

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

№ 5 (689)  
Май 2016 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.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, 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)  
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. Правдинец, 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 E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.05.16. Формат 70×108 1/16  
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1444

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Дукарт А.В. К определению стационарных режимов колебаний линейной консервативной системы с двумя степенями свободы

Часть 2. Антисимметрическое периодическое воздействие ..... 5

Погудалина С.В., Федорова Н.Н., Вальгер С.А. Сопряженный расчет взаимодействия воздушного потока с упругим стержнем квадратного сечения, закрепленного на подложке ..... 11

Миренков В.Е., Шугов В.А., Полуэктов В.А. Деформирование и разрушение тел при больших нагрузках в окрестности ослаблений ..... 21

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Анализ влияния суперпластификатора на фазовый состав и параметры структурной механики разрушения цементного камня разного возраста ..... 29

Косач А.Ф., Кузнецова И.Н., Гутарева Н.А.,

<b>Березкина Ю.В.</b> Основные свойства цементного камня из высокодисперсного торфоминерального сырья .....	39
<b>Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С.</b> Использование отходов топливно-энергетического комплекса в качестве выгорающих компонентов для снижения теплопроводности теплоизоляционных материалов .....	46
<b>Логанина В.И., Фролов М.В.</b> Эффективность применения теплоизоляционной штукатурки с применением микросфер для отделки газобетонной ограждающей конструкции .....	55
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Варсегова Е.В.</b> К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. С о б щ е н и е 2.....	63
<b>Самарин О.Д.</b> Учет изменения свойств теплотехнических неоднородностей при определении толщины утеплителя .....	71
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Абраменков Э.А.</b> Классификационные признаки-элементы пневматических ударных механизмов со стержневым воздухораспределением .....	76
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Мжельский В.М.</b> К истории перепланировки общественных центров малых исторических городов России в конце XVIII – первой половине XIX в. ....	90
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П.</b> Об отдельных положениях «Актуализированной редакции СНиП 2.06.07–87» .....	99
<b>Данилов М.Н., Адищев В.В.</b> Конечно-элементный анализ поведения трехслойных панелей при статических и динамических воздействиях .....	106
<b>Кошелева О.Э., Паули И.А., Логвиненко В.А.</b> Кинетика термодеструкции древесины сосны с антиприренами .....	119

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

No. 5 (689)  
May 2016

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

*Editorial Board:*

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivets, 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 STRUCTURES

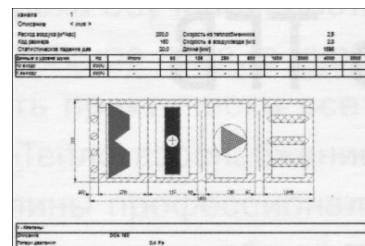
- Dukart A.V. Determination of stationary vibrations of a linear conservative system with two degrees of freedom ..... 5  
Part 2. Antisymmetric periodic disturbance ..... 5
- Pogudalina S.V., Fedorova N.N., Valger S.A. Coupled calculation of airflow interaction with elastic rod of square cross section fixed rigidly to a substrate .. 11
- Mirenkov V.E., Shutov V.A., Poluektov V.A. Deformation and fracture of bodies under large loads near the weakenings ..... 21

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Yu.V. Analysis of superplasticizers phase composition and parameters of structural fracture mechanics of cement stone of different age ..... 29
- Kosach A.F., Kuznetsova I.N., Gutareva N.A., Berezkina Yu.V. The main properties cement stone from highly disperse peat-mineral raw materials ..... 39

<b>Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S.</b> Innovative trends on the use of waste fuel and energy complex in the manufacture of insulating materials .....	46
<b>Loganina V.I., Frolov M.V.</b> Effectiveness of thermal insulation plaster with the use of microspheres for finishing aerated concrete walling .....	55
<b>SANITARY ENGINEERING</b>	
<b>Posokhin V.N., Ziganshin A.M., Varsegova E.V.</b> Calculation of minor losses. Report 2.....	63
<b>Samarin O.D.</b> The account of change of properties of the thermal non-uniformities during definition of thermal insulation thickness .....	71
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Malysheva Yu.E., Abramakov D.E., Dedov A.S., Abramakov E.A.</b> Classification features elements pneumatic hammer mechanism with a rod of air distribution .....	76
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Mzhel'skiy V.M.</b> The history of replanning of public centers of small historical cities in Russia in the end of XVIII – 1 <sup>st</sup> half of XIX century .....	90
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Atavin A.A., Degtyarev V.V., Yanenko A.D.</b> About separate provisions «The updated edition Construction Norms and Regulations 2.06.07–87» .....	99
<b>Danilov M.N., Adishchev V.V.</b> Application of ansys software for solving problems of dynamics of multilayer shells .....	106
<b>Kosheleva O.E., Pauli I.A., Logvinenko V.A.</b> Kinetics of the thermal destruction of the wood of pine tree with the fireproofing compounds .....	119

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.042:534.14

А.В. ДУКАРТ

# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНОЙ КОНСЕРВАТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

## Часть 2. АНТИСИММЕТРИЧЕСКОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В замкнутой форме получено точное решение задачи определения стационарных колебаний двухмассовой системы без демпфирования при периодическом воздействии, изменяющем знак через полупериод. В качестве примера найдены уравнения движения системы при возмущающем воздействии типа «прямоугольный синус».

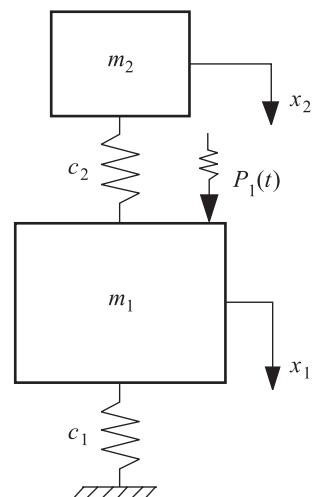
**Ключевые слова:** консервативная система, степень свободы, антисимметрическое периодическое воздействие, стационарные (установившиеся) колебания, периодическое решение.

В настоящей работе в постановке, принятой в первой части статьи [1], рассматривается задача построения решения, отвечающего стационарным колебаниям двухмассовой недемпфированной системы с последовательным соединением звеньев (рис. 1) при антисимметрическом периодическом воздействии. Под ним понимается возмущающая нагрузка  $P_1(t)$  периода  $T$ , изменяющая свой знак через полупериод, т.е. удовлетворяющая условию

$$P_1(t+0.5T) = -P_1(t). \quad (1)$$

Примерами таких нагрузок служат [2–4], прежде всего, гармоническая синусоидальная сила; возмущающая сила, заданная законом «прямоугольного синуса»; ударные нагрузки в виде действующих через полупериод одинаковых по форме и величине кратковременных (в частном случае – мгновенных) импульсов противоположного направления и др.

Установившееся движение масс системы, вызываемое антисимметрическим периодическим



*Рис. 1.* Консервативная система с двумя степенями свободы с последовательным соединением звеньев

воздействием (1), имеет, как и само воздействие, период  $T$  и меняет свое направление через каждый полупериод. Будем считать, что внешнее воздействие приложено к массе  $m_1$  системы (см. рис. 1). Для определения указанного режима колебаний воспользуемся полученными в первой части статьи [1] уравнениями движения рассматриваемой системы при непериодическом воздействии  $P_1(t)$  произвольной формы

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sum_{v=1}^2 (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t) + P_1(0)R_1(t) + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) R_1(t-\tau) d\tau; \\ x_2(t) &= \sum_{v=1}^2 \beta_v (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t) + P_1(0)R_2(t) + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) R_2(t-\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_j(t)$  – абсолютная координата  $j$ -й массы системы,  $j = 1, 2$ ;  
 $\omega_v$  – частоты собственных колебаний рассматриваемой системы как системы с двумя степенями свободы,  $v = 1, 2$ ;  
 $\alpha_{2v-1}$ ,  $\alpha_{2v}$  – произвольные постоянные, определяемые начальными условиями или условиями периодичности движения масс системы,  $v = 1, 2$ ;  
 $P_1(0)$  – нагрузка, соответствующая начальному моменту времени ( $t = 0$ );  
 $\dot{P}_1(t)$  – скорость изменения нагрузки;  
 $R_j(t-\tau)$  – функции, выражающие реакцию системы на действие единичной ступенчатой силы ( $P_1 = 1$ ), приложенной к массе  $m_1$  покоящейся системы в момент времени  $t = \tau$

$$\begin{aligned} R_1(t-\tau) &= \frac{1}{c_1} \left[ \frac{(1-\beta_2)}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_1(t-\tau) + \frac{(\beta_1-1)}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_2(t-\tau) + 1 \right]; \\ R_2(t-\tau) &= \frac{1}{c_1} \left[ \frac{(1-\beta_2)\beta_1}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_1(t-\tau) + \frac{(\beta_1-1)\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_2(t-\tau) + 1 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

а функции  $R_j(t)$  соответствуют (3) при  $\tau = 0$ ,  $j = 1, 2$ ;  
 $\beta_v = c_2 / (c_2 - m_2 \omega_v^2)$  – коэффициенты распределения амплитуд собственных колебаний системы,  $v = 1, 2$ ;

$c_j$  – квазиупругий коэффициент  $j$ -го звена системы,  $j = 1, 2$ .

Отметим, что приведенные функции (2) справедливы при любых начальных и периодических условиях движения системы. Переходя к определению стационарных колебаний системы, вызываемых воздействием (1), учтем, что функции отклонений масс, как и возмущающая нагрузка, меняют знак через полупериод:

$$x_j(t + 0,5T) = -x_j(t), \quad (4)$$

т.е. в данном случае достаточно разыскать решение для интервала времени  $0 \leq t \leq 0,5T$ ;  $j = 1, 2$ .

В соответствии с условием (4) при антисимметрическом воздействии (1) установившееся движение масс  $m_j$  должно удовлетворять условиям

$$x_j(0) = -x_j(0,5T); \quad \dot{x}_j(0) = -\dot{x}_j(0,5T), \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

Подчиняя решение (2) условиям (5), с учетом (3) получим относительно постоянных  $\alpha_{2v-1}$ ,  $\alpha_{2v}$  систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}(1 + \cos 0,5\omega_v T) - \alpha_{2v} \sin 0,5\omega_v T] &= -a_1; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}\beta_v(1 + \cos 0,5\omega_v T) - \alpha_{2v}\beta_v \sin 0,5\omega_v T] &= -a_2; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}\omega_v \sin 0,5\omega_v T + \alpha_{2v}\omega_v(1 + \cos 0,5\omega_v T)] &= -a_3; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}\beta_v \omega_v \sin 0,5\omega_v T + \alpha_{2v}\beta_v \omega_v(1 + \cos 0,5\omega_v T)] &= -a_4, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{c_1} \left\langle P_1(0,5T) + \sum_{v=1}^2 \{d_v[P_1(0) + U_v] \cos 0,5\omega_v T + V_v \sin 0,5\omega_v T\} \right\rangle; \\ a_2 &= \frac{1}{c_1} \left\langle P_1(0,5T) + \sum_{v=1}^2 d_v \beta_v \{[P_1(0) + U_v] \cos 0,5\omega_v T + V_v \sin 0,5\omega_v T\} \right\rangle; \\ a_3 &= \frac{1}{c_1} \sum_{v=1}^2 \left\langle d_v \omega_v \{[P_1(0) + U_v] \sin 0,5\omega_v T - V_v \cos 0,5\omega_v T\} - [\dot{P}_1(0) + \dot{P}_1(0,5T)] \right\rangle; \\ a_4 &= \frac{1}{c_1} \sum_{v=1}^2 \left\langle d_v \beta_v \omega_v \{[P_1(0) + U_v] \sin 0,5\omega_v T - V_v \cos 0,5\omega_v T\} - [\dot{P}_1(0) + \dot{P}_1(0,5T)] \right\rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

В (6) и (7) введены обозначения

$$d_1 = (1 - \beta_2)/(\beta_2 - \beta_1); \quad d_2 = (\beta_1 - 1)/(\beta_2 - \beta_1);$$

$$U_v = \int_0^{0,5T} \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v \tau d\tau; \quad V_v = \int_0^{0,5T} \dot{P}_1(\tau) \sin \omega_v \tau d\tau; \quad v = 1, 2$$

и учтено, что

$$\int_0^t \dot{P}_1(\tau) d\tau = P_1(t) - P_1(0),$$

в том числе при  $t = 0,5T$ .

