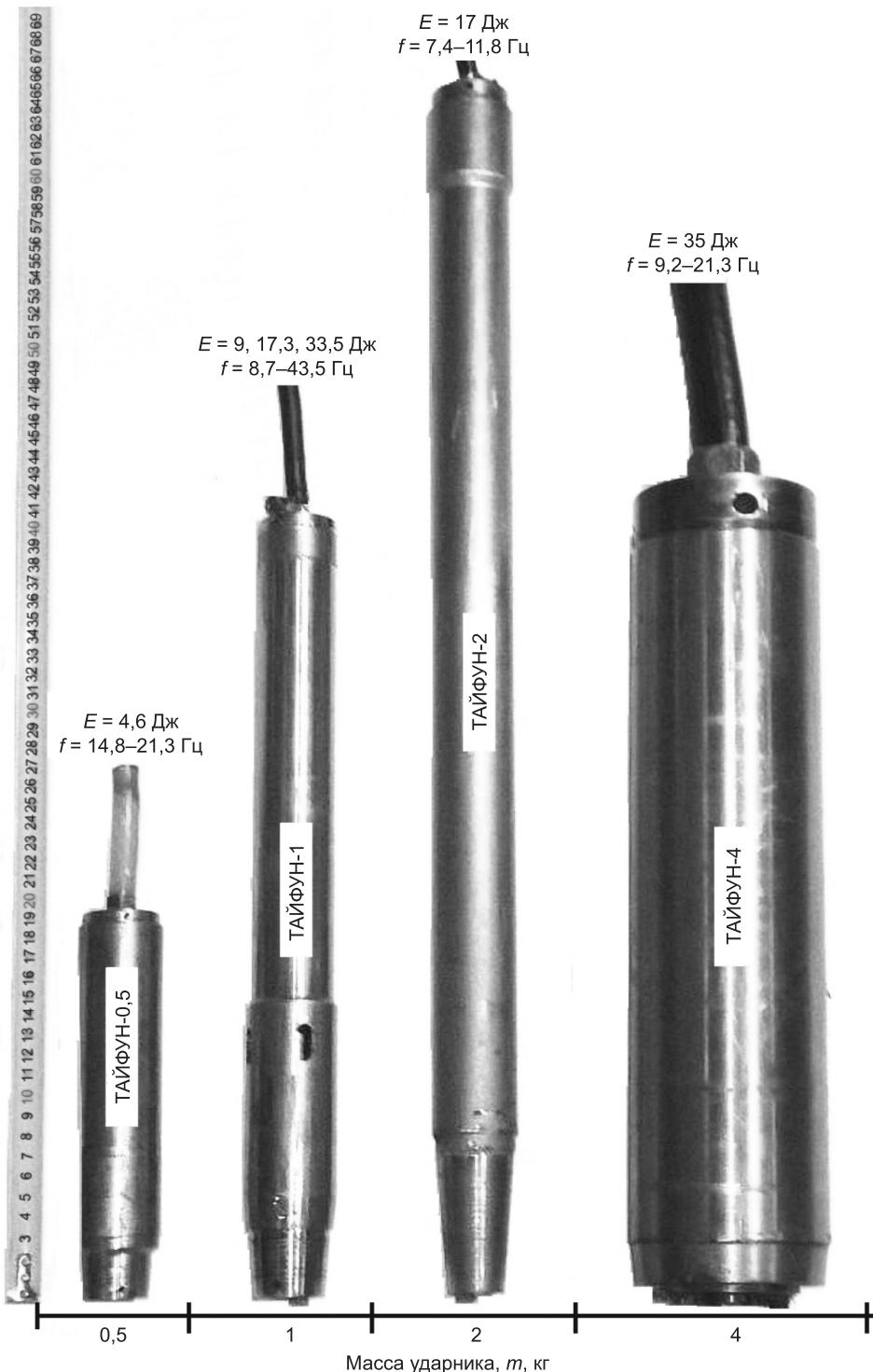


Рис. 4. Типоразмерный ряд моделей пневмомолотов

грунтовый массив» дополнительного источника вибрационной нагрузки с осевым и поперечным направлением колебаний, а также использования в качестве силового генерирующего модуля комбинированного возбудителя из двух устройств ударного действия. Для имитации первого варианта воз-

действия использовалась модель «Тайфун-4» ( $E = 35$  Дж,  $f = 13,8$  Гц) и вибратор «Напор-01-05» ( $F_{\text{вын}} = 1,7$  кН,  $f = 90$  Гц), устанавливаемые на трубе диаметром 50 мм. Во втором случае генератором периодической нагрузки являлся составной ударный узел, представляющий собой комбинацию из двух пневмомолотов «Тайфун-1» ( $E = 9$  Дж,  $f = 14,4$  Гц) и «Тайфун-2» ( $E = 17$  Дж,  $f = 7,4$  Гц) в продольной компоновке<sup>3</sup>. Эксперименты с комбинированным осевым модулем позволили предложить направление дальнейшего развития пневмоударной техники для специальных строительных работ, заключающееся в разработке импульсных машин с расширенным частотным спектром воздействия, обеспечивающим двумя или несколькими подвижными массами, объединенными в одном корпусе и имеющими единую систему воздухораспределения.

Задачей другой экспериментальной работы являлось изучение влияния различных сочетаний энергетических параметров генераторов ударных импульсов на амплитуду создаваемого ими силового нагружения и интенсивность поступательного перемещения стального профиля в грунтовом массиве. При постановке экспериментов на первом этапе для вертикального погружения трубы диаметром 33 мм до отметки 3,4 м применялась модель «Тайфун-1», обеспечивающая ступенчатое повышение скорости соударения ударника  $m = 1$  кг с наковальней ( $p_0 = 0,6$  МПа,  $v = 4,3$  м/с,  $E = 9$  Дж,  $f = 12,4$  Гц;  $p_0 = 1,2$  МПа,  $v = 6$  м/с,  $E = 17,7$  Дж,  $f = 12,8$  Гц;  $p_0 = 2,4$  МПа,  $v = 8,1$  м/с,  $E = 33,2$  Дж,  $f = 12$  Гц). В следующей серии опытов аналогичный уровень энергии ударного воздействия достигался за счет использования устройств с более массивными подвижными массами: «Тайфун-2» ( $m = 2$  кг,  $v = 4,1$  м/с,  $E = 17$  Дж,  $f = 11,8$  Гц) и «Тайфун-4» ( $m = 4$  кг,  $v = 4,2$  м/с,  $E = 35$  Дж,  $f = 12,6$  Гц). Процесс внедрения сопровождался записью диаграмм силовых импульсов в трубной плети, регистрируемых тензометрическим датчиком, откалиброванным в единицах силы. Сравнительный анализ полученных скоростных характеристик показал, что в одних и тех же грунтовых условиях при близких частотных показателях  $f = 11,8 - 12,8$  Гц и одинаковом уровне энергии удара, но разных значениях составляющих ее структурных единиц более эффективными являются пневмомолоты с большей предударной скоростью ударника, при которой интенсивность погружения трубы в грунт увеличивается в несколько раз. Такой эффект обеспечивается возрастанием амплитуды генерируемых силовых импульсов от  $F_{\text{max}} = 24 - 30$  кН — у машин с  $v = 4,1 - 4,3$  м/с до  $F_{\text{max}} = 35$  и 47 кН — у моделей с  $v = 6$  и 8,1 м/с соответственно. Полученный результат показывает, что совершенствование ударных методов внедрения в грунт различных конструктивных элементов и профилей заключается в создании и применении пневматических устройств с повышенной скоростью соударения подвижной массы с инструментом, которая должна возрасти от  $v = 4 - 5$  м/с, что соответствует уровню современных серийных машин, до  $v = 8 - 9$  м/с — предлагаемых перспективных.

**Выходы.** Разработан и изготовлен типоразмерный ряд лабораторных моделей импульсных генераторов с широким диапазоном регулирования их выходных параметров. Он позволяет без привлечения оборудования натуральных размеров осуществлять адекватное физическое моделирование

---

<sup>3</sup> Тищенко И.В., Червов В.В., Горелов А.И. Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 107–118.

системы «пневмомолот — погружаемый элемент — грунтовый массив» и строить необходимые закономерности процесса при изменении внешних условий и факторов воздействия. Такой подход дает возможность существенно сократить трудоемкость и сроки выполнения запланированных поисковых работ, а получаемые достоверные результаты — прогнозировать пути развития техники и технологии виброударного погружения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурков, К.С. Пневмопробойники [Текст] / К.С. Гурков, В.В. Климашко, А.Д. Костылев, В.Д. Плавских, Е.П. Руzin, Б.Н. Смоляницкий, К.К. Тупицын, Н.П. Чепурной.— Новосибирск : Изд-во ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.
2. Баловнев, В.И. Физическое моделирование резания грунтов [Текст] / В.И. Баловнев. — М. : Машиностроение, 1969. — 160 с.
3. Тищенко, И.В. Комбинированная проходка скважин в грунте ударными устройствами с кольцевым инструментом [Текст] / И.В. Тищенко, Б.Н. Смоляницкий, В.П. Гилета // ФТПРПИ. — 2006. — № 6. — С. 87–97.
4. Пат. 2462575 Российская Федерация. Устройство ударного действия [Текст] / В.В. Червов, Б.Н. Смоляницкий, В.В. Трубицын, А.В. Червов, И.В. Тищенко. — Опубл. 04.10.2012, Бюл. № 27. — 7 с.

*ТИЩЕНКО Игорь Владимирович, канд. техн. наук  
Институт горного дела, г. Новосибирск*

Получено 15.01.14

**Tishchenko Igor Vladimirovich**, candidate of technical sciences, Institute of Mining, Novosibirsk, Russia

#### VARIABLE PERCUSSION POWER PNEUMATIC IMPULSE GENERATORS

Using the circuit design of the air distribution valve control mechanism with an elastic ring element installed in the forward stroke cell, a standard size series of models of percussion action machines with frequency and energy adjustable in a wide range has been designed. The operating cycles of the machines are analyzed. The article describes application of variously combined machines in the capacity of impulse load generators within the physical model of the pneumatic hammer — driven element — soil system.

**Key words:** pneumatic hammer, elastic valve, compressed air pressure, blow frequency, impact impulse energy.

#### REFERENCES

1. Gurkov, K.S. Pneumatic punchers [Text] / K.S. Gurkov, V.V. Klimashko, A.D. Kostylev, V.D. Plavskikh, E.P. Rusin, B.N. Smolyanitsky, K.K. Tupitsyn, N.P. Chepurnoy. — Novosibirsk : IGD SO RAN, 1990. — 217 p.
2. Balovnev, V.I. Physical simulation of soil cutting [Text] / V.I. Balovnev. — M. : Mashinostroenie, 1969. — 160 p.
3. Tishchenko, I.V. Combined hole-making in soil by impact devices with an annular working organ [Text] / I.V. Tishchenko, B.N. Smolyanitsky, V.P. Gileta // Journal of Mining Science. — 2006. — Vol. 42, N 6. — P. 600–609.
4. Pat. 2462575 Russian Federation. Percussion action machine [Text] / V.V. Chervov, B.N. Smolyanitsky, V.V. Trubitsyn, A.V. Chervov, I.V. Tishchenko. — Publ. 04.10.2012, Bull. N 27. — 7 p.

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 725.620.9

П.П. СЕМИКИН

### КРИТЕРИИ ОТБОРА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Разработаны критерии отбора высотных зданий. Общая масса объектов проходит проверку на соответствие ряду параметров. Они делятся на две основные группы — архитектурные и энергетические. Применение критериев позволяет выделить «целевую группу» зданий и установить их основные характеристики.

Ключевые слова: критерий, архитектура, высотные здания, функциональное решение, возобновляемые источники энергии.

**Краткая история развития высотных зданий.** Первое высотное здание (Home Insurance Building) появилось в Чикаго в 1884 г. Это было 9-этажное кирпичное здание, которое в то время считалось высоким. На протяжении почти 25 лет подобное строительство велось только в Чикаго. В 1908 г. тренд небоскребостроения переносится в Нью-Йорк. За 30 лет было построено несколько всемирно известных высотных зданий: Крайслер Билдинг (Chrysler Building) и Эмпайр Стейт Билдинг (Empire State Building). В 1950-х гг. строительство небоскребов находит свое отражение в советской архитектуре — высотные «семь сестер» в Москве. 1960–1970-е гг. — это время, когда большинство стран восстановилось после Второй мировой войны. Начался экономический рост, показателем которого стало возведение высотных зданий в Европе, Японии. В России в это время возводятся здания на Калининском проспекте (Новый Арбат), автор — архитектор М.В. Посохин, 1968 г. 70–90-е гг. XX в. добавили в «гонку за высоту» несколько стран азиатского региона: КНР, Индонезия, Малайзия, Филиппины. К 2000 г. почти в каждой стране со стабильной экономикой были возведены небоскребы [1]. Часть таких зданий получила широкую известность: Большая Арка (Grand Arc), Париж; Коммерцбанк (Commerzbank), Франкфурт-на-Майне; Банк Китая (Bank of China), Гонконг; Башни Петронас (Petronas Tower), Куала-Лумпур и др. После миллиарда и до настоящего времени происходит строительство разнообразных высотных зданий. Помимо различных объемно-пространственных форм также применяются необычные технологии, сочетания архитектурных стилей и возобновляемых источников энергии. Данная тенденция привела к большому количеству построенных небоскребов. По данным Всемирного совета по высотным зданиям и городской среде (CTBUH) общее количество зданий выше 100 м в мире составляет около 6000 объектов [2].

**Критерии отбора высотных зданий.** Для выделения определенной группы объектов среди этого количества были разработаны критерии. Они делятся на две основные категории — архитектурные и энергетические. Их «пересечением» является архитектура высотного здания с

## *Критерии отбора высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии*

возобновляемыми источниками энергии. Подобный тип зданий — это та целевая группа, на выявление которой и направлены критерии. Остановимся на каждой категории критериев более подробно (см. таблицу).

### **Критерии отбора высотных зданий**

Наименование критерия	Возможные выявленные особенности в объекте
<i>Архитектурные критерии</i>	
Функциональное решение	Монофункциональное Многофункциональное
Высота объекта	Высотные Сверхвысотные Супервысотные
Время и характер проживания	Постоянное Временное Сезонное
Форма плана	Компактная Развитая
Особенности архитектуры	Архитектурные стили Национальные и религиозные особенности Местные и географические традиции
Тип фасада	Статический Динамический
<i>Энергетические критерии</i>	
Один источник возобновляемой энергии. Моногенерическое здание	Ветер Солнце Земля Вода Биомасса
Два и более источников возобновляемой энергии. Полигенерическое здание	Тип 1. Солнце + ветер Тип 2. Солнце + вода Тип 3. Солнце + ветер + вода Тип 4. Солнце + ветер + вода + земля Тип 5. Солнце + ветер + вода + земля + биомасса

**Методика применения критериев.** Обработка объектов с помощью критериев производилась по следующей последовательности действий (методике):

— *Выбор объекта или проекта.* Осуществлялось обращение к международной, национальной базам данных как высотных, так и экологичных, энергоэффективных зданий, на официальные сайты фирм-проектировщиков.

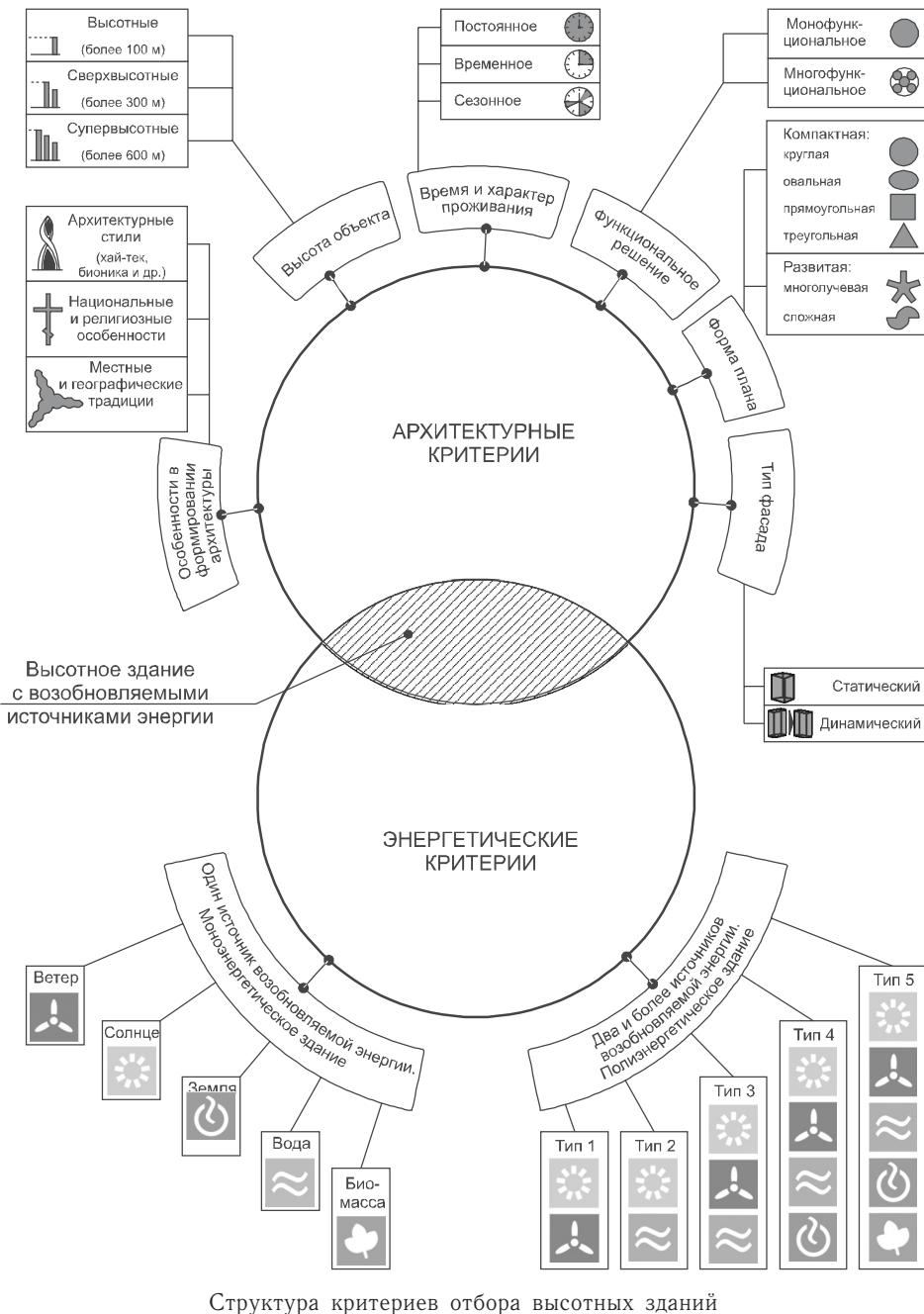
— *Сбор информации о сооружении.* Составлялось досье на здание: год постройки, автор, основные характеристики, особенности архитектуры, функциональное и конструктивное решения, применяемые технологии.

— *Применение критерия «высота объекта».* При высоте здания менее 100 м оно не рассматривалось. В случае с проектами анализировались имеющиеся варианты, если в них показатели по высоте разные — выбирался максимальный.

— *Применение критерия «возобновляемые источники энергии».* Для соответствия данному критерию объекту необходимо было иметь в

своей энергетической системе внедрение хотя бы одного из пяти возобновляемых источников энергии. Рассматривались архитектурная составляющая решения, суть работы и тип инженерного оборудования, мощность, сроки окупаемости и негативные стороны в случае их наличия в открытых источниках информации.

— Применение остальных архитектурных критериев. С их помощью определялся спектр интересующих характеристик. При отсутствии какой-либо информации здание участвовало в общей классификации, исключался лишь указанный ненайденный параметр (см. рисунок).



Структура критериев отбора высотных зданий

**Классификации высотных зданий.** Используя критерии, был составлен ряд классификаций по данным объектам.

1. Доля супервысотных зданий составляет 7 %, сверхвысотных — 52, высотных — 41 %.

2. Доминирующей является компактная форма плана высотного здания. Она характерна для 80 % проанализированных объектов, 20 % — развитая форма плана.

3. Динамический фасад является дорогостоящим, но энергетически оправданным и визуально впечатляющим решением в небоскребе. Подобных объектов пока только 15 %, остальные 85 % имеют статичный фасад.

4. Абсолютный лидер — многофункциональные здания (70 %); из 30 % монофункциональных объектов можно выделить следующее соотношение функций: 17 % — офисная, 10 — жилая, 3 % — гостиничная.

5. Время и характер проживания находятся в прямой зависимости от функционального решения. Постоянное пребывание (проживание) — 30 %, временное (краткосрочные командировки, экскурсии, туристические поездки) — 55 %, сезонное (долгосрочные командировки, туристические поездки, гастроли, обмен опытом) — 15 %.

6. В одном высотном здании могут применяться и местные традиции, и определенный архитектурный стиль, и национальные «мотивы». В связи с этим особенности архитектуры объективно оценивать сложно. Наиболее распространенные архитектурные стили, использованные в каждом небоскребе: бионика — 35 %, хай-тек — 33, функционализм — 12, остальные стили — 20 %. Национальные и религиозные критерии позволили выявить применение ритмо-метрических рядов в 30 % объектов. Чаще всего это особенности китайской и арабской культуры и архитектуры (орнаментализм), а также строительство высотных зданий в странах с мусульманским вероисповеданием (символизм). Местные и географические традиции обнаружены у 18 % зданий, как правило, это образы каких-либо растений, характерных для той или иной местности. Примером может служить самое высокое здание в мире — Бурж Халифа. Архитекторы, вдохновленные гименокаллисом — грациозным растением пустынных широт, решили придать основанию башни Y-образную форму.

7. В настоящее время в мире примерно равное соотношение полиэнергетических и моноэнергетических зданий. В каждой группе есть наиболее распространенные типы объектов. Для моноэнергетических зданий это объекты, использующие энергию солнца и ветра. Для полиэнергетических — тип 1 (энергия ветра и солнца), тип 3 (энергия ветра, солнца и воды), тип 5 (энергия ветра, солнца, воды, земли и биомассы) [3].

В данной статье не затронуты некоторые важные аспекты высотных зданий, такие как конструктивные системы, противопожарные мероприятия и ряд других. Это объясняется узконаправленностью проводимого исследования, одной из задач которого является создание критериального «фильтра». Подобная система в дальнейшем позволит создать современную типологию данных объектов.

В настоящее время активно развивается направление строительства высотных зданий. Это обстоятельство позволяет прогнозировать появление новых типов объектов. Одно из направлений — многофункциональ-

ные здания: сельскохозяйственные фермы, вертикальные сады, высотные автостоянки, здания-«фильтры», позволяющие опреснять воду и очищать городской воздух, и даже вертикальные кладбища. Второе направление — проектирование «вертикальных городов», крупных, масштабных объектов, которые будут включать в себя места приложения труда, отдыха, проживания и иные функции. Это мегаструктуры, позволяющие реализовать человеку все его потребности. Данные тенденции могут в будущем повлечь необходимость введения дополнительных критериев.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по высотным зданиям. Типология и дизайн, строительство и технология [Текст] / пер. с англ. — М. : ООО «Атлант-Строй», 2006. — 228 с.
2. The Skyscraper Center. The Global Tall Building Database of the CTBUH. Buildings 100 m+ in height // Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Chicago, 2014. URL: [http://skyscrapercenter.com/create.php?search=yes&page=0&type\\_building=on&status\\_COM=on&list\\_continent=&list\\_country=&list\\_city=&list\\_height=100&list\\_company=&completionsthrough=on&list\\_year=](http://skyscrapercenter.com/create.php?search=yes&page=0&type_building=on&status_COM=on&list_continent=&list_country=&list_city=&list_height=100&list_company=&completionsthrough=on&list_year=).
3. Семикин, П.П. Классификация типов высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии [Текст] / П.П. Семикин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 10. — С. 91–96.

*СЕМИКИН Павел Павлович, асп.*

*ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища)», г. Москва*

Получено 23.01.14

**Semikin Pavel Pavlovich**, post-graduate student, Joint Stock Company Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings, Moscow, Russia

## **SELECTION CRITERIA OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Developed criteria for the selection of high-rise buildings. The total mass of the objects being tested for compliance with a number of parameters. They are divided into two main groups — architectural and energetical. Application of the criteria allows to identify the «target group» of buildings and establish their basic characteristics.

**Key words:** criterion, architecture, high-rise buildings, functional solution, renewable energy sources.

## REFERENCES

1. High-rise Manual. Typology and Design, Construction and Technology [Text] / Trans of Engl. — M. : Atlant-Stroy Ltd., 2006. — 228 p.
2. The Skyscraper Center. The Global Tall Building Database of the CTBUH. Buildings 100 m+ in height // Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Chicago, 2014. URL: [http://skyscrapercenter.com/create.php?search=yes&page=0&type\\_building=on&status\\_COM=on&list\\_continent=&list\\_country=&list\\_city=&list\\_height=100&list\\_company=&completionsthrough=on&list\\_year=](http://skyscrapercenter.com/create.php?search=yes&page=0&type_building=on&status_COM=on&list_continent=&list_country=&list_city=&list_height=100&list_company=&completionsthrough=on&list_year=).
3. Semikin, P.P. Classification of types of high-rise buildings with renewable energy sources [Text] / P.P. Semikin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 10. — P. 91–96.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.078.2

А.В. КОРОТКИХ, Б.Д. ПРОСЯНИКОВ, **И.И. КРЫЛОВ**

### ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВЗАЙМНЫМ ПРОДАВЛИВАНИЕМ СОЕДИНЯЕМЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований соединений тонкостенных профилей, образованных взаимным продавливанием соединяемых элементов при помощи пакетов из шайб по ГОСТ и высокопрочных болтов.

**Ключевые слова:** соединения тонкостенных оцинкованных профилей, соединения, образованные взаимным продавливанием.

Тонкостенные оцинкованные профили (ТОП) на сегодняшний день получили широкое распространение в строительной практике. Несмотря на все их достоинства, они обладают рядом недостатков, один из которых — малая несущая способность узловых соединений, выполняемых преимущественно с применением обычных болтов и самонарезающих винтов. Это обстоятельство зачастую ограничивает шаг и пролет стропильных систем, выполненных на основе тонкостенных профилей. На основании вышесказанного в настоящее время разрабатываются и исследуются новые типы узловых соединений ТОП, обладающие большей несущей способностью в сравнении с традиционно используемыми.

В работах [1, 2] предложено повышать несущую способность соединений ТОП за счет применения фрикционных сдвигостойчивых соединений и фрикционных соединений с распределительной накладкой. К основным недостаткам оговоренных соединений можно отнести необходимость в предварительной подготовке поверхностей соединяемых элементов.

Другим существующим решением по повышению несущей способности соединений ТОП является применение соединений с взаимным продавливанием соединяемых профилей (далее СВП). Данные типы соединений были впервые предложены сотрудниками Казанского государственного архитектурно-строительного университета (КазГАСУ) (рис. 1, *a, в*) [3] и сотрудниками Сибирского федерального университета (СФУ) (рис. 1, *б, г*) [4]. Такой тип соединения создается за счет продавливания соединяемых профилей друг в друга при помощи шайб специальной конструкции и натяжения болтов соединения. В результате продавливания оклоболтовая зона приобретает конусовидную или шиповидную форму.

По заявлению авторов соединения СВП обладают несущей способностью до 2,5 раза большей по сравнению с соединениями на обычных болтах того же диаметра [4].