Для определения корней системы уравнений (6) воспользуемся правилом Крамера [5], которое позволяет найти ее решение в замкнутой форме; оно имеет вид:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_2 - a_1\beta_2) - \frac{1}{\omega_1}(a_4 - a_3\beta_2) \operatorname{tg} 0,25\omega_1 T]; \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_1\beta_2 - a_2) \operatorname{tg} 0,25\omega_1 T + \frac{1}{\omega_1}(a_3\beta_2 - a_4)]; \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_1\beta_1 - a_2) - \frac{1}{\omega_2}(a_3\beta_1 - a_4) \operatorname{tg} 0,25\omega_2 T]; \\ \alpha_4 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_2 - a_1\beta_1) \operatorname{tg} 0,25\omega_2 T + \frac{1}{\omega_2}(a_4 - a_3\beta_1)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для упрощения записи уравнений движения системы дополнительно обозначим

$$b_1 = \beta_2 - 1; \quad b_2 = 1 - \beta_1. \quad (9)$$

Подставляя далее (8) в исходные уравнения (2), с учетом обозначений (7) и (9) найдем периодическое решение, соответствующее антисимметрическому воздействию (1):

$$\begin{aligned} x_1(t) = & \frac{1}{c_1} P_1(t) + \frac{1}{2c_1(b_1+b_2)} \sum_{v=1}^2 \left\langle \frac{b_v}{\cos 0,25\omega_v T} \{ [P_1(0)+U_v] \cos \omega_v (t+0,25T) + \right. \\ & + V_v \sin \omega_v (t+0,25T) - P_1(0,5T) \cos \omega_v (t-0,25T) - \frac{1}{\omega_v} [\dot{P}_1(0)+\dot{P}_1(0,5T)] \times \\ & \times \sin \omega_v (t-0,25T) \} - 2b_v [P_1(0) \cos \omega_v t + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v (t-\tau) d\tau] \Big\rangle; \\ x_2(t) = & \frac{1}{c_1} P_1(t) + \frac{1}{2c_1(b_1+b_2)} \sum_{v=1}^2 \left\langle \frac{b_v \beta_v}{\sin 0,25\omega_v T} \{ [P_1(0)+U_v] \cos \omega_v (t+0,25T) + \right. \\ & + V_v \sin \omega_v (t+0,25T) - P_1(0,5T) \cos \omega_v (t-0,25T) - \frac{1}{\omega_v} [\dot{P}_1(0)+\dot{P}_1(0,5T)] \times \\ & \times \sin \omega_v (t-0,25T) \} - 2b_v \beta_v [P_1(0) \cos \omega_v t + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v (t-\tau) d\tau] \Big\rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (10) определяют искомое периодическое движение системы в интервале времени  $0 \leq t \leq 0,5T$ ; в полупериоде  $[0,5T; T]$  необходимо в (10) сменить знак на обратный согласно условию (4). Имея законы движения масс системы в интервале  $0 \leq t \leq T$ , вследствие периодичности они могут быть перенесены без изменения в соседние интервалы времени. Аналогично могут быть найдены законы установившихся колебаний системы при возмущающем воздействии (1), приложенным к массе  $m_2$  или к обеим массам одновременно.

Найдем установившиеся колебания консервативной системы с двумя степенями свободы при периодическом воздействии типа «прямоугольный синус» (рис. 2), приложенным к массе  $m_1$ . Такое воздействие в промежутке времени  $[0, T]$  определяется выражением

$$P_1(t) = \begin{cases} P_0 & \text{при } 0^+ \leq t \leq 0,5T^-; \\ -P_0 & \text{при } 0,5T^+ \leq t \leq T^-. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь знаками « $-$ » и « $+$ » обозначены моменты времени непосредственно до и после скачкообразного изменения силы при  $t = \pm 0,5nT$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ .

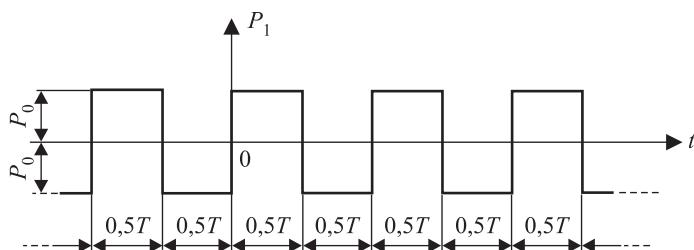


Рис. 2. Воздействие типа «прямоугольный синус»

Так как воздействие (11) является антисимметрическим, то достаточно найти уравнения движения системы в полупериоде  $[0; 0,5T]$ , используя решение (10). Для рассматриваемого воздействия (11) имеем:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P_1(0) = P_1(0,5T) = P_0; \quad \dot{P}_1(t) = \dot{P}_1(0) = \dot{P}_1(0,5T) = 0; \\ U_v &= 0; \quad V_v = 0; \quad \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v \tau d\tau = 0; \quad \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \sin \omega_v \tau d\tau = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Внесем (12) в уравнения (10); в результате несложных упрощений найдем искомое периодическое решение в замкнутой форме

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \frac{P_0}{c_1} \left[ 1 - \frac{1}{(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 b_v (\operatorname{tg} 0,25 \omega_v T \sin \omega_v t + \cos \omega_v t) \right]; \\ x_2(t) &= \frac{P_0}{c_1} \left[ 1 - \frac{1}{(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 b_v \beta_v (\operatorname{tg} 0,25 \omega_v T \sin \omega_v t + \cos \omega_v t) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для проверки уравнений движения (13) можно воспользоваться решением, полученным в [6].

Из примеров, приведенных здесь и в первой части статьи [1], следует, что, как и для одномассовой системы [7], полученные в настоящей работе уравнения стационарных колебаний двухмассовой системы без демпфирования позволяют просто и быстро найти в замкнутой форме решение многих задач теории колебаний, в том числе при периодических воздействиях, имеющих достаточно сложный характер изменения во времени. Эти решения могут быть использованы в различных технических приложениях, в частности, для изучения принципов работы динамических и ударных гасителей колебаний, каскадной виброзоляции, поглотителей колебаний и др.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Дукарт А.В. К определению стационарных режимов колебаний линейной консервативной системы с двумя степенями свободы. Часть 1. Периодическое воздействие произвольного вида // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 13–21.
- Динамический расчет зданий и сооружений: справ. проектировщика / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
- Лурье А.И. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики. М.: ГИТТЛ, 1950. 432 с.
- Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 196 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
- Дукарт А.В. Об установившихся колебаниях двухмассовой системы с демпфированием при произвольной периодической возмущающей нагрузке // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 3–4. С. 3–13.
- Дукарт А.В. Стационарные режимы колебаний линейной неконсервативной системы при периодических воздействиях произвольного вида // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 9. С. 5–11.

**Дукарт Адам Вилебальдович**, д-р техн. наук, проф.  
Московский государственный строительный университет

Получено 18.04.16

**Dukart Adam Vilebal'dovich**, DSc, Professor  
Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **DETERMINATION OF STATIONARY VIBRATIONS OF A LINEAR CONSERVATIVE SYSTEM WITH TWO DEGREES OF FREEDOM**

### **Part 2. ANTISYMMETRIC PERIODIC DISTURBANCE**

The closed-form solution for stationary vibration of undamped two-mass system subject to periodic disturbance which changes its sign in each half period was received. As an example, the equations of vibration under an excitation in the form of “rectangular-sine” were found.

**K e y w o r d s:** conservative system, degree of freedom, antisymmetric periodic disturbance, stationary (steady state) vibration, periodic solution.

### **REFERENCES**

1. D u k a r t A.V. K opredeleniyu statsionarnykh rezhimov kolebaniy lineynoy konservativnoy sistemy s dvumya stepenyami svobody. C h a s t' 1. Periodicheskoe vozdeystvie proizvol'nogo vida [Determination of stationary vibrations of a linear conservative system with two degree of freedom. Part 1. General periodic disturbance]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 13–21. (in Russia)
2. Dinamicheskiy raschet zdaniy i sooruzheniy: sprav. proektirovshchika; pod red. B.G. Koreneva, I.M. Rabinovicha [Dynamic analysis of buildings and structures: designer's handbook; ed. by B.G. Korenev, I.M. Rabinovich]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 303 p. (in Russia)
3. Lurie A.I. Operatsionnoe ischislenie i ego prilozheniya k zadacham mehaniki [Operational calculus and its applications to problems of mechanics]. Moscow, GITTL, 1950. 432 p. (in Russia)
4. P a n o v k o Ya.G. Vnuttrennee trenie pri kolebaniyakh uprugikh sistem [Internal friction at the oscillations of elastic system]. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 196 p. (in Russia)
5. K o r n G., K o r n T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematics handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka, 1973. 832 p. (in Russia)
6. D u k a r t A.V. Ob ustannovivshikhsya kolebaniyakh dvukhmassovoy sistemy s dempfirovaniem pri proizvol'noy periodicheskoy vozmushchayushchey nagruzke [On periodic oscillations of a two-mass damped system with an arbitrary exciting force]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2009. No. 3–4. Pp. 3–13. (in Russia)
7. D u k a r t A.V. Statsionarnye rezhimy kolebaniy lineynoy nekonservativnoy sistemy pri periodicheskikh vozdeystviyah proizvol'nogo vida [Stationary vibrations of a linear nonconservative system with arbitrary periodic excitation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 9. Pp. 5–11. (in Russia)

УДК 534.121.1 : 539.371

С.В. ПОГУДАЛИНА, Н.Н. ФЕДОРОВА, С.А. ВАЛЬГЕР

## СОПРЯЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА С УПРУГИМ СТЕРЖНЕМ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ, ЗАКРЕПЛЕННОГО НА ПОДЛОЖКЕ\*

Исследования ветровых воздействий на строительные конструкции необходимо проводить для предотвращения нежелательных колебаний, приводящих к повреждениям или разрушениям зданий и сооружений. Представлены результаты численного моделирования колебаний упругого стержня квадратного сечения, установленного по нормали к внешнему потоку и жестко закрепленного на подложке. Моделирование выполнено в расчетном комплексе ANSYS с использованием технологии двунаправленного сопряжения (2-FSI). Проведены гидродинамический, сопряженный и модальный расчеты. Проанализирована структура и описаны особенности течения воздуха в окрестности модели. Исследован процесс возбуждения колебаний упругой модели под действием внешнего потока и определено ее напряженно-деформированное состояние. Получены собственные частоты и формы колебаний стержня.

Ключевые слова: аэроупругость, ветровые воздействия, сопряженные задачи, взаимодействие потоков со структурами, численное моделирование.

**Введение.** Аэроупругость охватывает область физико-технических процессов и явлений, которые возникают в результате взаимодействия аэrodинамических сил и вызванных ими сил упругих механических реакций системы. Целенаправленные исследования аэроупругости ведутся с начала 20-х годов XX столетия, тогда же появились и первые теоретические результаты [1–5], после чего она сформировалась в отдельную отрасль науки. Аэроупругие явления имеют важное значение для строительных объектов большой протяженности: мостов с большими пролетами, высотных строительных сооружений [2–4].

В авиации учет аэроупругих эффектов – необходимое условие создания оптимальной и надежной конструкции летательных аппаратов, а их неучет приводит к существенному ухудшению управляемости или даже разрушению систем [5].

**Компьютерное моделирование сопряженных задач.** Сопряженные физические процессы, в которых движение воздушной среды оказывает влияние на поведение деформируемых объектов, получили в литературе название «Взаимодействие потоков со структурами<sup>1</sup>» (FSI). При малых изменениях формы объекта говорят об одностороннем воздействии (1-FSI). Если деформация упругого объекта достаточно велика, необходимо учитывать

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-07-06581-а) и Минобрнауки РФ (проект № 211, задание № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания).

<sup>1</sup> Fluid Structure Interaction.

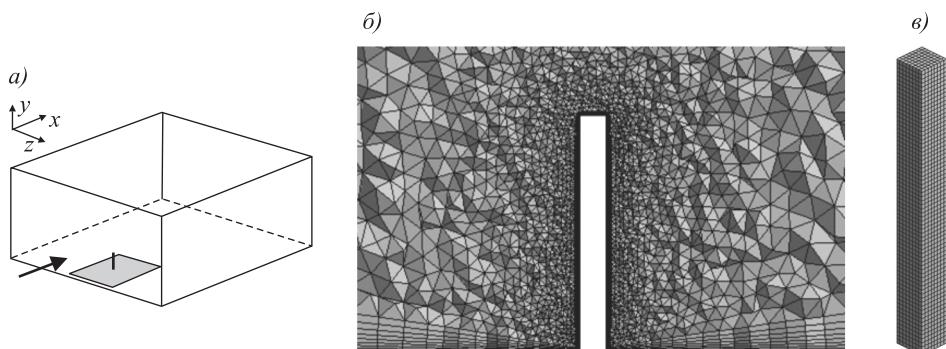
обратное влияние деформированного объекта на внешнее течение (дву направленное сопряжение, 2-FSI).

Современные инженерные вычислительные программные комплексы, такие как ANSYS, NASTRAN, COSMOS, LS-DYNA, ABAQUS и др., позволяют проводить прямое численное моделирование сопряженных физических процессов на основе полных математических моделей. Так, например, в среде ANSYS Workbench разработана технология расчета двунаправленного взаимодействия (2-FSI), которая позволяет достаточно точно моделировать взаимное влияние процессов различной физической природы.

С целью отработки 2-FSI методики расчета аэроупругих задач в среде ANSYS Workbench авторами ранее решена модельная 2D задача, в которой закрепленная на подложке пластина совершила продольные упругие колебания в неподвижной воздушной среде под действием приложенного в начальный момент импульса давления [6]. Методика использована для моделирования колебания пластины под действием периодического внешнего потока [7].

В данной работе решается 3D задача о колебании стержня квадратного сечения под воздействием стационарного набегающего потока воздуха. Проведены гидродинамический и связанный расчеты с использованием 2-FSI технологии. Исследованы режимы затухания колебаний в направлении набегающего потока и возбуждения колебаний стержня в направлении, ортогональном потоку, под действием периодической силы, связанной со сходом вихрей. Получены собственные частоты и формы колебаний стержня при различных геометрических и физических параметрах.

**Физико-математическая постановка задачи.** Исходная геометрия (рис. 1, *a*) представляет собой пространственный канал размером  $3,34 \times 2,83 \times 0,8$  м, внутри которого на подложке  $1,2 \times 0,8$  м на расстоянии 0,6 м от входа жестко закреплен стержень высотой  $h = 0,28$  м квадратного сечения  $0,03 \times 0,03$  м. Стрелкой показано направление набегающего потока.



*Рис. 1. Расчетная область (a), фрагмент исходной расчетной сетки воздушной области (б) и сетка на стержне (в)*

Численное моделирование течения воздуха проводилось в изотермической постановке на основе трехмерных нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Расчеты выполнены для воздуха при нормальных условиях ( $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> и  $\mu = 1,8 \times 10^{-5}$  Н · с/м<sup>2</sup>) при скорости набегающего потока

$V = 5$  м/с. Для расчета воздушного течения использована конечно-объемная схема второго порядка аппроксимации по пространственным и временной переменным, основанная на решении уравнения для давления.

Процессы в твердом теле описываются нестационарными 3D уравнениями теории упругости, уравнениями совместности деформаций и законом Гука. В качестве материала стержня использован модельный изотропный материал со свойствами, близкими к пенопласту, с плотностью  $\rho = 40$  кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости  $E = 12,7 \times 10^6$  Па и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,35$ .