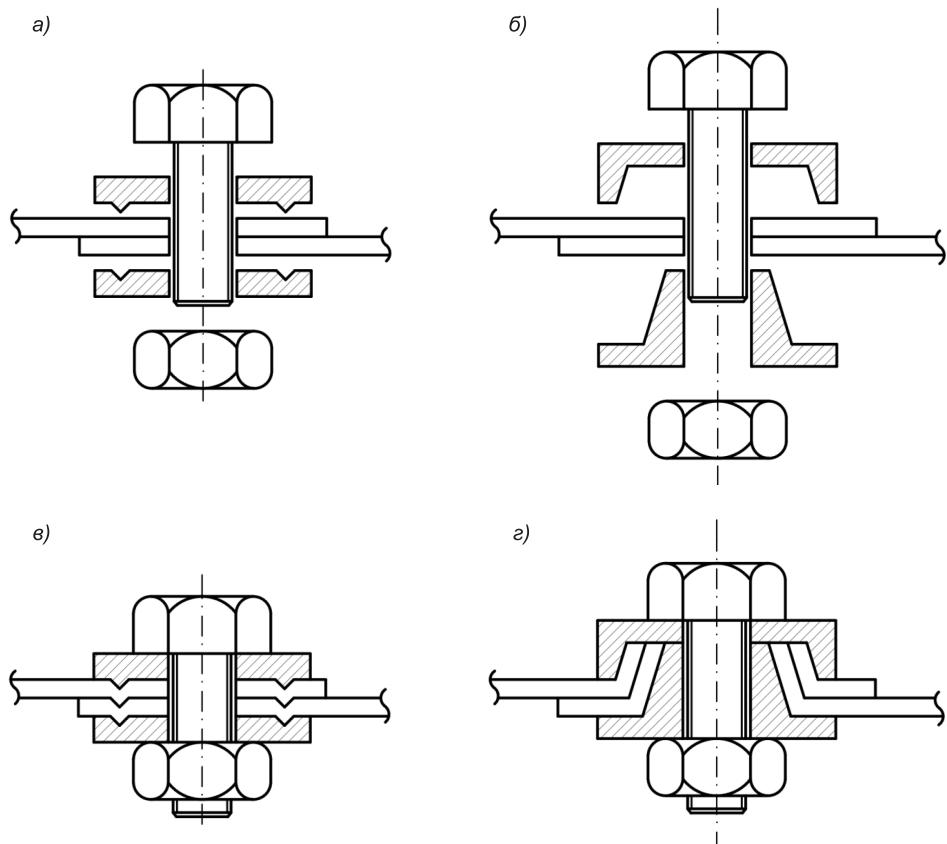


Рис. 1. Существующие решения соединений с взаимным продавливанием  
 а — вариант КазГАСУ до сборки; б — вариант СФУ до сборки; в — вариант КазГАСУ в собранном виде; г — вариант СФУ в собранном виде

Особенность работы соединений СВП заключается в передаче усилий не только в зоне соприкосновения болта с кромкой отверстия, но и в зоне взаимного продавливания элементов. В [3, 4] не предложена методика расчета и конструирования СВП, а также не даны рекомендации по назначению генеральных размеров шайб. Информация о соединениях подобного типа отсутствует в современной нормативной и технической документации, издаваемой в Российской Федерации, и в общедоступных зарубежных изданиях.

На основании вышесказанного авторами была поставлена цель по поиску эффективного решения соединений СВП и экспериментально-теоретического обоснования методики их конструирования и расчета, в том числе с учетом возможности их применения в условиях с технической ограниченностью. Для достижения поставленной цели в настоящей статье предлагается отказаться от применения специальных шайб в пользу стандартных, выпускаемых по ГОСТ, собираемых в пакеты (рис. 2).

- Шайбы, входящие в пакет, имеют следующее назначение:
- внутренняя шайба 5 — обеспечивает продавливание профилей во внутрь пакета;
  - наружная шайба 7 — обеспечивает необходимое приемное углубление для продавливаемого металла;

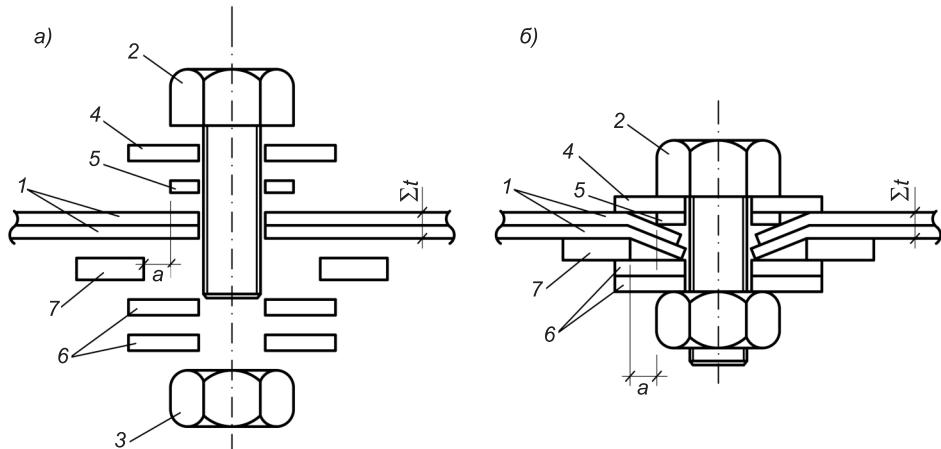


Рис. 2. Схема СВП с применением стандартных шайб

*a* — соединение до сборки; *б* — соединения в собранном виде; 1 — соединяемые элементы; 2 — болт; 3 — гайка; 4 — выравнивающая шайба; 5 — внутренняя шайба; 6 — силовой пакет шайб; 7 — наружная шайба

— силовой пакет шайб 6 — обеспечивает передачу на металл профиля усилия, необходимого для продавливания;

— выравнивающая шайба 4 — служит критерием правильности сборки соединения (полное касание кромки шайбы с поверхностью профиля свидетельствует о равномерном продавливании), препятствует преждевременному искривлению положения внутренней шайбы в процессе работы соединения.

В соответствии с рис. 2 на болт 2 собирается пакет из обычной 5 и увеличенной шайбы 4. Собранный пакет устанавливается в отверстие соединяемых элементов 1. С обратной стороны на болт собирается ответный пакет из обычной шайбы большого диаметра 7 и пакета из нескольких увеличенных шайб 6, после чего на болт накручивается гайка 3. Далее производится натяжение высокопрочного болта на расчетное усилие и инструментальный контроль плотности контакта выравнивающей шайбы 4 с поверхностью соединяемого элемента, в результате чего происходит выштамповка соединяемых элементов друг в друга.

Цель настоящего поискового исследования — определение критерия назначения рационального состава пакета шайб для соединяемых стальных элементов толщиной до 2 мм.

Задачи исследования:

- 1) первоначальное экспериментальное изучение особенностей деформированного состояния и перехода в предельное состояние одноболтовых соединений ТОП с взаимным продавливанием;
- 2) экспериментальное определение рациональных составов пакетов шайб;
- 3) нахождение способа качественной сборки и центрирования пакетов шайб;
- 4) экспериментальное выявление проблем СВП и путей их решения.

Для экспериментального изучения были собраны образцы одноболтовых соединений из оцинкованного ( $t = 1,5$  мм) и неоцинкованного ( $t = 2$  мм) стального листового проката.

Фактические механические характеристики оцинкованного проката  
 $t = 1,5 \text{ мм} — \sigma_t = 2640 \text{ кгс}/\text{см}^2; \sigma_b = 2787 \text{ кгс}/\text{см}^2;$   
 стального неоцинкованного проката  
 $t = 2 \text{ мм} — \sigma_t = 3257 \text{ кгс}/\text{см}^2; \sigma_b = 3809 \text{ кгс}/\text{см}^2.$

Соединения собирались с применением болтов М10 и М12 класса прочности 8.8. Рассматриваемые составы пакетов шайб, каждый из которых применен к элементам с толщиной  $t = 1,5$  и  $2 \text{ мм}$ , приведены в табл. 1. В рамках выполняемого поискового исследования собрано по три соединения каждого типа.

Таблица 1. Составы пакетов шайб

Обозначения шайб (рис. 2)	Состав пакетов шайб для болтов						
	M10				M12		
Выравнивающая шайба ГОСТ-6958-78	M10				M12		
Внутренняя шайба ГОСТ-1137-78	M10				M12		
Наружная шайба ГОСТ-1137-78	M24	M27	M30	M36	M27	M30	M36
Силовой пакет шайб* ГОСТ-6958-78	M10(2)	M10(1) M12(1) M14(1)	M10(1) M12(1) M14(1)	M10(1) M12(1) M14(1)	M12(3)	M12(2) M14(1)	M12(2) M14(1)

\* Для силовых пакетов шайб в скобках указано количество шайб в пакете.

Критерием при выборе пакетов шайб служило обеспечение минимально необходимого пространства между внутренней 5 и внешней 7 шайбами (рис. 2, а) для взаимного продавливания элементов,  $a \geq \Sigma t$ . Исходя из сортаментов шайб по ГОСТ-1137-78, ГОСТ-6958-78, в экспериментальных исследованиях величина зазора принята  $a = (1,01\dots1,5) \Sigma t$ .

Для обеспечения центрирования пакетов шайб при сборке соединений была изготовлена специальная насадка.

При изготовлении экспериментальных образцов соприкасающиеся поверхности элементов были обработаны твердым смазывающим составом. Это позволило исключить влияние сил трения, снижающих точность оценки работы зоны взаимного гиба в рамках настоящего исследования. Натяжение болтов осуществлялось при помощи динамометрического ключа. Критерием сборки являлось соприкосновение выравнивающей шайбы (рис. 2, 4) с поверхностью элемента. При сборке экспериментальных образцов проводился только визуальный контроль качества сборки.

В качестве силовой установки была использована гидравлическая машина ГМС-50. Для регистрации деформаций в оклоболтовой зоне соединения устанавливались прогибомеры (рис. 3). База замера деформаций принята 150 мм, исходя из технической возможности расположения датчиков. За предельное состояние соединений приняты суммарные деформации смятия соединяемых элементов, равные  $d = 6 \text{ мм}$  (деформации смятия  $d = 3 \text{ мм}$  для каждого из соединяемых элементов)<sup>1</sup>. Относительно

<sup>1</sup> Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. 1990 (см. табл. 6).

малые упругие деформации металла с принятой базы ( $0,07\ldots0,15$  мм) пренебрегались.

Испытания проводились на растягивающие усилия до полного исчерпания несущей способности соединения. Нагрузка прикладывалась с шагом 100 кгс, регистрация показаний прогибомеров проводилась на каждом шаге приложения нагрузки после стабилизации деформаций. Для качественного сравнения наравне с соединениями СВП проводились испытания обычных срезных соединений на болтах того же диаметра. Графики работы соединений по результатам испытаний приведены на рис. 4–7. Характерные точки графиков имеют следующее обозначение:

$N_{\text{пред}}$  — значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 3$  мм);

$N_{\text{разр}}$  — значение разрушающей нагрузки;

$N_{\text{смят}}$  — значение несущей способности по критерию смятия<sup>2</sup> на обычных болтах;

$N_{\text{осл},B}$  ( $N_{\text{осл},T}$ ) — значение несущей способности соединения по ослабленному сечению по фактическому временному сопротивлению (пределу текучести).

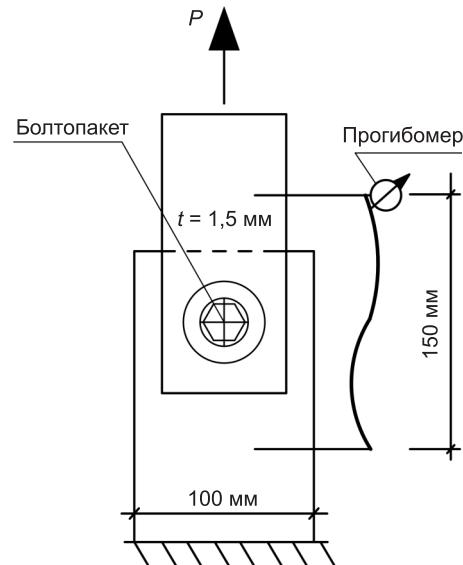


Рис. 3. Модель испытываемых соединений

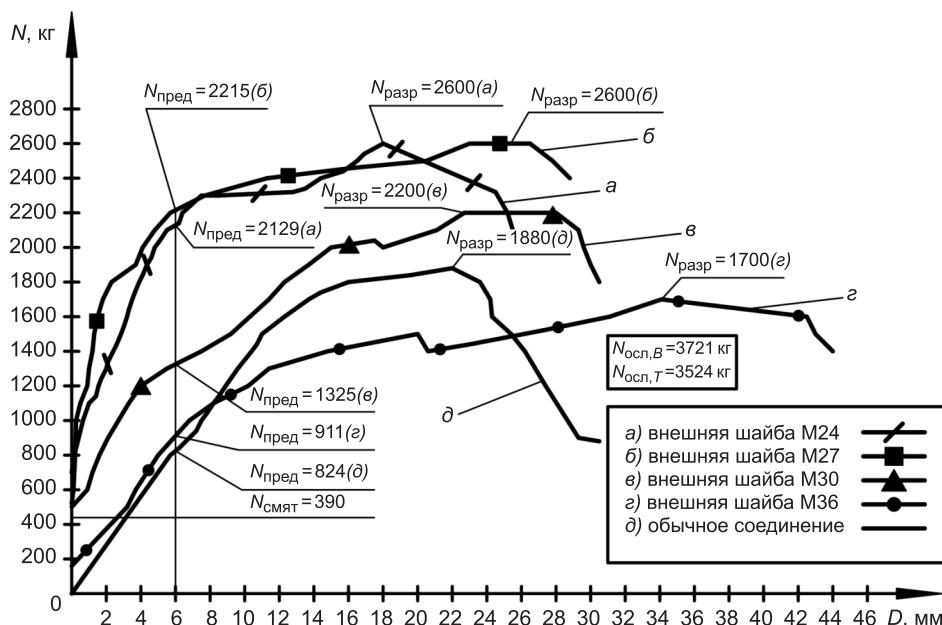


Рис. 4. Диаграмма работы одноболтовых СВП соединений (болт M10, сталь  $t = 1,5$  мм)

<sup>2</sup> СНиП II.23-81\*. Стальные конструкции. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 90 с.