На стенках модели и на подложке принято условие прилипания. На границе упругого стержня и воздуха выполняются условия равенства количества движения. На верхней и боковых границах расчетной области заданы условия симметрии, обеспечивающие отсутствие потока через эти границы.

Для связывания гидродинамического и деформационного расчетов использован итерационный алгоритм сопряжения. На каждом шаге по времени отдельно решаются уравнения гидродинамики и механики деформируемого твердого тела, затем через интерфейс между воздушной средой и пластиной происходит обмен данными. При решении гидродинамической задачи на пластине задается кинематическое граничное условие, обеспечивающее равенство скоростей внешней среды и подвижной стенки. Движение границы определяется перемещениями стержня, передаваемыми из деформационного решателя. Для уравнений теории упругости в качестве граничных условий на стенках стержня задается полученное в гидродинамическом расчете распределение давления.

В воздушной области построена неструктурированная сетка (см. рис. 1, б) с количеством расчетных ячеек  $\sim 1,2$  млн, которая сгущалась по направлению к подложке и к стенкам стержня. На стержне построена структурированная сетка с 4480 призматическими ячейками (см. рис. 1, в). На границе сопряжения внешней воздушной области и упругого тела положения узлов сетки не совпадают, т.е. сетка неконформная. В процессе расчета выполняется геометрическая адаптация расчетной сетки с учетом деформации стержня.

**Результаты.** Расчет проводился в несколько этапов. Сначала в модуле ANSYS Fluent проведен расчет течения воздуха вокруг абсолютно жесткой модели. На рис. 2 показана картина линий тока в окрестности стержня на момент времени  $t = 2,3$  с. Темный цвет соответствует низкой скорости потока, а светлый – более высокой.

Пространственная вихревая структура течения качественно совпадает с той, что наблюдается в окрестности призматического тела меньшей относительной высоты [8]. В центральной фронтальной поверхности стержня существует вертикальная линия растекания, вблизи которой набегающий поток разделяется и срывается с боковых ребер модели, образуя нестационарные отрывные зоны. Кроме того, происходит растекание потока вверх и вниз от точки, показанной линией ( $P$ ) на рис. 2. При разделении основная часть воздуха уходит вверх и срывается с верхнего переднего ребра модели, обтекая отрывную зону ОЗ2 на ее крышке. Оставшаяся часть потока попадает в отрывную зону ОЗ1 перед моделью и уходит по краям в подвет-

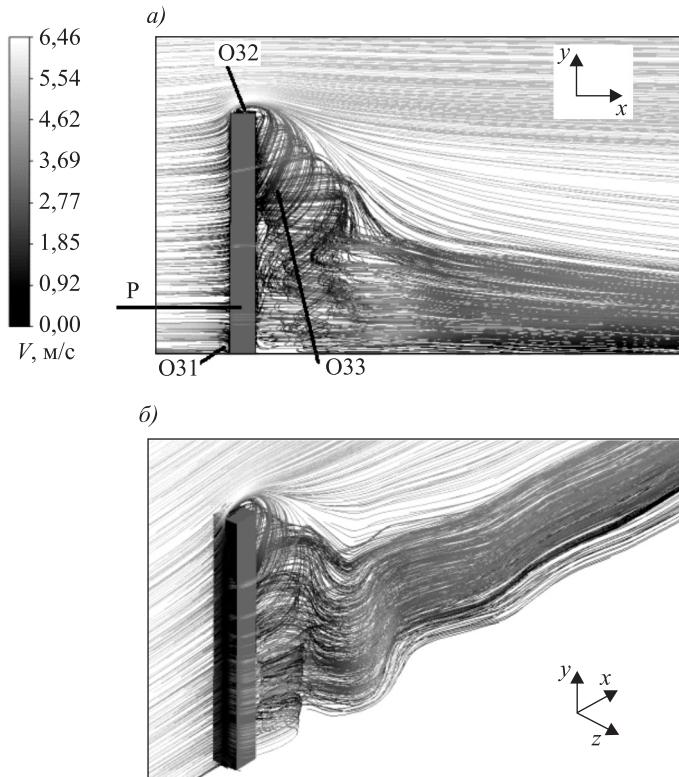


Рис. 2. Линии тока в окрестности пластины на момент времени  $t = 2,3$  с. Вид сбоку (а), в изометрии (б)

ренную область. Внешний поток, обтекая стержень с вихревыми зонами, сначала ускоряется до 6,46 м/с, затем замедляется до 5,1 м/с. Позади стержня формируются вихри, поочередно срывающиеся с задних боковых ребер стержня. Совокупность отрывающихся в шахматном порядке вихрей образует вихревую дорожку Кармана (ОЗ3). В отличие от случая более низкого призматического тела [8] сход вихрей происходит в направлении к подложке, к которой «прижата» вихревая дорожка.

На втором этапе с использованием технологии 2-FSI к гидродинамическому расчету присоединен деформационный расчет в твердом теле. В начальный момент времени на покоящийся стержень натекает воздушный поток. Под действием ветрового давления стержень начинает деформироваться. На каждом шаге по времени сначала определяется напряженно-деформированное состояние тела.

Полученные данные о деформации объекта и скорости его движения передаются в гидродинамический расчет, в котором моделируется течение воздуха в окрестности стержня. Потом передача данных проводится в обратном порядке. Итерации сопряжения повторяются до достижения заданного критерия сходимости.

На рис. 3 представлены поля относительного давления ( $a, \vartheta$ ) в плане при  $y = 0,1$  м и линии тока ( $\beta, \varphi$ ) на моменты времени  $t = 2,3$  и  $2,39$  с, соответствующие противоположным фазам квазипериодического процесса схода вихрей с задних боковых кромок призмы. Вихри можно идентифи-

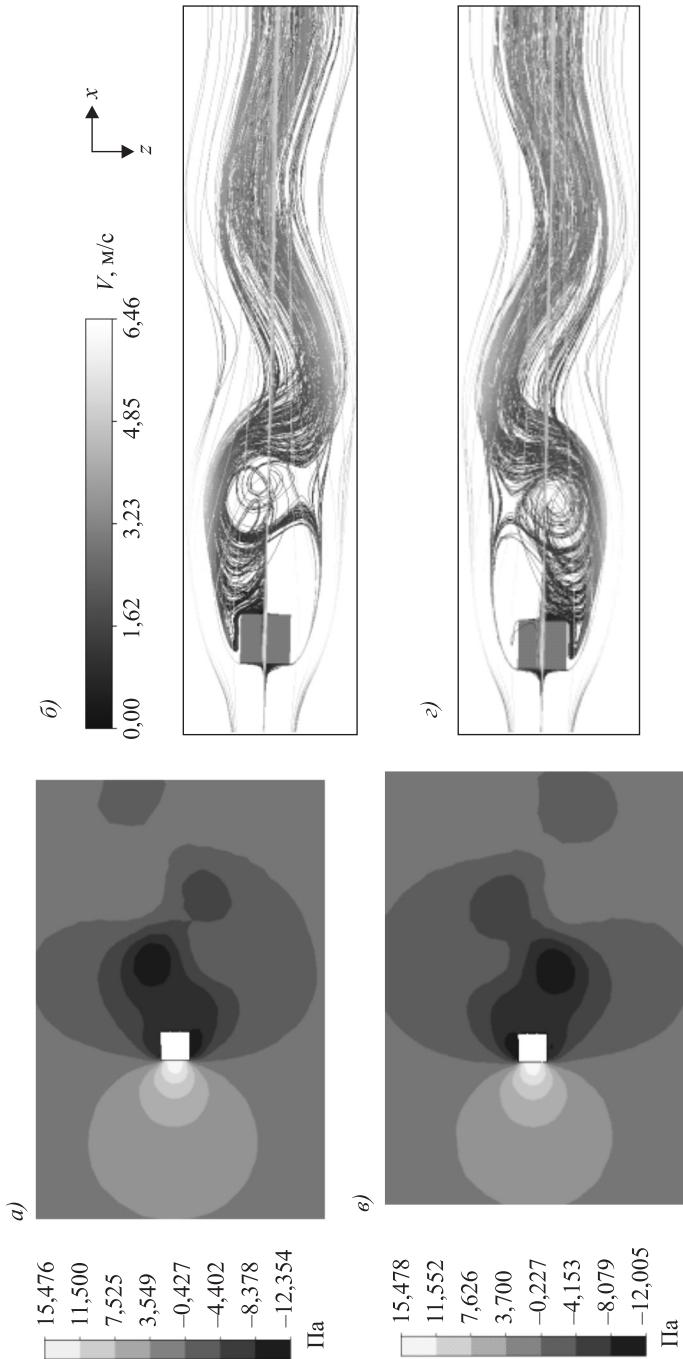
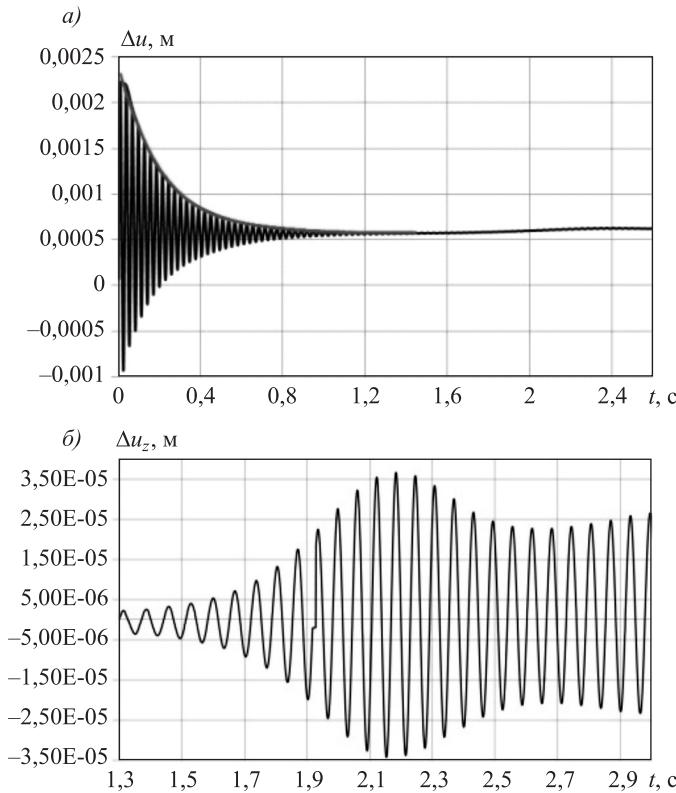


Рис. 3. Поле давления (а, б) и линии тока (с, д) на момент времени: 2,3 с (а, с) и 2,39 с (б, д)

цировать по замкнутым линиям тока и зонам пониженного давления в центрах вихрей.

На рис. 4 представлены графики максимальных перемещений стержня в направлении основного потока  $\Delta u_x$  (а) и поперечном направлении  $\Delta u_z$  (б) в зависимости от времени.

Графики показывают, что при  $t < 1$  с стержень совершает колебания в  $x$  направлении, амплитуда которых быстро затухает (см. рис. 4, а). Максимальное отклонение модели  $\Delta u_{x \max} = 2,2 \cdot 10^{-3}$  м наблюдается при  $t = 0,01$  с,



*Рис. 4. Максимальные продольные (а) и поперечные (б) перемещения стержня в зависимости от времени*

а частота колебаний, как следует из дальнейшего анализа, совпадает с первой собственной частотой конструкции  $f_x = 34,48$  Гц.

В следующий временной период возбуждаются поперечные колебания в  $z$  направлении (см. рис. 4, б), вызванные срывом вихрей в дорожке Кармана, порождающих периодическую возбуждающую силу. Максимальное отклонение стержня составляет  $\Delta u_{z \max} = 3,7 \cdot 10^{-5}$  при  $t = 2,18$  с, а частота колебаний совпадает с частотой схода вихрей 14,09 Гц.

Далее в программе ANSYS Modal Static Structural для стержня квадратного сечения, жестко закрепленного с одного конца, получены собственные

частоты и соответствующие им формы колебаний. В табл. 1 представлено количество ячеек в модальном расчете, а на рис. 5 приведены формы колебаний. Исходное положение стержня показано тонкими сплошными линиями.

Поскольку у стержня квадратное сечение, первая и вторая частоты имеют по две изгибные формы – в направлениях  $x$  и  $z$  (см. рис. 5, а, б). Пятая частота соответствует крутильной (рис. 5, в), а шестая – растягивающей (рис. 5, г) формам колебаний.

Расчет проведен для различных высот стержня и характеристик материала (табл. 2). Модальный расчет позволяет получить высоты стержня и характеристики его материала, при которых может возникнуть резонанс,

**Таблица 1. Количество ячеек для разных высот стержня**

Высота, м	Количество ячеек
0,2	800
0,28	1150
0,4	1625

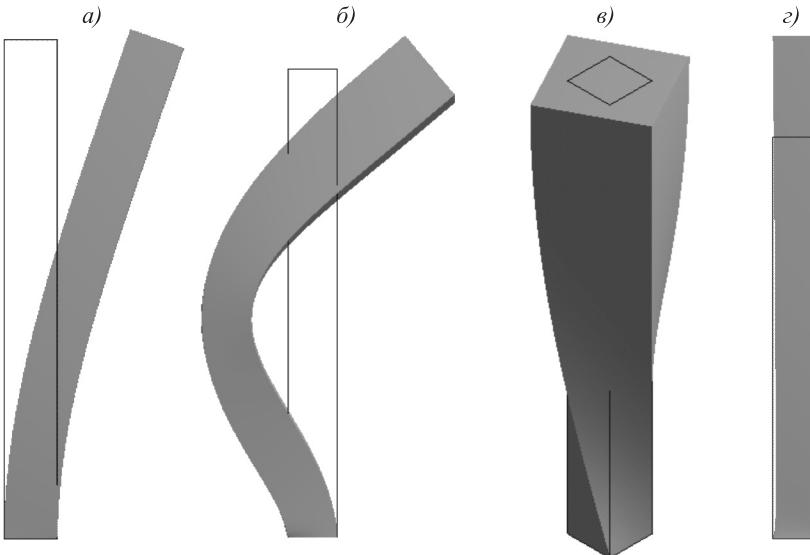


Рис. 5. Формы колебаний стержня высотой 0,28 м для первой и второй (а), третьей и четвертой (б), пятой (в) и шестой (г) собственных частот

т.е. совпадение собственной частоты конструкции с частотой действующей нагрузки, обусловленной срывом вихрей.

Табл. 2 показывает, что с ростом высоты стержня собственная частота конструкции уменьшается. С увеличением модуля упругости материала частота возрастает и снижается при увеличении плотности материала стержня. Курсивом выделены результаты модального анализа для параметров конструкции, использованных при проведении сопряженного расчета. Как следует из описанных выше результатов, явления резонанса не наблюдается, поскольку частота срыва вихрей (14,09 Гц) существенно ниже первой собственной частоты конструкции. Полужирным шрифтом выделены частоты, примерно равные частоте срыва вихрей в дорожке Кармана, поэтому эти параметры опасны с точки зрения возбуждения резонансных колебаний. В дальнейшем на основе данных модальных расчетов будут выполнены расчеты конструкций, у которых первая частота близка к частоте срыва вихрей.

Таблица 2. Собственные частоты колебаний для различных высот стержня и свойств материала

Высота стержня $h$ , м	Модуль упругости $E$ , МПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Частота $f_i$ , Гц (порядковый номер)			
			1, 2	3, 4	5	6
0,2	6,35	1	2	3	4	5
		2	20	67,74	386,11	394,8
		3	40	47,90	273,02	279,16
	12,7	2	80	33,87	193,06	197,4
		3	20	95,8	546	558,3
		4	40	67,7	386,1	394,8
	25,4	2	80	47,9	273,02	279,2
		3	20	135,49	772,22	789,59
		4	40	95,81	546,04	558,33
		5	80	67,75	386,11	394,8
		6				708,71

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
0,28	6,35	20	34,77	206,95	281,77	505,38
		40	24,58	146,33	199,24	357,36
		80	17,38	103,47	140,89	252,69
	12,7	20	49,2	292,7	398,5	714,7
		40	34,8	206,9	281,8	505,4
		80	24,6	146,3	199,24	357,4
		245	<b>14,05</b>	83,6	113,85	204,2
	25,4	20	69,53	413,89	563,55	1010,8
		40	49,17	292,7	398,49	714,72
		80	34,77	206,95	281,77	505,38
0,4	6,35	20	17,08	104,27	197,12	280,9
		40	12,08	73,729	139,39	198,65
		80	8,54	52,13	98,56	140,47
	12,7	20	24,2	147,5	278,8	397,3
		40	17,1	104,3	197,1	280,9
		59	<b>14,06</b>	85,85	162,3	231,32
		80	12,1	73,7	139,4	198,7
	25,4	20	34,16	208,54	394,25	561,86
		40	24,15	147,46	278,77	397,3
		80	17,08	104,27	197,12	280,93

**Заключение.** На основе технологии двустороннего взаимодействия потоков (2-FSI), реализованной в ПК ANSYS с использованием модулей Fluent, Mechanical и технологии System Coupling, отражена методология проведения связанных 3D расчетов и численно исследован процесс колебания упругого стержня. Анализ структуры течения воздуха в окрестности модели показал наличие отрывных зон, линии растекания и вихревой дорожки Кармана.

Согласно данным математического моделирования, сначала стержень совершает колебания в направлении основного потока с первой собственной частотой, амплитуда которых быстро затухает. В следующий временной период стержень совершает поперечные колебания в направлении  $z$ , вызванные срывом вихрей в дорожке Кармана. Для стержня получены собственные частоты и формы колебаний.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Battino R.S. A beginners guide to literature in the field of Aeroelasticity // Cranfield College of Aeronautics Report. 1997. No. 9712. P. 31.
2. Фершинг Г. Основы аэроупругости / пер. с нем. К.Ф. Плита; под ред. Г.М. Фомина. М.: Машиностроение, 1984. 600 с.
3. Фын Я.Ц. Введение в теорию аэроупругости / под ред. Э.И. Григорюка; пер. с англ. А.И. Смирнова. М.: Физматгиз, 1959. 523 с.
4. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан; пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецовой; под ред. Б.Е. Маслова. М.: Стройиздат, 1984. 360 с. Пер. изд.: Wind Effects on Structures / E. Simiu, R. Scanlan. Willey, 1978.

5. Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н. Избранные задачи аэроупругости: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2007. 48 с.
6. Погудалина С.В., Вальгер С.А., Федорова Н.Н. Математическое моделирование колебания пластины в воздушной среде // Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы строительства», посвящ. 85-летию со дня образования НГАСУ (Сибстрин). Новосибирск: НГАСУ(Сибстрин), 2015. С. 268–272.
7. Федорова Н.Н., Вальгер С.А. Моделирование взаимодействия потока воздуха с гибкой пластиной // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 4 (676). С. 118–129.
8. Вальгер С.А., Федорова Н.Н., Федоров А.В. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 1. С. 29–42.

**Погудалина Светлана Владимировна**, магистрант

Новосибирский государственный технический университет

**Федорова Наталья Николаевна**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

**Вальгер Светлана Алексеевна**, канд. физ.-мат. наук

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено после доработки 18.04.16

**Pogudalina Svetlana Vladimirovna**, Master student

Novosibirsk State Technical University, Russia

**Fedorova Natal'ya Nikolaevna**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Valger Svetlana Alexeevna**, PhD

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **COUPLED CALCULATION OF AIRFLOW INTERACTION WITH ELASTIC ROD OF SQUARE CROSS SECTION FIXED RIGIDLY TO A SUBSTRATE**

The study of wind effects on buildins is one of the most important stages of design, since the results of these calculations can prevent the undesired vibrations, damage and destruction of buildings and other structures. The paper presents the results of numerical modeling of vibration of an elastic rod mounted normal to the external flow and fixed rigidly to a substrate. The simulation is performed with ANSYS software using the technology of bidirectional coupling (2-FSI). The hydrodynamic, conjugate and modal analysis have been performed. The structure of the air flow in the vicinity of the model was analyzed. The oscillations of the elastic model were revealed and the stress-strain state was obtained. The natural frequencies of the rod and corresponding vibration shapes are found.

**К e y w o r d s:** aeroelasticity, wind effects, coupling problem, Fluid Structure Interaction (FSI), numerical modeling.

## **REFERENCES**

1. Battoo R.S. A Beginners Guide to Literature in the Field of Aeroelasticity. Cranfield College of Aeronautics Report. 1997. No. 9712. P. 31.

2. Fershing H.W. Osnovy aerouprugosti [Grundlagen der Aeroelastik]. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1974. 600 p. (in Russia)
3. Fung Ya.G. Vvedenie v teoriyu aerouprugosti [An Introduction to the Theory of Aeroelasticity]. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1955. 523 p. (in Russia)
4. Simiu E., Scanlan R. Vozdeystvie vетра na zdaniya i sooruzheniya [Wind Effects on Structures]. John Wiley & Sons, Inc., 1978. 360 p. (in Russia)
5. Grishanina T.V., Shklyarchuk F.N. Izbrannye zadachi aerouprugosti: uchebnoe posobie [Selected problems of aeroelasticity: training manual]. Moscow, Publishing house MAI, 2007. 48 p. (in Russia)
6. Pogudalina S.V., Valger S.A., Fedorova N.N. Matematicheskoe modelirovaniye kolebaniya plastiny v vozduшnoy srede. Materialy VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye voprosy stroitel'stva», posvyashch. 85-letiyu so dnya obrazovaniya NGASU [Mathematical modelling of plate vibrations in the air environment. Proceedings of VIII All-Russian scientific-technical conference «Actual questions of civil engineering». Novosibirsk, NSUACE, 2015. Pp. 268–272. (in Russia)
7. Fedorova N.N., Valger S.A. Modelirovaniye vzaimodeystviya potoka vozdukha s gibkoy plastinoy [Numerical modelling of interaction between flexible plate and airflow]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 4 (676). Pp. 118–129. (in Russia)
8. Valger S.A., Fedorova N.N., Fedorov A.V. Struktura turbulentnogo otryvnogo techeniya v okrestnosti ustanovленnoy na plastine prizmy s kvadratnym secheniem [Structure of turbulent separated flow in the neighborhood of a plate-mounted prism of square section]. Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and Aeromechanics]. 2015. Vol. 22. No. 1. Pp. 29–42. (in Russia)

УДК 539.3

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

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТЕЛ ПРИ БОЛЬШИХ НАГРУЗКАХ В ОКРЕСТНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЙ

При больших напряжениях материал претерпевает большие пластические деформации и может иметь место деградация его свойств. В частности, модуль Юнга в таких ситуациях в известных экспериментах на металлах значительно уменьшается. Представляет интерес изучение влияния этого свойства на распределение остаточных напряжений и смещений. Проблема исследуется на основе аналитического решения для кругового отверстия (плоское напряженное состояние) под действием сжимающих (растягивающих) постоянных усилий на бесконечности и численного решения, учитывающего изменение модуля Юнга в окрестности ослабления. Приведены примеры расчета и анализ результатов.

**Ключевые слова:** плоскость, отверстие, решение, упругость, интегральные уравнения, граничные условия, численный счет.

Рассмотрены особенности деформирования материалов при больших напряжениях и возникновении пластических деформаций. Предполагая в таком нагруженном теле образование полости со свободной поверхностью, получим выдавливание материала в полость. В таких ситуациях модуль Юнга в известных экспериментах на металлах существенно различается на свободной поверхности полости в материале и вдали от нее, где он значительно меньше. Требуется дополнительная информация о физике материалов в условиях значительных напряжений при наличии свободной поверхности. Необходимо также проводить целенаправленные эксперименты, чтобы установить влияние указанного фактора. Возникает необходимость привлечения той или иной дополнительной гипотезы, сформулированной на основе наблюдений, для предварительного направления исследований. Упругое изменение формы после снятия нагрузки на поверхности оказывает существенное влияние на состояние материала, приводя к появлению переходного слоя в окрестности ослабления. Происходит локальный сброс энергии деформации в окрестности образования полости, что обеспечивает изменение концентрации напряжений. Проблема исследуется на основе аналитического решения для плоскости с круговым отверстием, сжимаемой на бесконечности, и численного решения, учитывающего изменения модуля Юнга в окрестности ослабления. С приближением к области разгрузки, возникающей вследствие образования свободной от напряжений части границы тела, проявляются различные физические эффекты, не учитываемые в существующих стандартных формулировках задач механики сплошных сред. Речь может идти о более или менее обоснованном представлении процесса при больших напряжениях [1–4]. Перестройка материала при росте напряжений от нуля до больших значений происходит непрерывно, но с различной активностью. В работе [1] построена модель повреждаемости металлических

материалов в процессе больших пластических деформаций, приведены численные расчеты поля остаточных напряжений и процесса распружинивания с учетом уменьшения модуля Юнга и накопленной анизотропии пластических деформаций.

Если говорить о полости, то ее образование способствует появлению некоторого переходного слоя между самой полостью и удаленной от нее части материала. В этом слое происходит локальный сброс энергии деформации и изменение концентрации напряжений. Возникающее сложное напряженное состояние в окрестности полости инициирует фазовое превращение материала, другие нестационарные процессы, вызывая интерес к поиску решений соответствующих краевых задач. При изучении влияния тех или иных деформационных свойств материала около ослаблений необходимо строить аналитическое решение модельных задач с целью избежать погрешностей, происходящих из численного расчета.

Рассмотрим упругую плоскость, ослабленную круговым отверстием радиуса  $R$ . Предположим, что контур отверстия свободен от внешних напряжений, а на бесконечности действуют сжимающие напряжения  $\sigma_0$  в направлении оси  $x$ . Отнеся величины, имеющие размерность длины, к  $R$ , а напряжений к  $\sigma_0$ , перейдем к безразмерным величинам (рис. 1). Решение этой задачи в полярных координатах запишем в виде [5]:

для напряжений

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{4R^2}{r^2} + \frac{4R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta;\end{aligned}\quad (1)$$

для смещений

$$\begin{aligned}v_r &= \frac{\sigma_0}{8\mu r} \left\{ (\kappa - 1)r^2 + 2R^2 + 2 \left[ R^2(\kappa + 1) + r^2 - \frac{R^4}{r^2} \right] \cos 2\theta \right\}, \\ v_\theta &= -\frac{\sigma_0}{8\mu r} \left[ R^2(\kappa - 1) + r^2 + \frac{R^4}{r^2} \right] \sin 2\theta,\end{aligned}\quad (2)$$

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

Исследуем поведение касательных напряжений и смещений из (1), (2). Касательные напряжения достигают экстремальных значений при  $r = R\sqrt{3}$ .

Компонента смещений  $v_\theta(r, \theta)$  принимает экстремальное значение, в данном случае минимума, при

$$r = R \sqrt{\frac{\kappa - 1 + \sqrt{(\kappa - 1)^2 + 12}}{2}}.$$

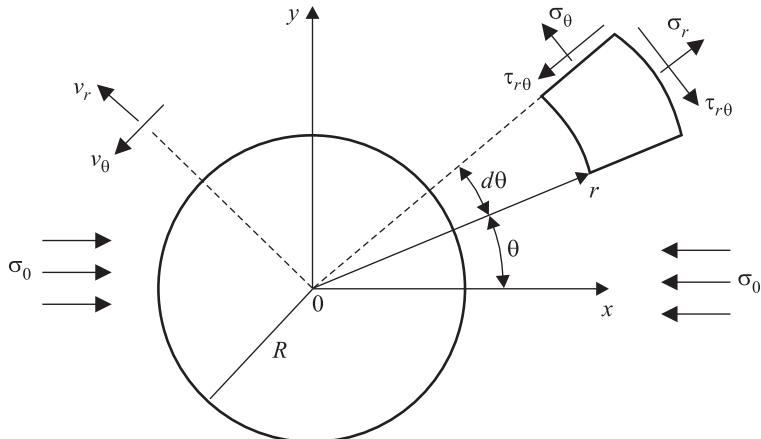


Рис. 1. Расчетная схема плоскости с отверстием

Положение этих минимальных значений зависит от коэффициента Пуассона и лежит в интервале  $1,315R \leq r \leq R\sqrt{3}$ , если  $0 \leq \nu \leq 0,5$ . В работах [4–7] устойчивость сжимаемой пластины (см. рис. 1) рассматривалась без учета возникновения области повышенных значений  $\tau_{r\theta}$ , минимальных  $v_\theta$  и возможности изменения модуля Юнга.