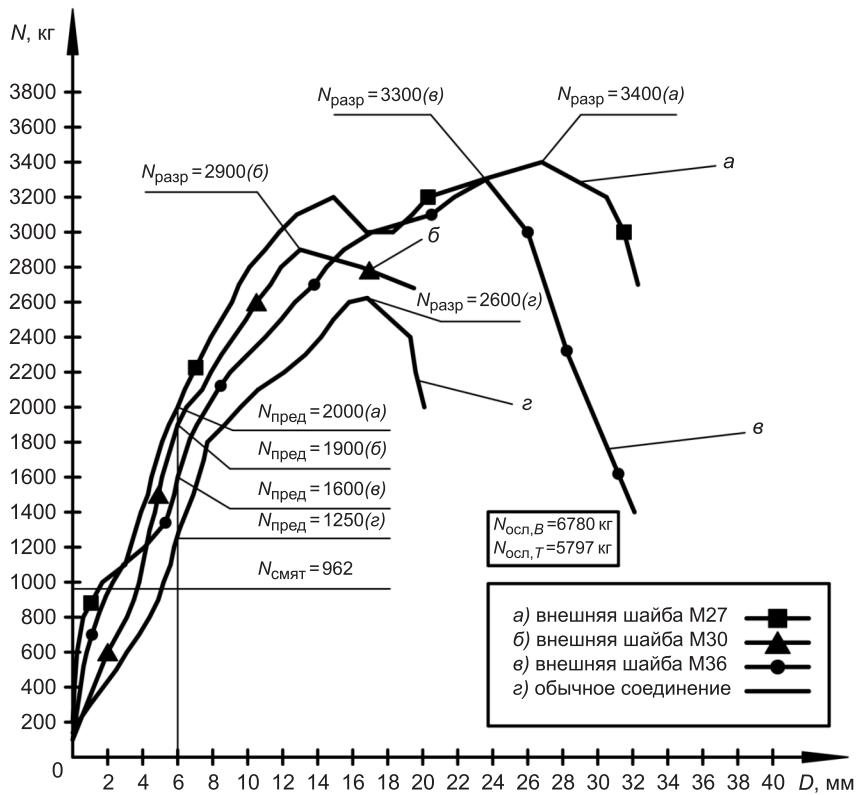


Рис. 5. Диаграмма работы одноболтовых соединений  
(болт М10, сталь  $t = 2$  мм)

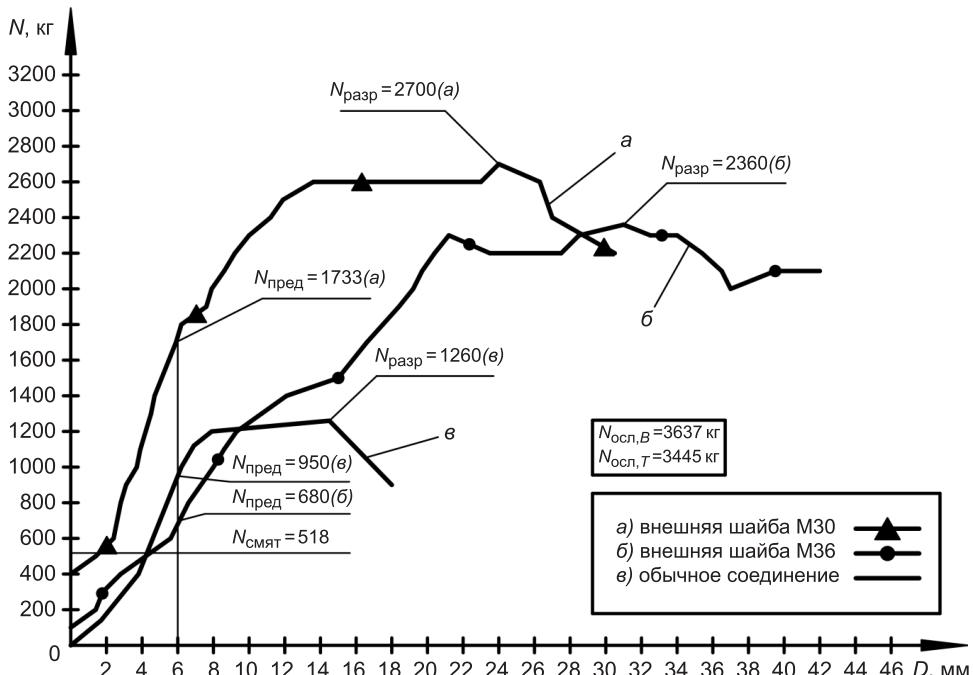


Рис. 6. Диаграмма работы одноболтовых соединений  
(болт М12, сталь  $t = 1.5$  мм)

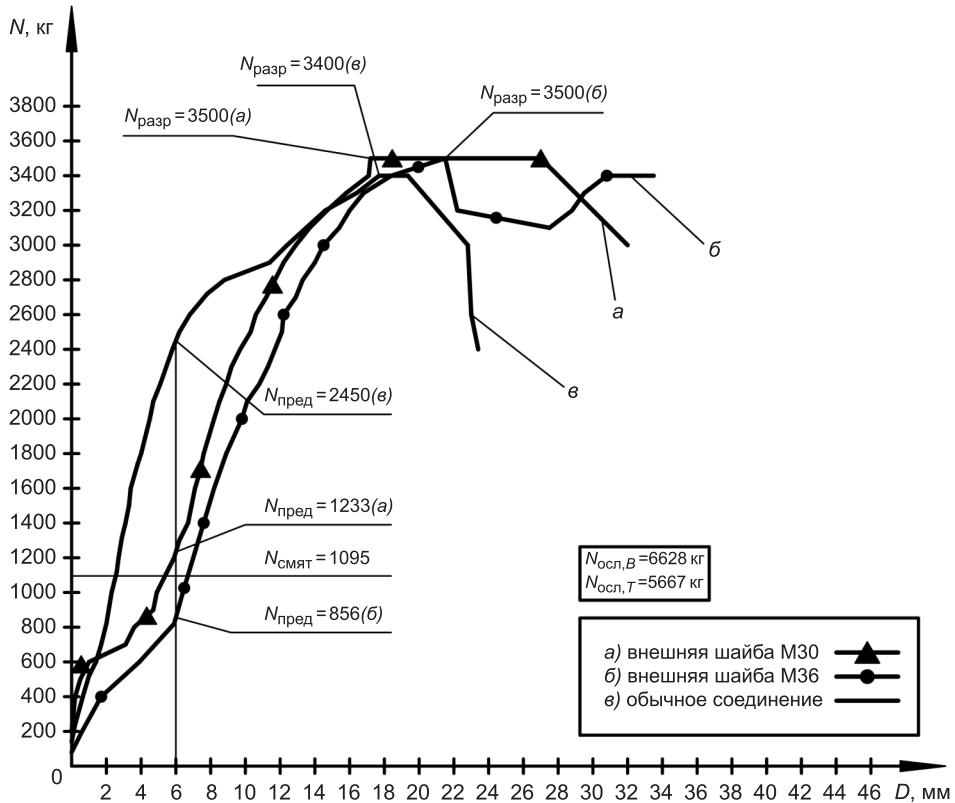


Рис. 7. Диаграмма работы одноболтовых соединений (болт М12, сталь  $t = 2$  мм)

Для количественной оценки влияния зоны взаимногогиба соединяемых элементов на работу соединения произведена расчетная оценка соединений по критерию смятия с диаметрами болтов М24, М27, М30, М36, соответствующими диаметру зоныгиба по внутреннему диаметру наружных шайб (см. рис. 2, 7). Экспериментальные и расчетные усилия для испытанных соединений приведены в табл. 2.

По результатам качественной оценки экспериментальных данных установлено:

#### Для соединений на болтах М10

1. Экспериментально определено, что рациональными являются пакеты шайб с наружными шайбами М24 и М27.

2. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах М10 и с наружными шайбами М24 и М27 при толщине проката  $t = 1,5$  мм, в 4,8–5,0 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах М10 мм.

3. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах М10 и с наружными шайбами М27 при толщине проката  $t = 2,0$  мм, в 2 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах М10 мм.

4. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных усилий одноболтовых соединений ТОП

Марка болта	Наименование критерия	Расчетные усилия по фактическим характеристикам стали в зависимости от толщины профиля и марки наружной шайбы, кгс							
		$t = 1,5 \text{ мм}$			$t = 2,0 \text{ мм}$				
		M24	M27	M30	M36	M24	M27	M30	M36
	Эксперимент (СВП) Предельное состояние ( $\Delta = 6 \text{ мм}$ )	2129	2215	1325	911	—	2000	1900	1600
	Смятие по СНиП (по диаметру наружной шайбы)	997	1116,7	1236,3	1475,6	—	2358,8	2611,442	3116,882
M10	Смятие по EUROCODE (по диаметру наружной шайбы)	1672,2	1672,2	1672,2	1672,2	—	3047,2	3047,2	3047,2
	Эксперимент (обычное соединение) Предельное состояние ( $\Delta = 6 \text{ мм}$ )	824	—	—	—	—	1250	—	—
	Смятие по СНиП (по диаметру болта)	438,7	—	—	—	—	962,6	—	—
	Смятие по EUROCODE (по диаметру болта)	919,7	—	—	—	—	1675,9	—	—
M12	Эксперимент (СВП) Предельное состояние ( $\Delta = 6 \text{ мм}$ )	—	—	1733	680	—	—	1233	856
	Смятие по СНиП (по диаметру наружной шайбы)	—	—	1236,3	1475,6	—	—	2611,4	3116,9
	Смятие по EUROCODE (по диаметру наружной шайбы)	—	—	1672,2	1672,2	—	—	3047,2	3047,2
	Эксперимент (обычное соединение) Предельное состояние ( $\Delta = 6 \text{ мм}$ )	950	—	—	—	—	2450	—	—
	Смятие по СНиП (по диаметру болта)	518,5	—	—	—	—	1095	—	—
	Смятие по EUROCODE (по диаметру болта)	1086,9	—	—	—	—	1980,7	—	—

M10 и с наружными шайбами M24 и M27 при толщине проката  $t = 1,5$  мм, в 1,9–2,1 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M24 и M27 мм.

5. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 3$  мм) для соединений СВП на болтах M10 и с наружными шайбами M27 при толщине проката  $t = 2,0$  мм, в 0,8 раза меньше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M27 мм.

#### *Для соединений на болтах M12*

1. Экспериментально определено, что рациональными являются пакеты шайб с наружными шайбами M30.

2. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах M12 и с наружными шайбами M30 при толщине проката  $t = 1,5$  мм, в 3,3 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M12 мм.

3. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах M12 и с наружными шайбами M30 при толщине проката  $t = 2,0$  мм, в 1,1 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M12 мм.

4. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах M12 и с наружными шайбами M30 при толщине проката  $t = 1,5$  мм, в 1,4 раза больше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M30 мм.

5. Экспериментальное значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния ( $D = 6$  мм) для соединений СВП на болтах M12 и с наружными шайбами M30 при толщине проката  $t = 2,0$  мм, в 0,5 раза меньше расчетного значения по критерию смятия<sup>2</sup> для соединений на обычных болтах M30 мм.

**Выводы.** 1. Экспериментально определены рациональные пакеты шайб для болтов M10 и M12 для проката толщиной 1,5 и 2,0 мм.

2. На основании экспериментальных данных установлено, что увеличение несущей способности соединений СВП по сравнению с обычными соединениями на болтах M10 и M12 связано с передачей усилий в зоне взаимного гиба соединяемых элементов по внутреннему диаметру наружных шайб (см. рис. 2, 7), а не в зоне соприкосновения тонких кромок отверстия с телом болта.

3. При увеличении внутреннего диаметра наружной шайбы значительно увеличивается деформативность соединения и снижается нагрузка, соответствующая наступлению предельного состояния.

4. Необходимо разработать точные критерии контроля качества сборки.

5. Результаты проведенных первичных исследований подтверждают актуальность исследования соединений, образованных продавливанием соединяемых элементов при помощи пакетов из шайб по ГОСТ, а также необходимость в разработке инженерной методики их расчета и конструирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коротких, А.В. Особенности работы одноболтовых трения сдвигостойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 10. — С. 117–122.
2. Коротких, А.В. Особенности работы двух- и трехболтовых трения сдвигостойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, И.И. Крылов, В.Г. Черкасов // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 2. — С. 3–14.
3. Кузнецов, И.Л. Разработка и исследование новых типов соединений тонкостенных элементов [Текст] / И.Л. Кузнецов, В.А. Вишневский // Тез. докл. науч.-практ. конф. — 2005. — С. 24.
4. Пат. RU 2 264 507 С1, МПК Е 04 В 1/58. — Опубл. 20.11.2005, Бюл. № 32.

*КОРОТКИХ Александр Васильевич, канд. техн. наук  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ПРОСЯНИКОВ Борис Дмитриевич, магистр  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

*[КРЫЛОВ Иосиф Иосифович], канд. техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 21.01.14

**Korotkikh Alexander Vasilievich**, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Prosyannikov Boris Dmitrievich**, post-graduate student, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**[Krylov Iosif Iosifovich]**, candidate of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **FEATURES OF WORK OF CONNECTIONS FORMED BY JACKING CONNECTED ELEMENTS OF THE THIN-WALLED ZINCED PROFILES**

This paper reviews the results of experimental studies of zinc walled profiles connections formed by jacking connected elements with packing of washers by GOST and high-strength bolts.

**Key words:** zinc walled profiles connections, connections formed by jacking.

## REFERENCES

1. Коротких, А.В. Features of work one bolt frictional not shifted connections of the thin-walled zinned profiles [Text] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 10. — P. 117–122.
2. Коротких, А.В. Features of work two and a lot of bolts frictional not shifted connections of the thin-walled zinned profiles [Text] / А.В. Коротких, И.И. Крылов, В.Г. Черкасов // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 2. — P. 3–14.
3. Кузнецов, И.Л. Development and research of new thin-walled elements connection types [Text] / И.Л. Кузнецов, В.А. Вишневский // Theses of reports of scientific conferences. — 2005. — P. 24.
4. Pat. RU 2 264 507 С1, МПК Е 04 В 1/58. — Publ. 20.11.2005, Bull. N 32.

**УДК 692.522.2+692.522.3**

**В.М. МИТАСОВ, А.А. КОЯНКИН**

## **РАБОТА ДИСКА СБОРНО-МОНОЛИТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ**

На основании проведенных натурных испытаний фрагмента перекрытия исследована работа диска сборно-монолитного перекрытия под действием эксплуатационной нагрузки.

**Ключевые слова:** сборно-монолитное перекрытие, пустотные плиты, сборно-монолитные ригели, несущая способность, жесткость, трещиностойкость.

В настоящее время здания из сборно-монолитного железобетона в практике современного российского и зарубежного строительства достаточно широко распространены. Это связано с тем, что сборно-монолитное исполнение каркаса позволяет максимально удачно использовать плюсы монолитного и сборного домостроения, при этом минимизируя их минусы [1].