При изучении влияния тех или иных свойств материалов на деформирование в окрестности ослабления после разгрузки рассмотрим вопрос уменьшения модуля Юнга от накопленной пластической деформации [1–4]. Будем исходить из того, что модули упругости материалов могут зависеть от накопленной пластической деформации. На рис. 2 приведена диаграмма нагружения образца из стали. Точка М лежит на криволинейном участке диаграммы и характеризует пластические свойства материала. Для точки М материал образца с позиций закона Гука имеет модуль Юнга, представляющий собой секущий модуль. Например, для чугуна модуль Юнга в обычном смысле не существует, и когда для расчета чугунных изделий применяют закон Гука, то имеют в виду некоторое среднее значение секущего модуля, соответствующее диапазону рабочих напряжений.

Предлагается модель, описывающая развитие переходных слоев в окрестности ослабления, как область новой фазы. Предполагается, что переходные слои, окружающие полость, представляют собой измененный материал в виде кольцевого слоя, который может быть как непрерывно, так и дискретно неоднородным. В нашем случае фазовое превращение инициировано внешним одноосным растяжением-скатием и последующей разгрузкой в результате образования отверстия. В таких условиях происходит сброс напряжений на контуре полости и соответствующий рост модуля Юнга от  $E_1$  при  $r \geq R\sqrt{3}$  и до  $E_2$  на  $r = 1$  ( $E_1 > E_2$ ).

Напряженное состояние около отверстия уже не определяется аналитическим решением типа (1), (2), поэтому необходимо проводить исследо-

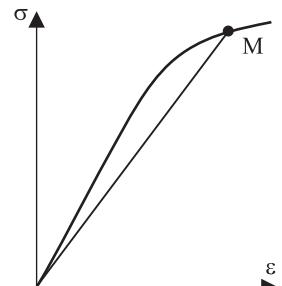


Рис. 2. Диаграмма растяжения стали

вание численно. Рассмотрим систему сингулярных интегральных уравнений [8, 9]:

$$f(t_0) + 2\mu g(t_0) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \kappa \overline{f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} &= \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\kappa \overline{f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d\frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0}, \\ f(t) &= i \int_0^t (X_n + iY_n) ds = \operatorname{Re} f + i \operatorname{Im} f, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $t \in \Gamma$ ,  $X_n$ ,  $Y_n$  – компоненты усилий на  $\Gamma$  в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  
 $g = u + iv$ ;  $u$ ,  $v$  – компоненты смещений в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  
 $i$  – мнимая единица; черточка над функцией обозначает комплексно сопряженное значение;  
 $t_0$  – аффикс точки границы  $\Gamma$ .

Рассмотрим кусочно-однородную плоскость с отверстием. Положим, что в кольце  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$  модуль Юнга  $E_2$ , а при  $r \geq \sqrt{3}$  принимаем  $E_1$ . В предположении  $E_1 = E_2$  с помощью уравнений (3), (4) вычисляем напряженно-деформированное состояние около ослабления. Результаты расчета смещений при  $E_1 = E_2$  сравнивались с аналитическим решением (2). Как и следовало ожидать, решение системы (3), (4) и решение (2) практически совпадают. На рис. 3 приведены результаты расчета функции напряжений  $f$ , определяемой согласно (4), при  $y = 0$ . Кривой 1 на рис. 3 отвечает точное решение (1), а кривой 2 – численное, полученное из (3), (4). Эти решения практически совпадают, что является основанием использования уравнений (3), (4) для расчета напряженно-деформированного состояния около ослабления, если расчетная область кусочно-однородная. Кривые 3, 4 на рис. 3 получены соответственно для  $E_2 = 1,5 E_1$  и  $E_2 = 2E_1$ . Как следует из результатов расчета, максимальное значение компоненты  $\sigma_0$  достигается в точке  $\theta = 0$ ,  $r = 1$  и растет с ростом  $E_2$ , при этом область растягивающих напряжений уменьшается. Из (1) следует, что на контуре отверстия возникают растягивающие напряжения  $\sigma_0 = 1$  при  $\theta = 0$ ,  $r = 1$ , которые монотонно убывают до

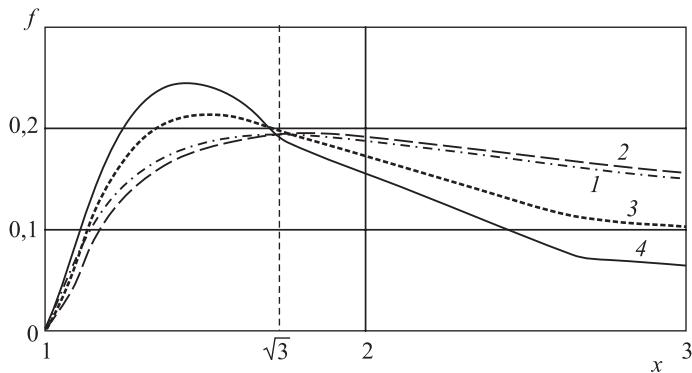


Рис. 3. Эпюры функции  $f$   
кривым 2–4 соответствуют  $E_2 = E_1$ ,  $E_2 = 1,5E_1$ ,  $E_2 = 2E_1$ ; 1 – решение (1)

$\sigma_0 = 0$  при  $\theta = 0$ ,  $r = \sqrt{3}$  и при  $\theta = 30^\circ$ ,  $r = 1$ , ограничивая зону растяжения. Для случая  $E_2 = 1,5E_1$  значения  $\sigma_0 = 0$  достигаются при  $\theta = 0$ ,  $r = 1,486$ , если же  $E_2 = 2E_1$ , то  $\sigma_0 = 0$  при  $\theta = 0$ ,  $r = 1,365$ . В то же время из (1) следует, что сжимающие максимальные напряжения  $\sigma_0 = 3$  при  $r = 1$ ,  $x = 0$ , а при  $E_2$  больше, чем  $E_1$ , они несколько увеличиваются для  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$ .

Существуют материалы, например, бетон, камень, для которых разрушающие растягивающие и сжимающие напряжения связаны соотношением

$$\sigma_p \approx 0,2 |\sigma_{\text{сж}}|. \quad (5)$$

Полученные из (1) зависимости для максимальных значений  $\sigma_0$  при растяжении или сжатии дают

$$\sigma_p \approx 0,333 |\sigma_{\text{сж}}|. \quad (6)$$

Из сравнения (5) и (6) можно сделать вывод, что на контуре полости разрушение начинается от растягивающих напряжений в окрестности точки  $\theta = 0$ ,  $r = 1$ . Наличие кольцевой области с  $E_2 > E_1$  еще больше усиливает этот вывод, приводя к разрыву, т.е. к образованию трещины и перераспределению напряжений и смещений в окрестности ослабления. С ростом модуля Юнга область растягивающих напряжений  $\sigma_0$  уменьшается, а максимальные значения возрастают, увеличивая еще больше коэффициент пропорциональности в (6).

Эпюры функции в предположении разрушения отрывом, т.е. образования трещины длиной  $1 \leq r \leq 1,36$  на  $y = 0$ , приведены на рис. 4 для значений  $E_2 = E_1$ ,  $E_2 = 1,5E_1$  и  $E_2 = 2E_1$ , отвечающих кривым 1–3. Сравнение рис. 3 и 4 свидетельствует не только о количественном, но и качественном отличии

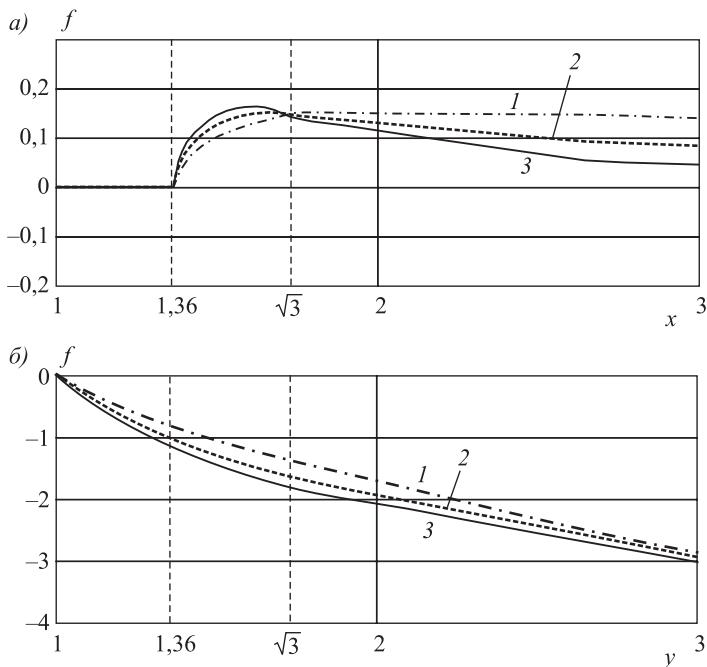


Рис. 4. Эпюры функции  $f$ : кривым 1–3 соответствуют  $E_2 = E_1$ ,  $E_2 = 1,5E_1$ ,  $E_2 = 2E_1$  при длине трещины  $l = 0,36$ :  
a) – на  $y = 0$ ; б) – на  $x = 0$

напряженно-деформированного состояния в окрестности ослабления в процессе образования разрыва. Расчеты напряжений показали, что наличие кольцевой области с  $E_2 > E_1$  приводит к самоподдерживающему росту трещины в пределах  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$ . Эпюры функции  $f$  были рассчитаны для значений  $E_2 = E_1$ ,  $E_2 = 1,5E_1$  и  $E_2 = 2E_1$  при раскрытии трещины на участке  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$ ,  $y = 0$ . Существенные изменения растягивающих напряжений  $\sigma_0$  происходят на  $y = 0$ , но их уже недостаточно для распространения трещины. Значения сжимающих напряжений  $\sigma_0$  на  $x = 0$  практически не меняются при движении трещины. При  $E_2 > E_1$  прочностные свойства кольцевой области  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$  превосходят соответствующие при  $E_2 = E_1$  и исключают лавинообразное разрушение.

Рассмотрен случай кусочно-однородного кольца для  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$ , состоящего из трех, равных по толщине колец, с различными постоянными в пределах этих колец значениями модуля Юнга. Используя кусочно-постоянную аппроксимацию изменения модуля Юнга от  $E_2$  до  $E_1$ , вычислялось их влияние на деформирование в окрестности полости. Картина деформирования трехслойного кольца аналогична однослоиному и позволяет качественно интерпретировать результаты для любого закона убывания от  $E_2$  до  $E_1$ .

Решение задачи для плоскости с отверстием моделирует конечную область с ослаблением, когда характерный размер отверстия много меньше линейного размера рассматриваемой области. Чтобы исключить возможность разрушения отрывом в условиях рис. 1 можно в направлении оси  $u$  приложить сжимающие усилия  $\sigma_0$ . В таком случае разрушение начинается от сжимающих напряжений при достижении ими предельной величины. Большие сжимающие напряжения в окрестности  $r = 1$ ,  $x = 0$  приводят к переходу материала в новую фазу, например, разрушение в пыль, по которой может происходить проскальзывание за счет нового сложного напряженно-го состояния и переход конструкции в целом в новое устойчивое состояние, но уже не симметричное. Увеличение внешних напряжений до некоторого предела, достижение которого сопровождается новым проскальзыванием, но в другом месте, приводит к переходу от неустойчивого равновесия к новому устойчивому.

До сих пор рассматривалось симметричное деформирование и разрушение, начинающееся с контура ослабления. На практике обычно разрушение никогда не происходит симметрично, а реализуется в одном месте, которое выбирается случайно из нескольких возможных. Пусть трещина отрыва образовалась в окрестности точки  $\theta = 0$ ,  $r = 1$ , а в симметричной окрестности точки  $\theta = \pi$ ,  $r = 1$  разрыва нет. Расчет деформирования в этом случае показал уменьшение растягивающих напряжений в окрестности точки  $\theta = \pi$ ,  $r = 1$  и сжимающих в симметричных точках  $\theta = \pm 0,5\pi$ ,  $r = 1$ . При увеличении  $\sigma_0$  разрушение предпочтительнее произойдет за счет сжимающих напряжений в окрестности одной из точек на оси  $u$ . В этом случае полностью нарушается процесс симметричного деформирования.

Таким образом, установлены круговые области максимальных касательных напряжений и минимальных значений тангенциальных смещений в окрестности кругового ослабления. Учитывая большие сжимающие напряжения и связанные с ними пластические деформации, приводящие к

уменьшению модуля Юнга, исследовано качественно и количественно перераспределение напряженно-деформированного состояния и начала разрушения в процессе проведения полости со свободной поверхностью. Предложен алгоритм расчета механического состояния в окрестности полости, учитывающий изменение модуля Юнга материала, определены пределы изменения напряжений и смещений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shutov A.V., Silbermann C.B., Ihlemann J. Ductile damage model for metal forming simulations including refined description of void nucleation // International Journal of Plasticity. 2015. Vol. 71. Pp. 195–217.
2. Geng L., Wagoner R.H. Role of plastic anisotropy and its evolution on springback // Intern. J. Mech. Sci. 2002. Vol. 44. No. 1. Pp. 123–148.
3. Gandy T., Kinzel G.L. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions // J. Mater. Process. Techn. 2001. Vol. 108. Pp. 369–375.
4. Bauer S.H., Kastanova S.V., Morozov N.F., Semenov B.N. Stability of a nanoscale-thickness plate weakened by a circular hole // Report Academy of Sciences. 2014. Vol. 59(9). Pp. 416–418.
5. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 706 с.
6. Li K.P., Carden W.P., Wagoner R.H. Simulation of springback // Intern. J. Mech. Sci. 2002. Vol. 44. No. 1. Pp. 103–122.
7. Бочарев А.О., Греков М.А. Локальная потеря устойчивости пластины сnanoотверстием при одноосном растяжении // Докл. Академии наук. 2014. Т. 457. № 3. С. 282–285.
8. Миренков В.Е. Связь напряжений и смещений на контуре выработки // ФТПРПИ. 1978. № 3. С. 19–23.
9. Миренков В.Е., Шутов В.А. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений. Новосибирск: Наука, 2009. 176 с.