В частности, отметим положительные моменты, «наследуемые» от монолитных зданий:

- возможность создания зданий практически любых форм и размеров, что позволяет в большей степени, нежели в зданиях из сборного железобетона, обеспечить современные объемно-планировочные решения, а также выполнить здания более выразительными;

- большая пространственная жесткость сборно-монолитных зданий, обусловленная отсутствием монтажных стыков;

- возможность максимально эффективного использования сборных железобетонных конструкций. То есть за счет оптимизации шага вертикальных и, соответственно, пролета горизонтальных несущих конструкций максимально полностью используется несущая способность сборных железобетонных элементов. В то время как в зданиях из сборного железобетона нередко применяются элементы с завышенной несущей способностью, в связи с ограниченностью номенклатуры существующих изделий, что приводит к повышенному расходу бетона и арматуры. При этом в монолитном железобетоне армирование происходит исходя из действующих усилий в каждом элементе, т.е. в итоге значительного переармирования конструкций можно избежать;

- снижение трудозатрат и отсутствие необходимости в высококвалифицированных кадрах для выполнения сложных и высокоточных работ по устройству стыковых соединений, которые, как правило, располагаются в наиболее напряженных и, соответственно, наиболее ответственных местах здания;

- наличие скрытых монолитных ригелей или выполнение монолитных безбалочных перекрытий, дающее больше возможностей в плане устройства объемно-планировочных решений, без снижения полезной высоты помещений;

- сейсмостойкость.

Плюсами сборных зданий, переходящими в сборно-монолитное строительство, являются:

- устройство более легких и более жестких перекрытий, которые выполняются за счет возможностей заводов железобетонных конструкций создавать плиты различных геометрических сечений и из различных конструктивных материалов. Результат — снижение общей массы здания, а следовательно, и снижение затрат по устройству фундаментов и вертикальных несущих конструкций;
- сокращение сроков строительства за счет максимального ухода от бетонных и арматурных работ, выполняемых непосредственно на строительной площадке;
- возможность более качественного выполнения предварительного напряжения в конструкциях в сравнении с монолитным железобетоном;
- минимизация использования опалубки;
- относительная простота производства работ при отрицательных температурах наружного воздуха.

К недостаткам сборно-монолитного домостроения можно отнести:

- одновременную зависимость от завода железобетонных изделий и поставщиков бетонной смеси;
- слабую изученность пространственной работы сборно-монолитных зданий;
- недостаточную отображенность в нормативных документах особенностей расчета зданий из сборно-монолитного железобетона, а соответственно, и недостаточную точность существующих методик расчета;
- нарушение основного принципа проектирования железобетонных сборно-монолитных конструкций:
  - здания из сборных конструкций монтируются по статически определимой схеме;
  - здания в сборном исполнении рассчитывают только на вертикальные нагрузки от собственного веса и веса монтажников.

Именно последние факторы и приводят к тому, что в реальном проектировании и дальнейшем строительстве возникают необъективно завышенные несущая способность, жесткость и трещиностойкость конструкции сборно-монолитного перекрытия, что ведет к повышенному расходу материалов и в итоге к высокой себестоимости квадратного метра жилья.

Для проверки конструктивной надежности технических решений, заложенных в проектах при проектировании и строительстве жилых домов № 1, 2 II микрорайона Покровский в г. Красноярске, были проведены натурные испытания фрагмента сборно-монолитного перекрытия. Конструктивная система вышеуказанных домов — каркасная, включающая сборные колонны и диафрагмы жесткости, а также сборно-монолитные перекрытия, состоящие из пустотных плит перекрытия и сборно-монолитных ригелей. Наружные ненесущие стены выполнены трехслойными, состоящими из внутреннего слоя пенобетонных блоков толщиной 250 мм, среднего слоя пенополистирольных плит толщиной 140 мм и наружного слоя керамического кирпича толщиной 120 мм. Тип каркаса аналогичен каркасу Saret, разработанному французскими строителями и переработанному под российские условия строительства многими строительными организациями России, в числе которых и Красноярская строительная компания «Монолитхолдинг».

а)



б)

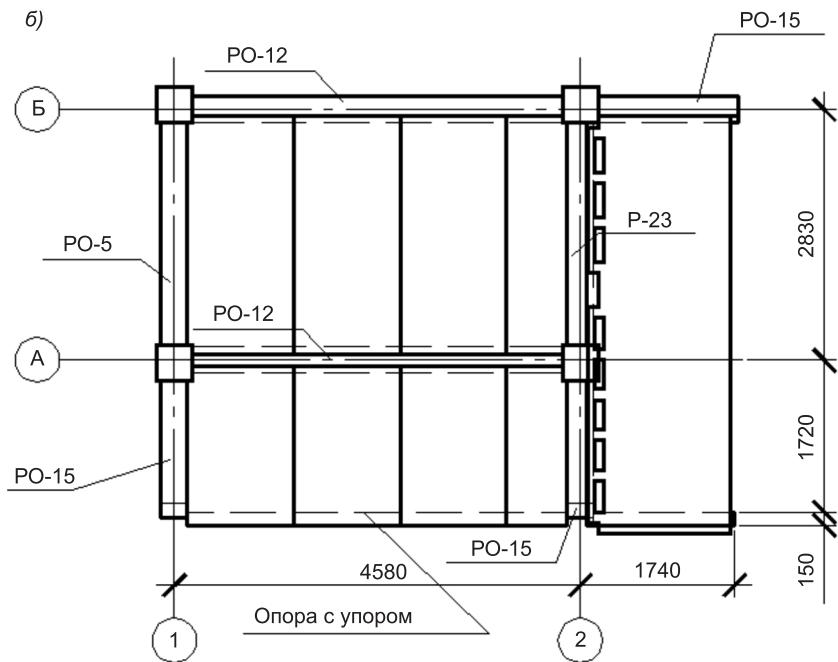


Рис. 1. Фрагмент сборно-монолитного перекрытия  
а — фото, б — схема расположения сборных элементов

Испытания фрагмента сборно-монолитного перекрытия проводились на заводе ООО «Монолитресурс» в г. Красноярске. Фрагмент сборно-монолитного перекрытия размерами  $6430 \times 4940 \times 2800(h)$  мм (рис. 1) выполнен из сборных железобетонных колонн сечением  $400 \times 400$  мм, армирован

ванных продольной арматурой  $4\varnothing 25A400$ , установленной по углам, и по-перечной арматурой  $\varnothing 8A240$ ; сборно-монолитного перекрытия, состоящего из преднапряженных пустотных плит перекрытия, армированных напрягаемыми канатами  $7\varnothing 12K1500$ , и сборно-монолитных пред-напрягаемых ригелей, сечением сборной части  $300\times250(h)$  мм, которая армирована  $3\varnothing 12K1500$  (ригели РО-15) или  $4\varnothing 12K1500$  (ригель РО-12, Р-23, РО-5); узлы сопряжения ригеля с колонной выполнены жесткими с двумя стержнями  $\varnothing 32A400$  в опорной зоне; узлы сопряжения плит с ригелями выполнены с оправлением пустотных плит на сборную часть ригеля с выполнением верхней монолитной части ригеля со шпонками, армированными одним стержнем  $\varnothing 10A400$  и заходящими в тело пустотной плиты.

В процессе испытаний изучали деформирование сборно-монолитного перекрытия при поэтапном загружении до нагрузки, превосходящей расчетную.

Загружение производили в четыре этапа, путем раскладки фундаментных блоков сплошных (ФБС) и имеющихся в наличии на заводе сборных ригелей:

на 1-м этапе суммарная нагрузка на балкон достигла 8,10 кН, что соответствует  $2,02 \text{ кН}/\text{м}^2$  на площади шириной 0,8 м от края балкона, а суммарная нагрузка на перекрытие достигла 38,80 кН, что соответствует  $1,76 \text{ кН}/\text{м}^2$ ;

на 2-м этапе суммарная нагрузка на балкон достигла 16,20 кН, что соответствует  $4,04 \text{ кН}/\text{м}^2$  на площади шириной 0,8 м от края балкона, а суммарная нагрузка на перекрытие достигла 76,60 кН, что соответствует  $3,44 \text{ кН}/\text{м}^2$ ;

на 3-м этапе суммарная нагрузка на балкон достигла 24,30 кН, что соответствует  $6,06 \text{ кН}/\text{м}^2$  на площади шириной 0,8 м от края балкона, а суммарная нагрузка на перекрытие достигла 101,10 кН, что соответствует  $4,58 \text{ кН}/\text{м}^2$ ;

на 4-м этапе суммарная нагрузка на балкон не увеличилась и по-прежнему составляла 24,30 кН, что соответствует  $6,06 \text{ кН}/\text{м}^2$  на площади шириной 0,8 м от края балкона, но суммарная нагрузка на перекрытие достигла 123,60 кН, что соответствует  $5,60 \text{ кН}/\text{м}^2$ .

При этом итоговые нагрузки на перекрытие, которые принимаются при проектировании, составляют в жилых комнатах —  $2,72 \text{ кН}/\text{м}^2$  (нормативная) и  $3,36 \text{ кН}/\text{м}^2$  (расчетная); на балкон —  $4,72 \text{ кН}/\text{м}^2$  (нормативная) и  $5,66 \text{ кН}/\text{м}^2$  (расчетная).

Прогибы перекрытия и деформации элементов конструкции определяли при помощи прогибомеров 5ПАО-ЛИСИ, индикаторов часового типа ИЧ-10 и универсального многоканального измерителя-регистратора ТЕРЕМ-4.0 с датчиками перемещения ДПЛ-10 (рис. 2).

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что несущая способность, жесткость и трещиностойкость обеспечены с большим запасом по всем трем вышеперечисленным факторам. В частности, при загружении фрагмента сборно-монолитного перекрытия даже до нагрузки, которая более чем в 1,5 раза выше расчетной, образования

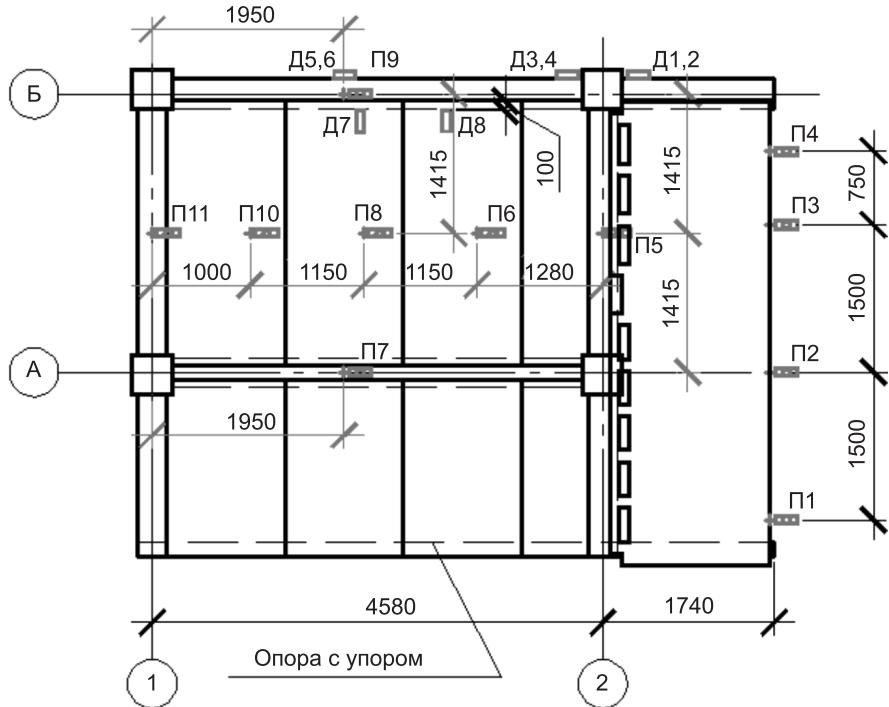


Рис. 2. Схема расположения приборов

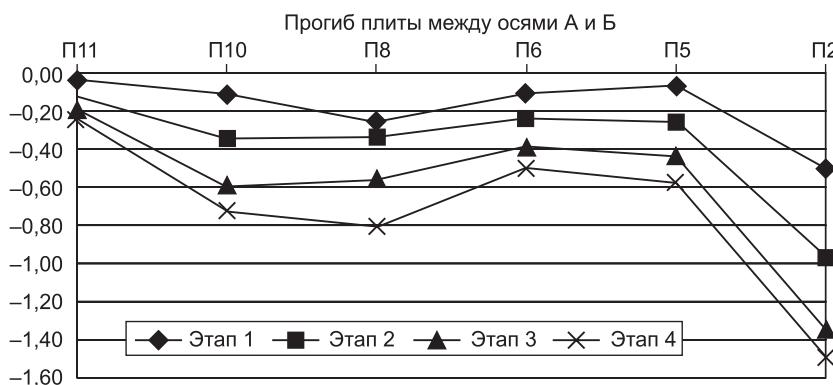
трещин зафиксировано не было. Визуальное отсутствие трещин подтвердили и значения величин относительных деформаций растяжения, определяемые в пролете жестко защемленного ригеля перекрытия. Относительные деформации растяжения не превысили предельного значения 0,0001, что объясняется наличием преднатяжения нижней арматуры.

Вертикальных смещений элементов друг относительно друга при проведении испытаний обнаружено не было, о чем свидетельствуют неизменные значения индикаторов часового типа ИЧ-10, которые были установлены на стыке ригелей с колоннами.

На 4-м этапе загружения величина прогибов диска перекрытия не превысила 0,9 мм, притом что нормативно допустимая величина прогиба составляет 19 мм. Малый прогиб диска перекрытия объясняется применением сборно-монолитных ригелей и пустотных плит, которые обладают достаточно большой изгибной жесткостью, а также выполняются преднатяженными.

Максимальный прогиб балконной плиты составил 1,5 мм при нормативно допустимой величине 10 мм. При этом, как и ожидалось, больше прогиб балконной плиты был со стороны, выполненной без ригеля (рис. 3).

Характер и равномерность прогибов диска перекрытия указывают на отсутствие взаимного сдвига по вертикали смежных пустотных плит перекрытия относительно друг друга. Таким образом, был сделан вывод о целостности и отсутствии повреждений в межплитных швах. Визуально признаков разрушения швов обнаружено не было.



*Рис. 3. Прогибы перекрытия между осями А и Б*

Наибольшая величина относительных деформаций сжатия, определенная в месте установки тензометрических датчиков перемещения, не превысила предельного нормативного значения, равного 0,002.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что сборно-монолитные перекрытия жилых домов, проектируемых и строящихся по французской серии Saret, обладают значительным запасом прочности и жесткости. Данный фактор (излишне завышенная надежность) неизбежно приведет к увеличению стоимости этого жилища вследствие повышенного расхода материалов и трудозатрат, что реально повлияет на рынок недвижимости.

**Выводы.** 1. Существует большое количество слабоизученных вопросов, касающихся теории работы сборно-монолитных конструкций.

2. Необходимо построить модели конструктивных систем сборно-монолитных зданий для определения оптимальных (рациональных) их параметров с учетом усовершенствования технологии производства строительно-монтажных работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митасов, В.М. К вопросу учета и уменьшения влияния начальных геометрических несовершенств при возведении многоэтажных каркасных зданий [Текст] / В.М. Митасов, В.Г. Себешев, Г.Г. Асташенков, М.А. Логунова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 2. — С. 91–97.

**МИТАСОВ** Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mitassovv@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**КОЯНКИН** Александр Александрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: koyankinaa@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено после доработки 17.01.14

**Mitasov Valeriy Mikhaylovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mitassovv@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Koyankin Aleksandr Alexandrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: koyankinaa@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **WORK OF A DISK COMBINED AND MONOLITHIC OVERLAPPING**

On the basis of the carried-out natural tests of a fragment of overlapping work of a disk of combined and monolithic overlapping under the influence of operational loading is investigated.

**Key words:** combined and monolithic overlapping, hollow plates, combined and monolithic crossbars, bearing ability, rigidity, crack resistance.

### **REFERENCES**

1. Mitasov, V.M. The issue of accounting and reducing impact of the initial geometric imperfections in construction of multi-storied buildings frame [Text] / V.M. Mitasov, V.G. Sebeshev, G.G. Astashenkov, M.A. Logunova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 2. — P. 91–97.
-

УДК 624.045

Т.Л. ДМИТРИЕВА, ЛЕ ЧАН МИНЬ ДАТ

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФЕРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрена постановка задачи оптимизации статически определимой фермы в форме задачи нелинейного математического программирования. Приведено решение этой задачи с использованием программного комплекса ANSYS. Даётся сравнительный анализ полученных результатов с аналогичным расчетом в программном комплексе расчета и оптимизации стальных конструкций (ROCK).

**Ключевые слова:** оптимизация, ПК ANSYS, оптимальное проектирование конструкций, комплекс программ, нелинейное математическое программирование.

**Введение.** Наряду с развитием науки и технологий природные ресурсы истощаются. В связи с этим выдвигаются требования к разработке новых материалов, а также к оптимальному использованию уже имеющихся. Однако стремление к оптимизации и максимальному облегчению конструкций требует особого внимания к обеспечению их надежности с учетом нагрузок от современного оборудования, природных условий и других факторов. Наиболее полно постановка такой задачи может быть формализована в виде задачи нелинейного математического программирования, где критерий оптимальности определяется назначением целевой функции  $f(x)$  (как правило, объем или вес конструкции) [1–4]:

найти

$$\min f(x), x \in E^n; \quad (1)$$

при ограничениях

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m_1; \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0, j = m_1 + 1, \dots, m. \quad (3)$$

Для получения оптимального проекта варьируются геометрические и физические параметры, формализованные в виде вектора  $\{X\}$ , который может изменяться на интервале  $\{X^L\}, \{X^U\}$  непрерывно либо дискретно. Функции (2) накладывают ограничения на параметры состояния системы  $P(x)$  (перемещения узлов, внутренние силовые факторы, напряжения и т.д.).

### Описание модуля оптимизации в ПК ANSYS

Решение практических задач оптимального проектирования отдельных конструкций и сооружений в целом невозможно без использования современных программных средств. Рассмотрим алгоритмы оптимизации, заложенные в программном комплексе (ПК) ANSYS.

Модуль Design Optimization управляет процессом создания оптимального проекта. Это проект, удовлетворяющий предъявленным к нему требованиям, при минимизации заданных факторов (вес, масса, площадь поверхности, объем и т.д.). Варьируются при этом параметры проекта: размеры, форма, расположение опор, собственные частоты, свойства ма-

териала и т.д. Для решения проблем оптимизации используется два алгоритма. Метод аппроксимации подзадачи является методом прямого поиска и может быть эффективно применен для большинства технических проблем. Метод первого порядка основан на чувствительности проекта и более подходит для задач, требующих высокой точности.

*Метод аппроксимации подзадачи* можно отнести к методу нулевого порядка, который в процессе поиска вычисляет значения переменных, но не их производные. При этом используется аппроксимация целевой функции и переменных состояния. Далее выполняется преобразование задачи оптимизации с ограничениями в задачу, не имеющую ограничений.

При аппроксимации вычисляются значения целевой функции для нескольких наборов переменных проекта. Затем методом наименьших квадратов создается функциональная зависимость в виде аппроксимирующей линии (или поверхности). Каждый цикл оптимизации создает новую точку данных, и аппроксимация целевой функции обновляется. Переменные состояния обрабатываются тем же способом. Аппроксимация создается для каждой переменной состояния и обновляется в конце каждого цикла.

Имеется возможность контроля характера функции, используемой для аппроксимации (линейная, квадратичная, квадратичная с перекрестными членами). По умолчанию для целевой функции  $\hat{f}$  используется квадратичная зависимость с перекрестными членами, а для переменных состояний — квадратичная зависимость

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j. \quad (4)$$

Преобразование в задачу, не имеющую ограничений, проводится добавлением штрафных функций к аппроксимированной целевой функции  $\hat{f}$

$$F(x, p_k) = \hat{f} + \left[ \sum_{i=1}^{n_x} X(x_i) + \sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=m_1+1}^m H(h_i) \right], \quad (5)$$

где  $X$  — штрафная функция для переменных проекта;  
 $G, H$  — штрафные функции для переменных состояния;  
 $g$  — функция ограничений, куда входят аппроксимированные переменные состояния.

Решение задачи на безусловный экстремум проводится методом последовательной минимизации (МПБМ) (Sequential Unconstrained Minimization Technique, SUMT) [2].

Сущность МПБМ сводится к следующему: ищется решение некоторой последовательности задач без ограничений, причем в пределе находится минимум исходной задачи НП путем построения  $G$ -функции следующего вида:

$$G(x^{(k)}, r^{(k)}) = f(x^{(k)}) + (r^{(k)})^{-1/2} \sum_{i=m_1+1}^m h_i^2(x^{(k)}) + r^{(k)} \sum_{i=1}^{m_1} \frac{1}{g_i(x^{(k)})}, \quad (6)$$

где  $k$  — номер текущей итерации;  
 $r$  — значения весовых коэффициентов, которые положительны и образуют монотонно убывающую последовательность  $r(0) > r(1) > \dots > 0$ .

Сходимость достигнута, если выполнено любое из следующих условий:

— изменение значения целевой функции текущего проекта по отношению к лучшему выполнимому проекту либо между двумя последними проектами меньше заданного допуска;

— изменение значений всех переменных проекта между текущим проектом и лучшим выполнимым проектом либо между двумя последними проектами меньше заданных допусков.

Наличие сходимости не обязательно указывает на получение глобального минимума. Расчет может быть прекращен до обнаружения сходимости, если достигнуто предельное число циклов.

*Метод первого порядка* также преобразует исходную задачу в задачу «без ограничений» посредством добавления к целевой штрафных функций:

$$Q(x, q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left[ \sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=m_1+1}^m P_h(h_i) \right], \quad (7)$$

где  $f_0$  — значение целевой функции, которое выбирается из текущей группы проектных множеств;

$P_x$  — штрафная функция для переменных проекта;

$P_g, P_h$  — штрафные функции для переменных состояния;

$q$  — параметр поверхности отклика [2].

В отличие от метода аппроксимации подзадачи этот метод использует градиенты переменных состояния по переменным проекта. Для минимизации задачи на безусловный экстремум (7) используются метод скорейшего спуска или метод сопряженных направлений. Таким образом, каждая итерация состоит из набора внутренних итераций, которые определяют направление поиска и вычисления градиента.

По сравнению с методом аппроксимации подзадачи, метод первого порядка затрачивает большие ресурсы и является более точным. Однако высокая точность не всегда гарантирует сходимость и устойчивость этого метода.

Проверка сходимости выполняется аналогично методу аппроксимаций подзадачи.

**Примеры оптимизации фермы в ПК ANSYS.** Рассмотрим статически определимую 11-стержневую ферму (рис. 1), нагруженную узловыми силами на верхнем поясе. Требуется подобрать параметры сечений элементов из условия минимума объема конструкции. Заданы ограничения по прочности (на максимальные напряжения в элементах) и по жесткости (на узловые перемещения). Приняты следующие физические характеристики: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; расчетное сопротивление  $R_y = 230$  МПа.

Приведем математическую постановку задачи. Функция цели представляет объем конструкции

$$f(x) = \sum_{i=1}^{11} A_i \cdot L_i. \quad (8)$$

Здесь  $A_i, L_i$  — площадь и длина  $i$ -го элемента фермы.

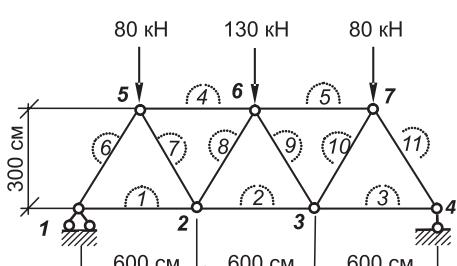


Рис. 1. Расчетная схема фермы

Ограничения представлены в следующем виде:

- Проверка на прочность в  $i$ -м элементе фермы:

$$g_i = \frac{N_i}{R_y \cdot A_i} - 1 \leq 0, \quad (9)$$

где  $N_i$  — значение продольной силы.

- Ограничение на перемещение узла 2:

$$g_j = \frac{\Delta_2}{\Delta_{\max}} - 1 \leq 0. \quad (10)$$

Здесь максимально допустимое значение перемещения  $\Delta_{\max} = 1,2$  см.

Рассмотрим три варианта решения задачи в ПК ANSYS. В качестве метода оптимизации использован метод первого порядка.

В варианте 1 задача решалась с ограничениями (9), (10). Сечения элементов фермы были приняты в виде кольца, где варьировался внешний диаметр  $de$  (от 5 до 50 см). Толщина кольцевого сечения принималась как часть диаметра:  $t = de/24$ . Объем фермы до оптимизации составлял 84133 см<sup>3</sup> при начальном значении  $de_0 = 11$  см.

Результаты расчета приведены в табл. 1 и на рис. 2. Оптимальное значение целевой функции (объем фермы) 11136,21 см<sup>3</sup> было получено на 30-й итерации. Активные ограничения в ПК ANSYS при точности в невязках ограничений до  $10^{-4}$  ( $g_8 = -1,14 \cdot 10^{-2}$  — ограничение на напряжение в стержне 8;  $g_{12} = -1,67 \cdot 10^{-4}$  — ограничение на перемещение узла 2).

Таблица 1. Оптимальные значения  $de_{opt}$  (см) в варианте 1

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$de_{opt}$ (см)	12,912	15,862	10,229	15,965	13,424	14,588
№ элемента	7	8	9	10	11	
$de_{opt}$ (см)	11,942	5,6785	10,004	10,021	12,259	

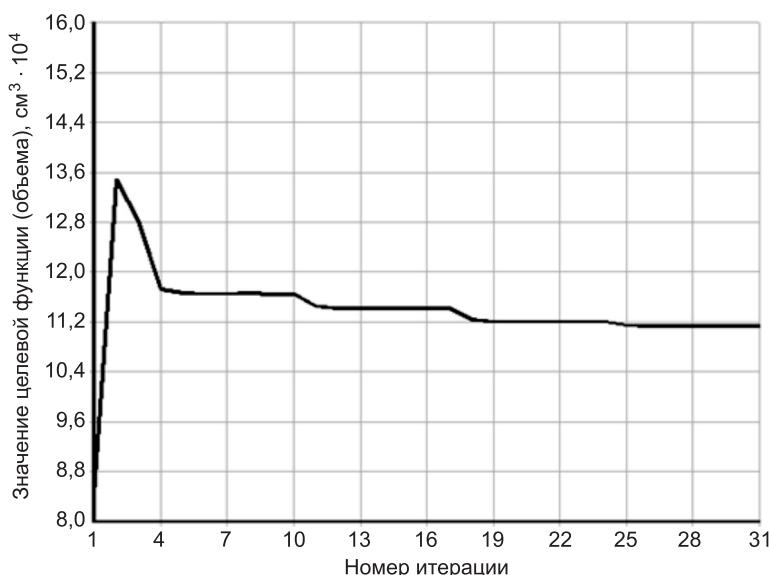


Рис. 2. Изменение целевой функции (объем) на итерациях (вариант 1)

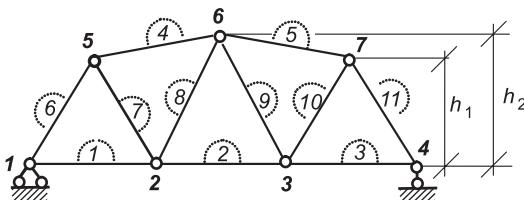


Рис. 3. Ферма с полигональным верхним поясом

В результате расчета оптимальный объем фермы ( $68126,12 \text{ см}^3$ ) был получен на 9-й итерации при высоте  $h_1 = 3,5737 \text{ м}$ . Высота  $h_2$  вышла на максимальный предел — 6 м. Получено максимальное значение в невязках ограничений  $g_{12} = -1,752 \cdot 10^{-3}$  (рис. 4, табл. 2, 3).

В варианте 2 принято изменение очертания верхнего пояса путем варьирования вертикальными координатами узлов **5–7**. С учетом симметрии это означало варьирование высотами  $h_1$  и  $h_2$  (от 100 до 600 см). Заданы ограничения на напряжения (9) и на перемещение (10) (рис. 3).