**Миренков Валерий Егорович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств  
**Шутов Валерий Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств  
**Полуктков Вячеслав Александрович**, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 15.04.16

**Mirenkov Valeriy Egorovich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Russia

**Shutov Valeriy Alexeevich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Russia

**Poluektov Vyacheslav Alexandrovich**, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Russia

#### **DEFORMATION AND FRACTURE OF BODIES UNDER LARGE LOADS NEAR THE WEAKENINGS**

Under large stresses, large plastic deformations occur in the material with eventual deterioration of its properties. In particular, the Young modulus decreases essentially in known experiments on metals. It is of interest to study the influence of this property on

the distribution of residual stresses and displacements. The problem is analyzed basing on the analytical solution for a circular hole (plane stress condition), loaded by constant compressional (tensional) stresses at the infinity and a numerical solution, which accounts for the varying Young's modulus near the weakening. Some computational examples are given, including the analysis of results.

**К e y w o r d s:** plane, hole, solution, elasticity, integral equations, boundary conditions, numerical computations.

## REFERENCES

1. Shutov A.V., Silbermann C.B., Ihlemann J. Ductile damage model for metal forming simulations including refined description of void nucleation. International Journal of Plasticity. 2015. Vol. 71. Pp. 195–217.
2. Geng L., Wagoner R.H. Role of plastic anisotropy and its evolution on springback. Intern. J. Mech. Sci. 2002. Vol. 44. No. 1. Pp. 123–148.
3. Gandy T., Kinzel G.L. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions. J. Mater. Process. Techn. 2001. Vol. 108. Pp. 369–375.
4. Bauer S.H., Kastanova S.V., Morozov N.F., Semenov B.N. Stability of a nanoscale-thickness plate weakened by a circular hole. Report Academy of Sciences. 2014. Vol. 59(9). Pp. 416–418.
5. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow, Science, 1966. 706 p. (in Russia)
6. Li K.P., Carden W.P., Wagoner R.H. Simulation of springback. Intern. J. Mech. Sci. 2002. Vol. 44. No. 1. Pp. 103–122.
7. Bochkarev A.O., Grekov M.A. Lokal'naya poterya ustoychivosti plastiny s nanootverstiem pri odnoosnom rastyazhenii [Local instability of a plate with a circular nanohole under uniaxial tension]. Doklady Akademii nauk [Report Academy of Sciences]. 2014. Vol. 457. No. 3. Pp. 282–285. (in Russia)
8. Mirenkov V.E. Svyaz' napryazheniy i smeshcheniy na konture vyrabotki [Relation between stresses and shifts at the periphery of a working]. FTPRPI [Journal of mining science]. 1978. No. 3. Pp. 19–23. (in Russia)
9. Mirenkov V.E., Shutov V.A. Matematicheskoe modelirovaniye deformirovaniya gornykh porod okolo oslableniy [Mathematical modeling of deformation of rock near weakening]. Novosibirsk, Nauka. 2009. 176 p. (in Russia)

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327 : 539.4

И.Н. МАКСИМОВА, В.Т. ЕРОФЕЕВ, Н.И. МАКРИДИН,  
Ю.В. ПОЛУБАРОВА

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ РАЗНОГО ВОЗРАСТА

Экспериментально показано влияние суперпластификатора на формирование фазового состава цементного камня в широком временном диапазоне и на его структурные параметры, определяющие механическое поведение цементного камня на диаграмме нагружения.

**Ключевые слова:** прочность, модуль упругости, критический коэффициент интенсивности напряжений, процесс разрушения, акустическая эмиссия, энергия разрушения, сила продвижения трещины.

Существенные достижения последних десятилетий в технологии бетонов обусловлены значительным ростом эффективности добавок различной природы, что позволяет кардинально изменять реотехнологические свойства, плотность, однородность и прочность структуры матричной фазы цементных композитов.

Вместе с тем современная тенденция использования в строительстве более высокопрочных бетонов на основе модифицированных структур цементных матриц, расширение областей их применения и обусловленное этим разнообразие требований к их свойствам повлекли за собой необходимость осуществления комплексных исследований по определению механического поведения модифицированных структур цементного камня на диаграмме нагружения с позиций структурной механики разрушения и оценке самого процесса разрушения по методу акустической эмиссии (АЭ).

Ранее в работах [1–3] были представлены результаты анализа экспериментально полученных параметров конструкционной прочности модифицированной и немодифицированной структуры цементного камня разного возраста по акустическому параметру  $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ , который может быть использован для идентификации процесса разрушения образцов на диаграмме нагружения с учетом различных физических явлений [4], ле-

жащих в основе генерируемых ультразвуковых (УЗ) импульсов АЭ с дискриминационными амплитудами  $A_1$  и  $A_2$  и отражающих в общем случае стохастический вклад пластической и упругой (хрупкой) составляющей в суммарный процесс разрушения.

Для целей прогнозирования разрушения акустический параметр  $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ , характеризующий соотношение малых и больших амплитуд, является наиболее надежным и чувствительным параметром отклонения от линейной упругости в вершине искусственной трещины опытных образцов. Стохастичность АЭ на этапах нагружения обусловлена неравновесными фазовыми переходами, отвечающими особой точке (точке бифуркации), при достижении которой скачкообразно изменяются свойства из-за самоорганизации процесса, и тем, как отмечено в [5, 6], что в линейно-упругом материале сингулярное поле напряжений вблизи вершины острой трещины характеризуется коэффициентами интенсивности напряжения  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , отражающими различные пути раскрытия трещин разрушения.

В данной работе представлены результаты экспериментальной оценки и идентификации процесса разрушения цементного камня на образцах типа I по ГОСТ 29167 при неравновесных механических испытаниях по суммарному энергетическому параметру акустической эмиссии ( $\Sigma\mathcal{E}_{A\mathcal{E}}$ ,  $\text{B}^2/\text{cm}^2$ ), который регистрировали с помощью акусто-эмиссионного устройства [4]. В этой связи параметр АЭ  $\Sigma\mathcal{E}_{A\mathcal{E}}$  служит непосредственной мерой как критического коэффициента интенсивности напряжения  $K_{1c}$ , так и критической интенсивности высвобождения энергии или силы продвижения трещины  $G_{1c}$ , и в этом заключаются исключительные возможности АЭ как метода прогнозирования разрушения [7].

Для сравнительных испытаний и анализа были изготовлены две серии опытных образцов цементного камня типа I по ГОСТ 29167 размером  $4 \times 4 \times 16$  см на основе бездобавочного сульфатостойкого портландцемента марки 400 Вольского завода с нормальной густотой 24 %. Одна серия образцов (контрольная) без добавки суперпластификатора (СП) С-3, а другая (рабочая) с использованием СП С-3 в количестве 1 % от массы цемента. Формование образцов, условия твердения и оценки контролируемых параметров определялись экспериментальным путем<sup>1–5</sup>.

В табл. 1 представлен предполагаемый фазовый состав цементного камня образцов серии 1 и 2 в возрасте 420 сут. На полученных ионизационных рентгенограммах образцов этих серий линии размыты, малоинтенсивные вследствие наложения линий разных фаз друг на друга, слабой закристаллизованности образовавшихся фаз и блочной структуры фаз. Это позволяет считать, что кристаллические решетки образовавшихся фаз находятся в неравновесном напряженном состоянии.

<sup>1</sup> ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

<sup>2</sup> ГОСТ 53231–2008. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

<sup>3</sup> ГОСТ 24452–80. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

<sup>4</sup> ГОСТ 29167–91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

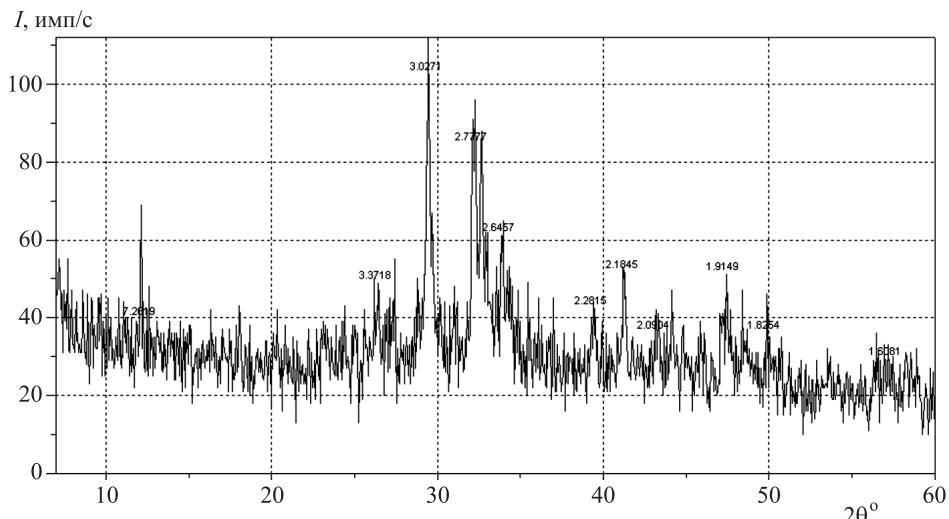
<sup>5</sup> Инструкция. Прибор для измерения коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ–2. Л.: ЛЭТИ, 1967. 32 с.

**Таблица 1. Фазовый состав цементного камня**

Серия образцов	СП С-3, %	Химический состав фаз	Характер структуры фаз
1	–	Тоберморитоподобная фаза $C_3SH_2$ $C_4AH_{13}$	Волокна Иглы Тонкие гексагональные пластинки Призматические удлиненные кристаллы
2	1,0	CSH(A) $C_3SH_2$ $C_3FH_6$ $C_4FH_{13}$ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	Иглы Иглы Округлые изотропные зерна Гексагональные пластинки Игольчатые кристаллы

На рис. 1, 2 приведены рентгенограммы опытных образцов сравниваемых серий в возрасте цементного камня 18 лет. Ранее [8] было показано, что степень гидратации цемента за 18 лет твердения в образцах серии 1 и 2 составляла соответственно 57,8 и 44,3 %.

При анализе рентгенограмм составов № 1 и 2 установлено, что на образцах серии 2 наблюдается более высокая интенсивность негидратированного алита ( $2,77; 2,74 \text{ \AA}$ ), что может косвенно свидетельствовать о некотором замедлении гидратации. Однако соотношение интенсивностей алита и  $Ca(OH)_2$  ( $2,63 \text{ \AA}$ ) примерно одинаково. Это также подтверждает возможность активации гидратации силикатных фаз. Очевидно, несмотря на увеличение контактной зоны цементных частиц с жидкой фазой в присутствии СП наиболее активно процесс гидратации протекает при первоначальном взаимодействии цементных частиц с чистой водой. Таким образом, структура, сформированная при первичном контакте с чистой водой, в период твердения до 18 лет сохраняет более высокие прочностные свойства.



*Rис. 1. Рентгенограммы опытных образцов серии 1*

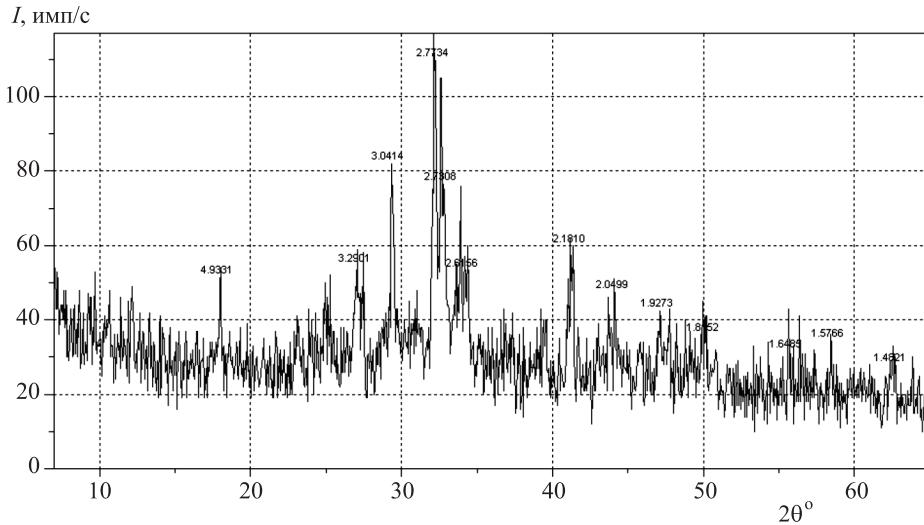


Рис. 2. Рентгенограммы опытных образцов серии 2

Характерно, что для образцов серии 2 с добавкой С-3 наблюдается снижение интенсивности отражений кальцита ( $3,029 \text{ \AA}$ ) по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о некотором снижении карбонизационных процессов в присутствии СП.

В отношении гидросиликатных фаз следует отметить, что в присутствии добавки С-3 (№ 2) происходит некоторое снижение интенсивности отражений фазы CSH II ( $1,82 \text{ \AA}$ ). В образце серии 2 отмечаются размытые отражения ( $1,82 \text{ \AA}$ ) по сравнению с № 1. Это значит, что в присутствии С-3 возможно образование широкого спектра мелкокристаллических гидросиликатных фаз, имеющих близкую, но искаженную структуру. Об этом косвенно свидетельствуют формы отражений (пиков) гидросиликатных фаз, имеющих ступенчатую несимметричную форму. Формирование многофазовой, мелкокристаллической гидросиликатной структуры может являться одной из причин повышения прочности цементных систем. Косвенно о некотором замедлении гидратации цементной системы в присутствии С-3 можно судить по значительному снижению интенсивности отражений кальцита в составе с добавкой С-3, вводимой одновременно с водой затворения.

Известно [9], что при адсорбции СП, и особенно высокомолекулярных, они оказывают влияние на морфологию гидратных фаз. В результате адсорбции изменяется не только форма кристаллов, но и замедляется их рост. Структура гидросиликатных фаз становится мелкокристаллической, состоящей из различных близких по строению гидратов. С одной стороны, на гидросиликатную систему это оказывает положительное влияние, поскольку переплетение различных фаз в целом упрочняет структуру, с другой – замедляется кристаллизация гидросиликатов – основных носителей прочности цементного камня.

На рис. 3, 4 представлены экспериментальные графические кинетические зависимости 1–3 суммарной энергии ультразвуковых импульсов АЭ на кривой нагружения сравниваемых серий опытных образцов цементного камня типа I в возрасте 28 и 420 сут и 18 лет соответственно.

Из анализа зависимостей 1–3 рис. 3, 4 следует, что при прочих равных условиях регистрации суммарной энергии АЭ от уровня нагружения опытных образцов цементного камня интенсивность энергии АЭ в возрасте 28 сут значительно ниже, чем интенсивность в возрасте 420 сут и, тем более, в возрасте 18 лет, что, естественно, обусловлено различной степенью гидратации цемента. Вместе с тем интенсивность суммарной энергии АЭ опытных образцов серии 1 в возрасте 18 лет оказалась в два раза выше, чем у образцов серии 2 в том же возрасте, что, с одной стороны, отражает особенности гидратационного твердения цементного вяжущего при изменении условий твердения в присутствии добавки СП, а с другой стороны, как отмечено в [10], упрочнение структуры во времени связано с переходом части адгезионных контактов электромагнитной и электростатической природы в кристаллизационные связи валентной природы.

В табл. 2 приведены основные свойства и структурные параметры цементного камня сравниваемых серий в возрасте 28 и 420 сут и 18 лет, отражающие влияние добавки СП С-3 в названном интервале времени.

При этом критическую интенсивность высвобождения энергии или силу продвижения трещины  $G_{1c}$ , Н/м, определяли по формуле [11]:  $G_{1c} = K_{1c}^2 / E_d$ , а энергию разрушения  $G_{1c}$ , Дж/м<sup>2</sup>, – по формуле [12]:  $G_{1c} = A_c / F$ , где  $A_c$  – полная работа разрушения, Дж;  $F$  – площадь разрушения, м<sup>2</sup>.

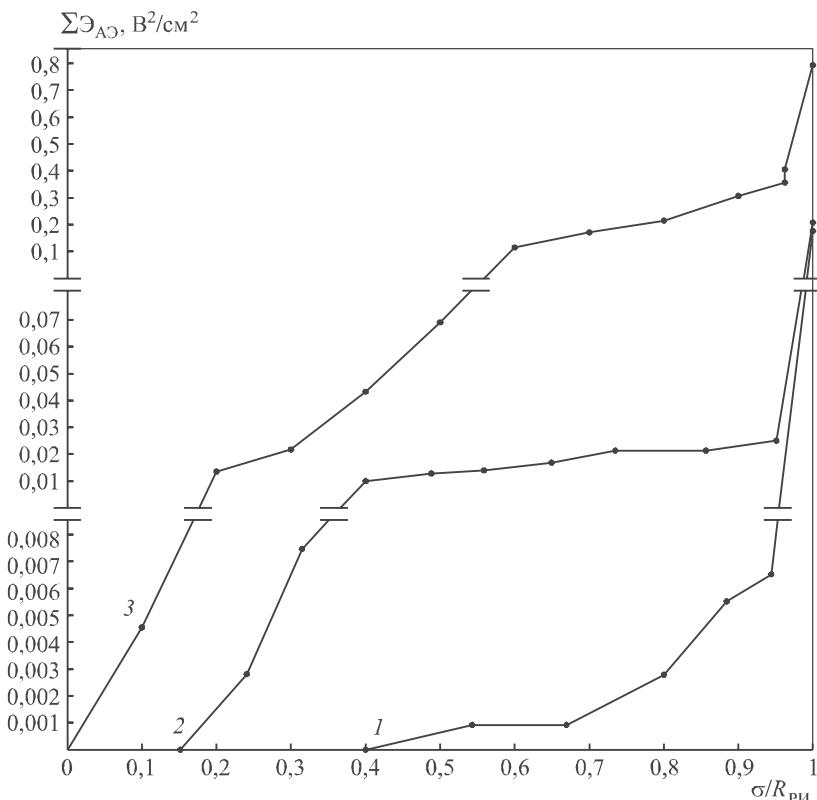


Рис. 3. Зависимости суммарной энергии акустической эмиссии ( $\Sigma \mathcal{E}_{\text{AE}}$ ,  $\text{B}^2/\text{cm}^2$ ) от относительного напряжения ( $\sigma/R_{\text{РИ}}$ ) для образцов цементного камня серии 1

1 – в возрасте 28 сут; 2 – в возрасте 420 сут; 3 – в возрасте 18 лет

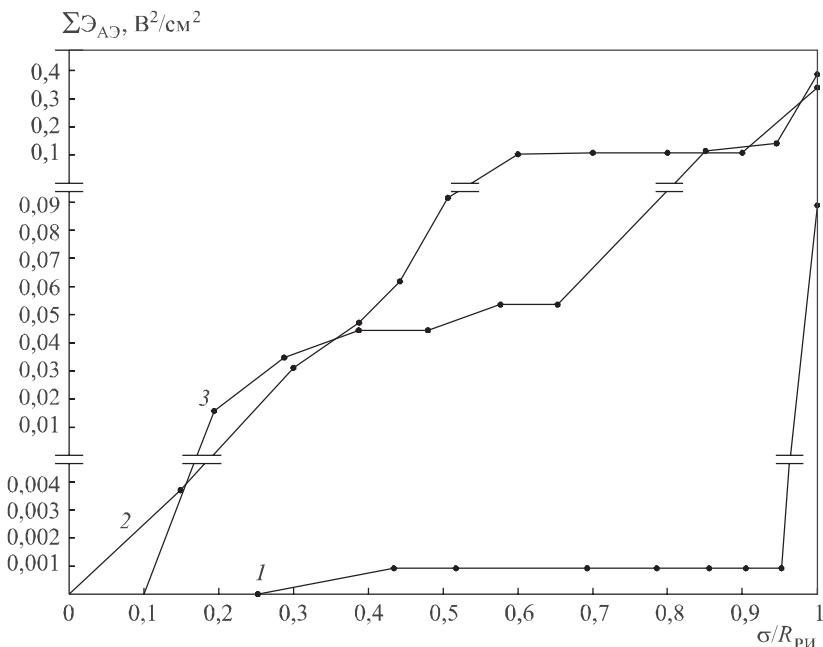


Рис. 4. Зависимости суммарной энергии акустической эмиссии ( $\Sigma\mathcal{E}_{\text{AE}}$ ,  $\text{B}^2/\text{cm}^2$ ) от относительного напряжения ( $\sigma/R_{\text{RI}}$ ) для образцов цементного камня серии 2  
1 – в возрасте 28 сут; 2 – в возрасте 420 сут; 3 – в возрасте 18 лет

Таблица 2. Основные свойства и структурные параметры цементного камня

Параметры качества цементного камня	Показатели качества сравниваемых серий образцов в возрасте		
	28 сут	420 сут	18 лет
<i>Серия 1</i>			
Плотность, $\text{kg/m}^3$	2081	2090	2081
Прочность при сжатии, $R_{\text{сж}}$ , МПа	76,7	87,5	90
Прочность на растяжение при изгибе, $R_{\text{бif}}$ , МПа	5,19	6,38	5,35
Коэффициент интенсивности напряжений, $K_{\text{lc}}$ , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	0,51	0,626	0,525
Энергия разрушения, $G_{\text{lc}}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$	–	85,6	115,6
Суммарная энергия АЭ, $\Sigma\mathcal{E}_{\text{AE}}$ , $\text{B}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$	0,17	0,21	0,79
Сила продвижения трещины, $G_{\text{lc}}$ , $\text{Н}/\text{м}$	10,77	15,77	11,52
<i>Серия 2</i>			
Плотность, $\text{kg/m}^3$	2091	2120	2052
Прочность при сжатии, $R_{\text{сж}}$ , МПа	68,2	74,5	81,8
Прочность на растяжение при изгибе, $R_{\text{бif}}$ , МПа	3,88	6,69	6,53
Коэффициент интенсивности напряжений, $K_{\text{lc}}$ , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	0,381	0,656	0,641
Энергия разрушения, $G_{\text{lc}}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$	–	75,3	122,7
Суммарная энергия АЭ, $\Sigma\mathcal{E}_{\text{AE}}$ , $\text{B}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$	0,108	0,27	0,39
Сила продвижения трещины, $G_{\text{lc}}$ , $\text{Н}/\text{м}$	6,2	18,61	17,6

**Заключение.** На основании проведенных исследований можно констатировать: 1. Анализ гидратации цементного камня сравниваемых серий в рассматриваемом диапазоне времени при использовании СП в составе цементного теста при одинаковом водоцементном отношении приводит к снижению степени гидратации цемента примерно на 23,4 % и к недобору прочности  $R_{сж}$  на 9,2 % в возрасте 18 лет.

2. Из анализа характера изменения  $R_{bf}$  и  $K_{1c}$  следует, что модификация дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня суперпластификатором негативно проявлялась только в возрасте 28 сут, в возрасте же 420 сут и 18 лет, напротив, модификация наноструктуры цементного камня суперпластификатором приводила к заметному превышению значений  $R_{bf}$  и  $K_{1c}$  относительно контрольного состава.

3. Анализ численных значений структурных параметров трещиностойкости (вязкости разрушения) цементного камня в рассматриваемом диапазоне времени показывает, что модификация наноструктуры цементного камня суперпластификатором С-3 в количестве 1 % от массы цемента приводит к снижению показателя трещиностойкости лишь в проектном возрасте цементного камня (28 сут). В более зрелом возрасте (420 сут и 18 лет) параметры структурной механики разрушения (коэффициент интенсивности напряжений, энергия разрушения и сила продвижения трещины) оказались более высокими у цементного камня с модифицированной наноструктурой. Энергетический показатель силы продвижения трещины, отражающий вязкость развития процесса разрушения модифицированной наноструктуры цементного камня в возрасте 18 лет, оказался выше примерно на 53 % относительно контрольного состава серии 1.

4. Структурно-системный анализ фазового состава продуктов гидратации и комплексная оценка механических свойств и структурных параметров трещиностойкости цементного камня многолетнего твердения позволяют предложить обобщенный коэффициент критерия трещиностойкости в виде произведения коэффициента интенсивности напряжения, энергии разрушения и силы продвижения трещины, как важнейший параметр конструкционной прочности, характеризующий оптимальное механическое поведение материала на диаграмме нагружения.

5. Комплексный анализ экспериментально полученных акустических параметров  $\Sigma\mathcal{E}_{AЭ}$  и  $N_1(A_1)/N_2(A_2)$  от интенсивности нагрузления опытных образцов в полосе частотного диапазона 50–150 кГц при двух уровнях дискриминации генерируемых ультразвуковых импульсов акустической эмиссии по амплитуде  $A_1$  и  $A_2$  позволяет констатировать, что применение СП С-3 является эффективным физико-химическим методом воздействия на формирование наноструктуры цементного камня, определяющей его прочность и параметр прочности – трещиностойкость. Амплитудно-энергетическое распределение импульсов АЭ на кривой нагрузления может являться важным прогностическим признаком предразрушающегося состояния, по которому можно судить также о степени хрупкости и осуществлять рецептурно-технологическую оптимизацию структуры цементного камня.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Суров И.А. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 3: Идентификация процесса разрушения // Стройт. материалы. 2012. № 7. С. 83–86.
2. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Скачков Ю.П., Тамбовцева Е.А. Комплексная оценка механического поведения модифицированной структуры цементного камня разного возраста // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 3(20). С. 29–36.
3. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. гос. ун-та, 2015. 360 с.
4. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении // Стройт. материалы. 2007. № 3. С. 26–29.
5. Билби Б. Разрушение // Механика разрушения. Разрушение конструкций / пер. с англ. М.: Мир, 1980. С. 203–227.
6. Броек Д. Основы механики разрушения / пер. с англ. М.: Высш. шк., 1980. 368 с.
7. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика / пер. с англ.; под ред. д-ра техн. наук Власова А.С. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
8. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсякова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 1 // Стройт. материалы. 2010. № 10. С. 74–77.
9. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
10. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л.: Стройиздат, 1974. 80 с.
11. Карпенко Н.И., Зайцев Ю.В., Окольникова Г.Э., Андрианов А.А. Экспериментальное определение физико-механических свойств и параметров механики разрушения ультравысокопрочных бетонов // Науч. тр. РААСН. Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2011 г. Москва; Орел, 2011. С. 242–248.
12. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсякова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 2 // Стройт. материалы. 2011. № 7. С. 72–75.

**Максимова Ирина Николаевна**, канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**Ерофеев Владимир Трофимович**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РААСН

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

**Макридин Николай Иванович**, д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**Полубарова Юлия Владимировна**, магистрант

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 01.04.16

**Maksimova Irina Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Erofeev Vladimir Trofimovich**, DSc, Professor, Cor. Member of RAACS

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Makridin Nikolay Ivanovich**, DSc, Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Polubarova Yulija Vladimirovna**, Undergraduate

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **ANALYSIS OF SUPERPLASTICIZERS PHASE COMPOSITION AND PARAMETERS OF STRUCTURAL FRACTURE MECHANICS OF CEMENT STONE OF DIFFERENT AGE**

Experiments show the effect of superplasticizer on the formation of the phase composition of cement stone in a wide time range and its structural parameters determining the mechanical behavior of cement paste on the load chart.