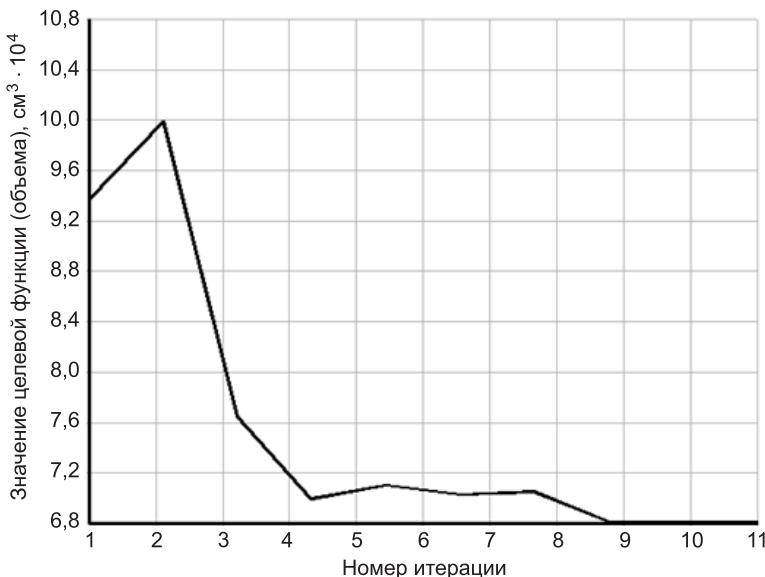


Рис. 4. Изменение целевой функции (объем) на итерациях (вариант 2)

Варианте 3 сечения элементов приняты в виде равностороннего короба. Варьировались внешняя высота (ширина) короба на интервале от 5 до 50 см, а также высоты фермы  $h_1$  и  $h_2$  (от 100 до 600 см). Толщина стенки короба принималась как часть его высоты  $t = b/24$ . Учтены ограничения (9) и (10). Оптимальный объем фермы ( $74247,17 \text{ см}^3$ ) был получен на 6-й итерации. Значения высот в оптимальном проекте:  $h_1 = 3,408 \text{ м}$ ,  $h_2 = 6 \text{ м}$  (табл. 4).

## **Сравнение с результатами оптимизации, выполненными в ПК РОСК**

Все перечисленные выше варианты задачи оптимизации плоских ферм решены ранее с использованием программного комплекса расчета и оптимизации стальных конструкций РОСК<sup>1,2</sup>. При варьировании нескольки-

<sup>1</sup> Дмитриева Т.Л. Алгоритм автоматизированного проектирования ферм минимального веса // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 3. С. 98–105.

<sup>2</sup> Дмитриева Т.Л. Программный комплекс расчета и оптимизации строительных конструкций «РОСК» // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 1(1). С. 31–38.

*Сравнительная оценка результатов оптимального проектирования ферм...*

Таблица 2. Значения внешнего диаметра  $de_{opt}$  (см) в варианте 2

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$de_{opt}$ (см)	10,839	9,5033	8,5720	11,593	9,4675	12,414
№ элемента	7	8	9	10	11	
$de_{opt}$ (см)	7,8338	5,9376	6,2088	7,8123	10,460	

Таблица 3. Значения высоты  $h_1$  (см) на итерациях в варианте 2

Номер итерации	1	2	3	5	9	11
$h_1$ (м)	3,0000	3,0925	3,3850	3,5043	<b>3,5737</b>	3,5741

Таблица 4. Значения внешнего диаметра  $de_{opt}$  (см) в варианте 3

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$de_{opt}$ (см)	9,9481	8,6352	7,9630	10,681	8,6635	11,200
№ элемента	7	8	9	10	11	
$de_{opt}$ (см)	7,6432	5,9438	5,9274	7,6493	9,5904	

кими параметрами сечения (например, внешним диаметром и толщиной кольца либо короба) можно получить ферму меньшего объема, но при этом будет существовать бесконечное множество оптимальных решений, образующих плато целевой функции<sup>1</sup>.

Помимо ограничений на напряжение (9) и на перемещение узла 2 (10) в алгоритм программы включены проверки на устойчивость для сжатых элементов фермы

$$g_i = \frac{N_i}{R_y \cdot A_i \cdot \varphi_i} - 1 \leq 0, \quad (11)$$

где коэффициент  $\varphi_i$  определялся соответственно требованиям нормативного документа СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции».

В табл. 5 дается сравнительная оценка результатов, полученных с использованием ПК ANSYS, с решениями, полученными в ПК POCK.

У всех вариантов оптимальный объем фермы, полученный в ПК ANSYS ( $V_1$ ), меньше, чем в ПК POCK ( $V_2$ ) (относительная погрешность  $\varepsilon = \frac{(V_1 - V_2) \cdot 100 \%}{V_2}$ ). Такая разница объясняется тем, что в ПК ANSYS не учтены ограничения по устойчивости для сжатых стержней.

Таблица 5. Сравнение результатов

ПК		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
ANSYS	$V_1$ (см <sup>3</sup> )	11136,21	68126,12	74247,17
	$g_{max}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
	$N_{iter}$	30	9	6
POCK	$V_2$ (см <sup>3</sup> )	134935,67	75698,5	81090,79
	$g_{max}$	$10^{-10}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
	$N_{iter}$	5	5	5
	$\varepsilon, \%$	<b>9,1747</b>	<b>10,003</b>	<b>8,439</b>

К достоинствам всех приведенных решений в ПК ANSYS следует отнести то, что решение, близкое к оптимальному, получено уже на первых 10 итерациях. При расчете в ПК РОСК общее число итераций ( $N_{iter}$ ) существенно меньше (до пяти) при точности в невязках ограничений  $g_{max}$  до  $10^{-5}$ . Решение, близкое к оптимальному, здесь было получено уже на 2-й либо 3-й итерациях поискового процесса оптимизации. При этом в задачах, где параметры сечения менялись дискретно (согласно сортаментам), показатели сходимости были несколько ниже (до 10 итераций). Таким образом, алгоритмы, заложенные в ПК РОСК, имеют быструю сходимость к оптимальным решениям в пределах по-грешностей, допустимых в расчетах строительных конструкций (как правило, до 3 %).

**Выводы.** Опыт решения задач оптимального проектирования стержневых систем при помощи программных средств подтверждает, что к недостаткам ПК ANSYS можно отнести отсутствие модуля проверок на основе российских норм в области проектирования (проверки на устойчивость в сжатых элементах и др.). Нет также возможности варьировать сечениями соответственно сортаментам. Это обстоятельство делает актуальным разработку отечественных программных комплексов оптимизации. Разработанный авторами ПК РОСК продемонстрировал результаты оптимизации плоских ферм с сопоставимой (а в ряде случаев более высокой) точностью в невязках ограничений при меньшем числе итераций. С другой стороны, расчеты в ПК ANSYS не ограничиваются поиском оптимальных решений для плоских стержневых систем. Развитый аппарат конечно-элементного анализа этого ПК позволяет оптимизировать пространственные конструкции, содержащие элементы различных типов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердар Карбас. Оптимальное проектирование стальных пространственных каркасов с использованием алгоритма летучих мышей (Bat Inspired Algorithm) [Текст] / Сердар Карбас // 10-й Всемирный конгресс по структурной и многопараметрической оптимизации. 19–24 мая, 2013, Орландо, Флорида, США.
2. Химмельблай, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст] / Д. Химмельблай. — М. : Мир, 1975. — 536 с.
3. Гребенюк, Г.И. Формирование и решение задач оптимизации конструкций и сооружений при их компьютерном моделировании [Текст] / Г.И. Гребенюк // Докл. 18-й Междунар. науч.-практич. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». — Томск : В-Спектр, 2012. — С. 13–16.
4. Дмитриева, Т.Л. Использование многометодной стратегии оптимизации в проектировании строительных конструкций [Текст] / Т.Л. Дмитриева, В.В. Безделев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 2. — С. 90–95.

*ДМИТРИЕВА Татьяна Львовна, д-р техн. наук, проф.  
Иркутский государственный технический университет  
ЛЕ ЧАН МИНЬ ДАТ, асп.  
Иркутский государственный технический университет*

Получено после доработки 29.01.14

**Dmitrieva Tatiana Lvovna**, doctor of technical sciences, professor, Irkutsk State Technical University, Russia

**Le Chan Minh Dat**, post-graduate student, Irkutsk State Technical University, Russia

## **COMPARATIVE EVALUATION OF RESULTS OF OPTIMAL DESIGN TRUSS BY USING SOFTWARE TOOLS**

Formulation of the optimization's problem is considered statically determinate truss in the form of a nonlinear mathematical programming. The solution of this problem used the software package ANSYS. A comparative analysis of the obtained results with the similar calculation in the program complex of calculation and optimization of steel structures ROSC.

**Key words:** optimization, approximation method, ANSYS, optimal design of structures, program complex, nonlinear mathematical programming.

### **REFERENCES**

1. Serdar Carbas. Optimum Design of Steel Space Frames via Bat Inspired Algorithm [Text] / Serdar Carbas // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. May 19–24, 2013, Orlando, Florida, USA.
  2. Himmelblau, David M. Applied Nonlinear Programming [Text] / M. David Himmelblau. — McGraw-Hill, N. Y., 1972.
  3. Grebenyuk, G.I. Formation and the decision of optimization problems of designs and constructions at their computer modelling [Text] / G.I. Grebenyuk // Reports of 18th International scientifically-practical conference «Natural and intellectual resources of Siberia». — Tomsk : V-spectrum, 2012. — P. 13–16.
  4. Dmitrieva, T.L. Using multimethod strategies of optimization in the design of building structures [Text] / T.L. Dmitrieva, V.V. Bezdelev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 2. — P. 90–95.
-

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.179.17:539.422.5

Л.Н. СТЕПАНОВА, В.В. ЧЕРНОВА

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Проанализированы результаты циклических испытаний образцов из стеклопластика («Органит-10Т») и статических испытаний на растяжение и сжатие образцов из углепластика (ВКУ-30КР) с использованием метода акустической эмиссии (АЭ). Выполнена локализация и анализ сигналов АЭ, зарегистрированных в области концентраторов напряжений. Для сигналов, полученных при растяжении образцов из углепластика, установлена зависимость распределения амплитуды сигналов АЭ и энергетического параметра MARSE от длины образца.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, композиционные материалы, стеклопластик, углепластик, локализация, растяжение, сжатие.

**Введение.** В процессе производства строительных конструкций все более востребованными становятся композиционные материалы (КМ), физико-механические свойства которых зависят от многих факторов (типа связующего, марки волокна, вида и структуры наполнителя и т.д.). Разрушению конструкций из КМ предшествует накопление повреждений на уровне структуры (волокна, слоя, включения и т.д.). Для определения дефектов в таких конструкциях и оценки степени расслоения материала в процессе разрушения используются различные методы неразрушающего контроля (НК) [1].

Метод акустической эмиссии (АЭ) обладает рядом преимуществ, которые выявляются уже на начальных этапах разрушения объекта контроля (ОК) из КМ, когда дефекты возникают на микроуровне [2, 3]. В процессе проведения контроля были выбраны основные наиболее информативные параметры зарегистрированных сигналов АЭ, такие как локализация, амплитудное распределение, энергия, доминантная частота и т.д. [1, 2].

Цель работы — исследование процесса разрушения образцов из КМ с использованием метода АЭ.

**Исследование образцов из стеклопластика «Органит-10Т».** Для исследования основных параметров сигналов АЭ испытывались образцы размером 230×500 мм, выполненные из стеклопластика «Органит-10Т» со стрингером толщиной 2,6 мм и высотой 35 мм. В зоне стрингера находилось усиление в виде дополнительного слоя армирующего углеволокна шириной 60 мм. В качестве концентратора напряжений в центре стрингера был выполнен пропил глубиной 10 мм.

Циклическое нагружение образцов осуществлялось электрогидравлической машиной MTS-10. В районе захватов были установлены упроч-

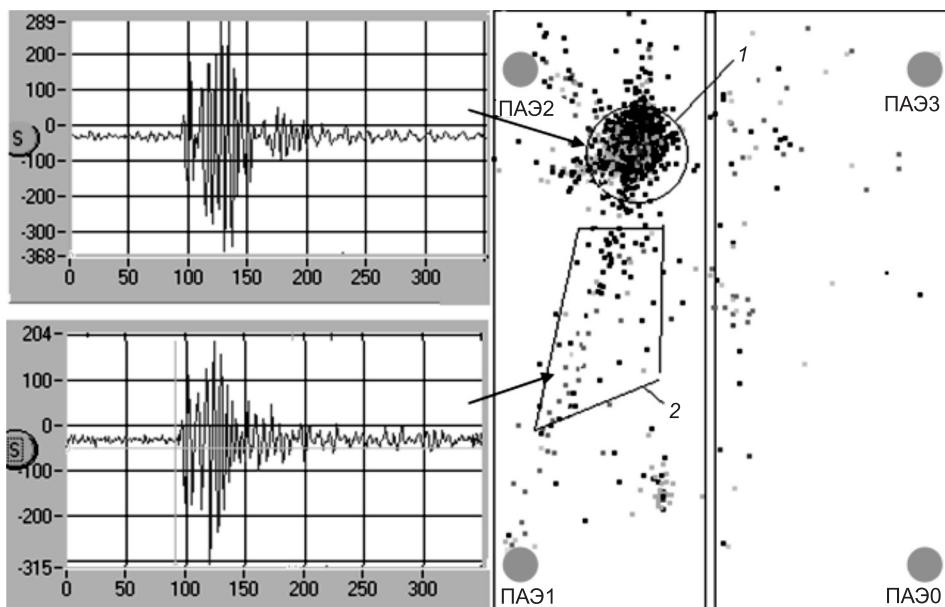


Рис. 1. Локализация и форма сигналов АЭ за  $3 \cdot 10^3$  циклов до разрушения

няющие пластины, которые крепились к образцам болтами. Информация, получаемая в процессе нагружения, регистрировалась диагностической АЭ-системой СЦАД-16.03 (свидетельство RU.C.27.007.А№ 39729, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 18892-10) [3, 4].

Скорость звука в стеклопластике «Органит-10Т» составила 5000 м/с. Циклические испытания образцов выполнялись с частотой 3 Гц. Растигивающее усилие составляло 40 кН на первых  $50 \cdot 10^3$  циклах, после чего нагрузка была увеличена до 50 кН и оставалась постоянной в течение  $160 \cdot 10^3$  циклов.

На рис. 1 приведена локализация сигналов АЭ, зарегистрированных за  $3 \cdot 10^3$  циклов до разрушения, а также показана форма сигналов АЭ в области кластеров 1 и 2. Основная зона разрушения находилась в месте установки преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) 2. Резонансная частота сигналов АЭ составила  $f = 300$  кГц. Сигналы от усталостной трещины характеризовались небольшой длительностью  $\tau = (50 \dots 200)$  мкс, короткими передними фронтами с временем нарастания порядка (25...30) мкс и амплитудой, изменяющейся в пределах (400...800) мВ. Все это позволило по разности времен прихода (РВП) сигналов АЭ на ПАЭ пьезоантенны осуществлять устойчивую локализацию (см. рис. 1) в режиме реального времени [4].

В процессе испытаний образцов из стеклопластика получена устойчивая локализация сигналов АЭ от развивающейся усталостной трещины. При разрушении стрингера наблюдалась слабая активность сигналов, вызванная их быстрым затуханием при переходе через границу раздела стрингера с обшивкой. Разработанный кластерный анализ позволил разделить сигналы по источникам (см. рис. 1). При этом наиболее информативными параметрами являлись время нарастания переднего фронта, резонансная частота и амплитуда сигналов АЭ [2]. Время нарастания переднего фронта сигналов не превышало (20...40) мкс, резонансная частота

находилась в пределах (300...350) кГц, а длительность сигналов АЭ не превышала 200 мкс. Разработанная методика контроля, основанная на анализе основных информативных параметров сигналов АЭ и их локализации, позволяла задолго до появления усталостных трещин в образцах определить зону их разрушения.

**Исследование образцов из углепластика ВКУ-30КР.** Испытания образцов из углепластика (рис. 2) размером 400×110×10 мм проводились на электрогидравлической машине MTS-50. Исследовались четыре образца на растяжение и три — на сжатие. Известно, что при контроле образцов из углепластика возникает проблема локализации источников сигналов АЭ, что связано с его анизотропной структурой. Это приводит к

зависимости скорости звука в материале углепластика от направления прихода акустического сигнала и затрудняет выявление концентраторов напряжений [1]. До сих пор не созданы методики, позволяющие в режиме реального времени осуществлять устойчивую локализацию зон разрушения в ОК из углепластика, а также различать сигналы от развивающихся дефектов от сигналов, вызванных акустическими помехами.

В процессе испытаний образцов на растяжение статическая нагрузка увеличивалась линейно до момента их разрушения. При этом средняя величина разрушающей нагрузки составила 250 кН. При сжатии нагружение прекращалось в момент потери образцом устойчивости.

В процессе регистрации и обработки АЭ-информации использовалась АЭ-система СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство RU.C. 27.007.А № 40707, система зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под номером 45154-10) и четыре ПАЭ типа ПК 02-05. Датчики крепились к исследуемым образцам струбцинами.

На рис. 2 показан образец, его геометрические размеры, схема нагружения и локализация сигналов АЭ. При испытании образцов на растяжение в качестве концентратора напряжений использовался пропил. При решении задачи локализации сигналов АЭ в образцах из углепластика применялся модифицированный пороговый метод [2].

Рис. 2. Геометрические размеры, схема нагружения на разрыв и локализация сигналов АЭ в образце из углепластика

На рис. 2 показан образец, его геометрические размеры, схема нагружения и локализация сигналов АЭ. При испытании образцов на растяжение в качестве концентратора напряжений использовался пропил. При решении задачи локализации сигналов АЭ в образцах из углепластика применялся модифицированный пороговый метод [2].

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Перед нагружением образцов из углепластика осуществлялась их калибровка, в процессе которой определялась скорость распространения ультразвуковой (УЗ)-волны. По длине образца скорость распространения УЗ-сигнала

составила  $C_1 = 6,62$  мм/мкс, поперек образца —  $C_2 = 5,43$  мм/мкс. Для расчета координат локализации сигналов АЭ была выбрана средняя скорость распространения волны  $C = 6,0$  мм/мкс. При данном значении скорости среднее время прохождения волны по образцу от концентратора напряжений до преобразователя не превышало  $\Delta t = 15$  мкс.

В процессе испытаний образцов из углепластика на растяжение сигналы АЭ были локализованы в зоне пропила, где впоследствии они разрушались. Разрушение также происходило в зонах гидравлических захватов нагружающей машины MTS-50. Анализ АЭ информации проводился для сигналов, зарегистрированных из области пропила, где наблюдался их большой разброс. Поскольку при испытаниях использовались образцы из углепластика с небольшой рабочей зоной, то время их распространения сигнала АЭ составляло порядка 10...15 мкс и оказывалось сравнимым с погрешностью локализации АЭ-системы СЦАД-16.10 (порядка 2...4 мкс) [3]. Кроме того, не учитывалось изменение скорости распространения УЗ-сигнала от направления его прихода [1].

Образец выдержал нагрузку  $P = 265$  кН (рис. 3), после чего разрушился. Суммарный счет сигналов АЭ из области пропила в процессе всего нагружения образца показан на рис. 3. Прирост числа сигналов от времени происходил равномерно, а его максимальное значение получено при разрушении образца.

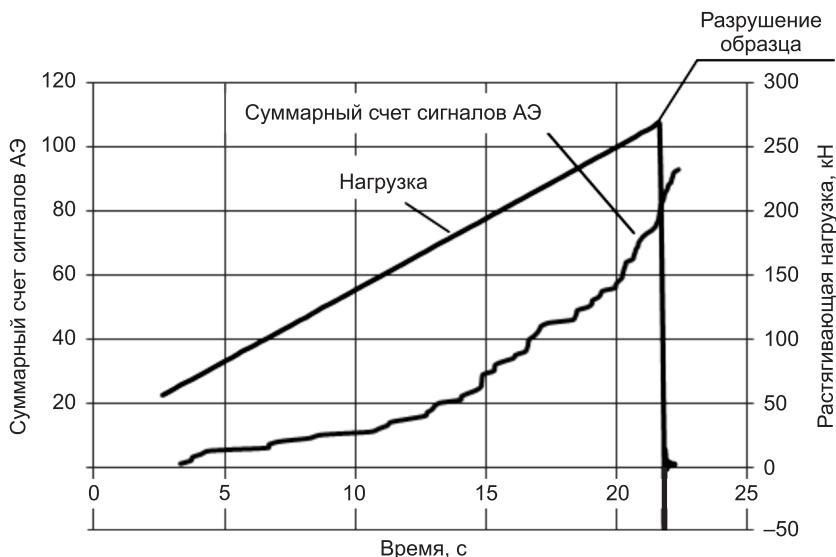


Рис. 3. Зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени в образце из углепластика при испытании на разрыв

Проведен анализ распределения по длине образца энергетического параметра MARSE, представляющего собой площадь под огибающей сигнала АЭ. В зоне пропила образца данный параметр обладал максимальным значением MARSE, определяемым как

$$\text{MARSE} = \int_0^T U(t) \cdot dt,$$

где  $U(t)$  — огибающая акустического сигнала;  
 $T$  — заданный интервал времени.

При этом количество сигналов с максимальным значением MARSE составило около 20 % от всего объема сигналов, локализованных в зоне концентратора напряжений.

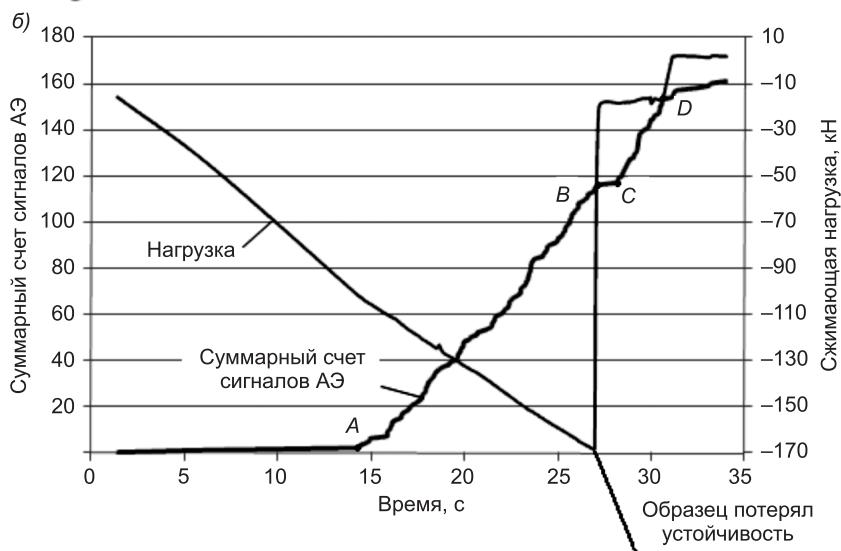
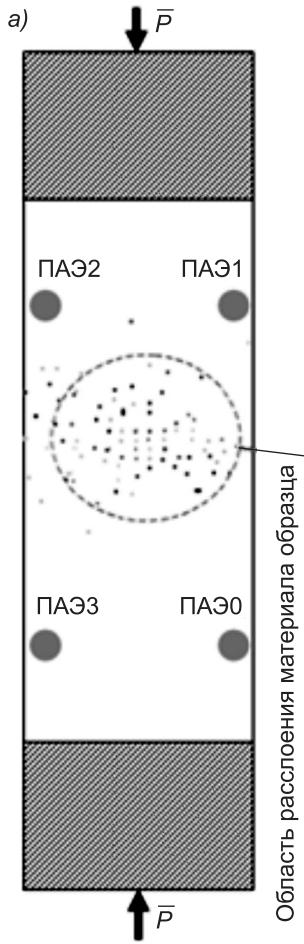


Рис. 4. Схема нагружения образца из углепластика на сжатие (а); график зависимости суммарного счета сигналов АЭ и сжимающей нагрузки от времени (б)

Перед испытаниями образцов на сжатие к их центральным зонам были приложены ударные нагрузки, в результате чего в них происходило расслоение материала. Затем образцы устанавливались в машину MTS-50 и осуществлялось их нагружение на сжатие (рис. 4). Графики зависимости суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени приведены на рис. 4. При нагрузке сжатия  $P = 100$  кН наблюдался прирост числа сигналов АЭ из области расслоения материала образца. В процессе сжатия увеличение суммарного счета сигналов АЭ происходило пропорционально повышению нагрузки (отрезок  $AB$  на рис. 4). В момент потери устойчивости образец разгружали и выдерживали в течение  $\Delta t_1 = 4$  с при нагрузке  $P_1 = 18$  кН. При этом за первый промежуток времени  $\Delta t_1 = 2$  с выдержки нагрузки активность сигналов АЭ была минимальной (отрезок  $BC$  на рис. 4). За время  $\Delta t = (28...30)$  с АЭ-системой СЦАД-16.10 было зарегистрировано 32 сигнала АЭ (отрезок  $CD$  на рис. 4).

Анализ распределения параметра MARSE по длине образца в процессе нагружения сжатием показал, что его максимум расположен в области концентратора напряжений. Распределение амплитуды сигналов АЭ было не ярко выражено и «размыто» по всей длине образца. В области концентратора наблюдался небольшой всплеск амплитудного распределения.

**Выводы.** 1. Сигналы АЭ, регистрируемые при циклических испытаниях образцов из стеклопластика «Органит-10Т», обладали короткими передними фронтами (25...30) мкс, в результате чего получена устойчивая локализация зоны разрушения. Разработанная методика контроля с использованием кластерного анализа позволила группировать шумы и сигналы от паразитных источников и исключать их из дальнейшей обработки.

2. В процессе статических испытаний на растяжение образцов из углепластика ВКУ-30КР установлено, что при их исследованиях сложнее использовать метод АЭ, так как сигналы быстро затухают и их скорость распространения зависит от направления прихода акустической волны. Сигналы АЭ с максимальным значением амплитуды и энергетического параметра MARSE локализовались в области пропила. Однако при этом наблюдался их значительный разброс.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанова, Л.Н. Расчет координат источников сигналов акустической эмиссии в образцах из углепластика [Текст] / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 8. — С. 74–78.
2. Степанова, Л.Н. Оценка погрешности определения времени прихода сигналов акустической эмиссии пороговым методом [Текст] / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. — 2009. — № 4. — С. 69–78.
3. Степанова, Л.Н. Локализация источников акустической эмиссии в объектах с малыми геометрическими размерами [Текст] / Л.Н. Степанова, Е.С. Тенилов // Дефектоскопия. — 2012. — № 11. — С. 62–72.
4. Серезнов, А.Н. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций [Текст] / А.Н. Серезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев и др. — Новосибирск : Наука, 2011. — 272 с.

*СТЕПАНОВА Людмила Николаевна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: aergroup@ngs.ru*

*СибНИА им. С.А. Чаплыгина, г. Новосибирск*

*ЧЕРНОВА Валентина Викторовна, асп.; E-mail: chernova.vv@yandex.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено после доработки 15.01.14

**Stepanova Lydmila Nikolaevna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: aergroup@ngs.ru, Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

**Chernova Valentina Victorovna**, post-graduate student; E-mail: chernova.vv@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

#### RESEARCH OF DESTRUCTION PROCESS OF SAMPLE FROM COMPOSITES BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

The results of cyclical tests of sample from fibreglass («Organit-10T») and the statistical tests of stretching and compression of sample from carbon fiber reinforced plastic (ВКУ-30КР) were analyzed using acoustic-emission (AE) technique. Acoustic emission (AE) signals, which were registered in the concentrator area, were localized and analyzed. Dependence between amplitude distribution and distribution of MARSE and signal location point position on sample was determined for signals, which were registered during stretching tests.

**Key words:** acoustic emission, composite materials, fibreglass, carbon fiber reinforced plastic, localization, stretching, compression.

## REFERENCES

1. Stepanova, L.N. Acoustic emission signal sources coordinates calculation in coal-plastic samples [Text] / L.N. Stepanova, E.Yu. Lebedev, I.S. Ramazanov // Testing. Diagnostics. — 2013. — N 8. — P. 74–78.
2. Stepanova, L.N. Estimation of time-of-arrival errors of acoustic-emission signals by the threshold method [Text] / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, K.V. Kanifadin // Defectoscopia. — 2009. — N 4. — P. 69–78.
3. Stepanova, L.N. Localization of acoustic-emission in objects with small geometric dimensions [Text] / L.N. Stepanova, E.S. Tenitilov // Defectoscopia. — 2012. — N 11. — P. 62–72.
4. Seryeznov, A.N. Railway Structure Monitoring Using Acoustic Emission Technique [Text] / A.N. Seryeznov, L.N. Stepanova, V.V. Ivliev et al. — Novosibirsk : Nayka, 2011. — 272 p.

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
  - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотация на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстраций, в том числе фотографий, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2014 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 — 2400 р.

Цена отдельного номера — 400 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**  
**№ 3 (663) 2014**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*