**Key words:** strength, elastic modulus, critical stress intensity factor, the process of destruction, acoustic emission, the fracture energy, crack force promotion.

### **REFERENCES**

1. Makridin N.I., Maksimova I.N., Surov I.A. Dolgovremennaya prochnost' modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya. Ch. 3: Identifikatsiya protsessov razrusheniya [Long-term strength of the modified cement stone structure. P. 3: Identification of process failure]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2012. No. 7. Pp. 83–86. (in Russia)
2. Maksimova I.N., Makridin N.I., Skachkov Yu.P., Tambovtseva E.A. Kompleksnaya otsenka mechanicheskogo povedeniya modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya raznogo vozrasta [Comprehensive assessment of the mechanical behavior of the modified structure of cement stone of various ages]. Regional'naya arkitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Engineering]. 2014. No. 3 (20). Pp. 29–36. (in Russia)
3. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Prochnost' i parametry razrusheniya tsementnykh kompozitov [The strength and fracture parameters of cement composites]. Saransk, Publishing house Mordovian State University, 2015. 360 p. (in Russia)
4. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Metod akusticheskoy emissii v stroitel'nom materialovedenii [Acoustic emission method in construction materials]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2007. No. 3. Pp. 26–29. (in Russia)
5. Bilbi B. Razrushenie [Destruction]. Mekhanika razrusheniya. Razrushenie konstruktsiy [Fracture Mechanics. Destruction of designs]. Transl. from English. Moscow, Mir, 1980. Pp. 203–227. (in Russia)
6. Broek D. Osnovy mekhaniki razrusheniya [Basics of fracture mechanics]. Transl. from English. Moscow, Vysshaya shkola, 1980. 368 p. (in Russia)
7. Evans A.G., Langdon T.G. Konstruktionsnaya keramika [Structural ceramics]. Transl. from English. Ed. by DSc. Moscow, Metallurgiya, 1980. 256 p. (in Russia)
8. Makridin N.I., Maksimova I.N., Ovsyukova Yu.V. Dolgovremennaya prochnost' modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya. Ch.1 [Long-term strength of the modified cement stone structure. P. 1]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2010. No. 10. Pp. 74–77. (in Russia)
9. Ratinov V.B., Rosenberg T.I. Dobavki v beton [Concrete admixtures]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 188 p. (in Russia)
10. Sychev M.M. Tverdenie vyazhushchikh veshchestv [Hardening binders]. Leningrad, Stroyizdat, 1974. 80 p. (in Russia)
11. Karpenko N.I., Zaytsev Yu.V., Okol'nikova G.E., Andrianov A.A. Eksperimental'noe opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv i parametrov mekhaniki razrusheniya ul'travysokoprochnykh betonov [Experimental determination of physical and mechanical properties and fracture mechanics parameters of concrete ultravysokoprochnykh]. Nauch. tr. RAASN. Fundamental'nye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy

- otrasli RF v 2011 g. [Proceedings RAASN. Basic research RAASN on scientific support of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2011]. Moscow; Orel, 2011. Pp. 242–248. (in Russia)
12. Makridin N.I., Maksimova I.N., Ovsyukova Yu.V. Dolgovremennaya prochnost' modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnua. Ch.2 [Long-term strength of the modified cement stone structure. P. 2]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2011. No. 7. Pp. 72–75. (in Russia)
-

УДК 691.54.002.3

А.Ф. КОСАЧ, И.Н. КУЗНЕЦОВА, Н.А. ГУТАРЕВА, Ю.В. БЕРЕЗКИНА

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ИЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ТОРФОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Рассмотрено применение растительно-минеральных композитов на основе модифицируемого ультрадисперсного торфа в бетонах. Исследован цементный камень с использованием инновационной нанодисперсной песчано-торфяной смеси в пропорции 60:40. Представлено совместное использование местных сырьевых ресурсов торфа и песка в технологии производства бетона. Большая сырьевая база торфа и песка в регионе позволяет применять это сырье в промышленности и при дальнейшей подготовке рассматривать их развитие и применение как одно из важнейших направлений в освоении новых прогрессивных строительных технологий для жилищного и промышленного комплексов в ХМАО-ЮГре.

**Ключевые слова:** торф, бетон, цементный камень, высокодисперсные частицы, наночастицы, наноматериалы, пористость, растительно-минеральные композиты, теплопроводность, механоактивация, структурообразование, физико-химические и механические свойства.

В последние два десятилетия появились новые виды бетонов – высококачественные, высокопрочные, малоусадочные, которые изготовлены по новым инновационным технологиям, затрагивающие более глубокие механизмы структурообразования, формирование структуры твердой фазы и порового пространства цементного камня. Применение инновационных технологий должно быть осознанным, целенаправленным и научно обоснованным.

Наноматериалы могут обладать совершенно иными физико-химическими свойствами, чем вещества в обычном физико-химическом состоянии, в связи с чем они относятся к новым видам материалов и продукции на их основе. Учет этих особенностей в теории и практике привел к появлению инновационных технологий цементобетонов. Необходимо различать две составные части: структурный каркас, образованный ультрадисперсными частицами, негидратированным цементом, и межзерновая пустотность.

В последнее время особое внимание ученых направлено на использование органики как достаточно дешевого сырья для производства различных строительных материалов. Оптимальным сырьевым ресурсом для производства композитов с использованием растительных заполнителей в Ханты-Мансийском автономном округе является торф.

Эффективность применения материалов на основе растительно-минеральной композиции и практически неограниченная сырьевая база (свыше 312 млрд м<sup>3</sup>) дают право рассматривать развитие их производства как одно из важнейших направлений в освоении новых прогрессивных строительных материалов в ХМАО-ЮГре.

В торфе содержатся частицы различных форм и размеров, поэтому торф является полидисперсной системой. С физико-химической точки зрения

торф можно отнести к классу сложных многокомпонентных полидисперсных полукулоидных высокомолекулярных систем [1, 2].

При производстве строительных материалов торф может выступать в качестве основного и вспомогательного сырья. При химической переработке органического вещества торфа можно получить соединения, которые улучшают гидрофобные свойства цемента и материалов на его основе. Использование торфа как торфяного заполнителя (торфяной лигнин) в бетоне способствует улучшению его теплофизических свойств. Основные свойства торфа: низкая теплопроводность, антисептическость, биостойкость, низкая плотность.

В торфе выделяют шесть основных групп соединений. Определение данных групп проводилось по общепринятой методике Инсторфа [3], результаты представлены в табл. 1. Различия основных групп соединений в торфе связаны с их разновидностью и степенью разложения. Не все группы торфа положительно влияют на свойства строительных материалов, например, лигнин и углеводы оказывают негативное воздействие на прочность и долговечность цементного камня.

Таблица 1. Диапазон среднего содержания групповых составляющих торфа

Тип торфа	Б, % на daf	ГК, % на daf	НГО, % на daf	ВРВ+ЛГВ, % на daf	ФК, % на daf	Ц, % на daf
Верховой	3,7–8,2	9,0–28,9	8,0–12,4	30,3–53,6	14,7–19,7	2,8–9,0
Переходной	3,4–5,0	25,2–34,1	10,0–12,9	33,2–38,2	11,1–18,6	2,0–3,5
Низинный	2,2–4,2	30,0–43,9	11,9–18,2	26,0–33,5	10,6–13,0	1,7–2,3

Примечание. Групповые составляющие торфа: битумы, гуминовые кислоты, негидролизуемые остатки, водорастворимые + легко гидролизуемые вещества, фульвокислота, целлюлоза.

В Ханты-Мансийском автономном округе имеются благоприятные условия для разработки технологии производства из торфа и минерального сырья новых типов строительных материалов для различных видов строительства с заданными свойствами, необходимыми для эксплуатации в суровых климатических условиях.

В строительстве применяют различные типы помольных установок, принцип работы которых заключается в получении высокодисперсных материалов. При сухой технологии происходит механическая активация, в жидких системах она дополняется эффектом гидродинамической и акустической кавитации.

В данной работе активация песчано-торфяной смеси осуществлялась по сухой технологии в мельнице непрерывного действия роторного типа («Выюга-3») (рис. 1), что позволило получать 2–3 % ультрадисперсного материала с размером  $10^2$ – $10^3$  нм от общего объема активированного материала.

В лаборатории «Новые технологии и автоматизация промышленности строительных материалов ИНТА-СТРОЙ» (г. Омск) были изготовлены и испытаны образцы с использованием активированной песчано-торфяной смеси по сухому способу согласно структурной схеме рис. 2.

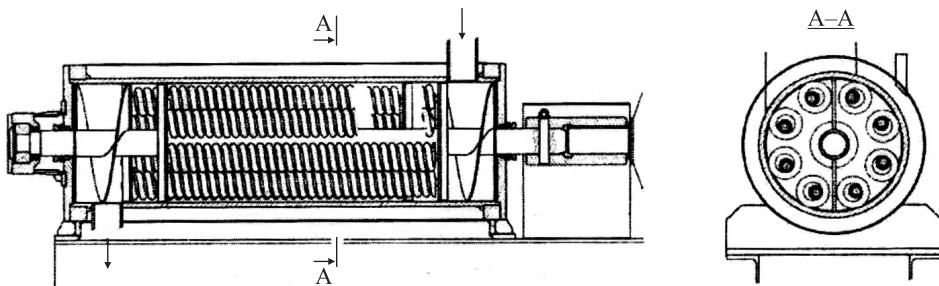


Рис. 1. Мельница непрерывного действия роторного типа «Выуга-3». Расположение мелющих тел

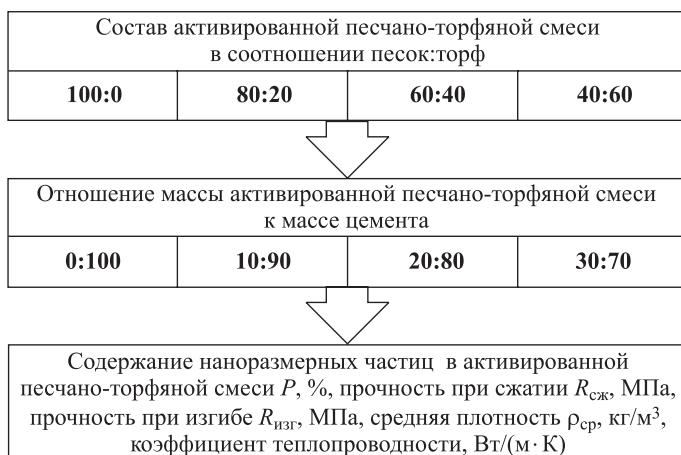


Рис. 2. Структурная схема исследований

В ходе эксперимента применялись следующие материалы:

1. Вяжущее вещество – портландцемент ПЦ400 Д20, насыпная плотность  $\rho_{нac} = 1230$  кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность  $\rho_{ист} = 3,02$  г/см<sup>3</sup>, нормальная густота 27 % производства Искитимского цементного завода (г. Новосибирск).

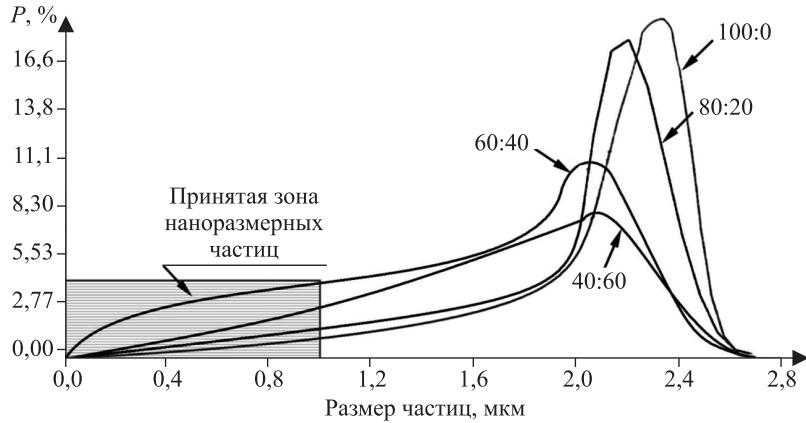
2. Песок гидронамывной с р. Иртыш Николаевского карьера г. Омска со следующими характеристиками: модуль крупности  $M_k = 1,9–2,1$ ; истинная плотность  $\rho_{ист} = 2,64$  г/см<sup>3</sup>; средняя плотность  $\rho_{ср} = 2,47$  г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность  $\rho_{нac} = 1450$  кг/м<sup>3</sup>.

3. Торф Пылинского месторождения ХМАО-Югра. Общая площадь 120 337 га, общие запасы 445 467 тыс. м<sup>3</sup>.

4. Вода водопроводная.

Для увеличения производительности и дисперсности помола торфа в качестве абразивного материала принимали песок, соотношение торфа к песку 100:0, 80:20, 60:40, 40:60. На основании полученных результатов по содержанию размеров ультрадисперсных частиц, определяемому с помощью лазерного анализатора «MicroSizer 201», принимаем соотношение торфа к песку 60:40 (рис. 3).

Образцы, приготовленные из цементно-песчаного раствора нормальной консистенции с соотношением вяжущего к песку 1:3 и размерами 4×4×16 см в количестве 36 шт. (6 замесов раствора по 6 образцов), были испытаны в соответствии с требованием ГОСТ 10180–2012. Прочность образцов на изгиб



*Рис. 3. Содержание наноразмерных частиц активированной песчано-торфяной смеси*

$R_{изг}$  определялась на установке МИИ-100, прочность на сжатие  $R_{сж}$  – на прессе МС-1000. При обработке наименьшее и наибольшее значения не учитывались. Значения считались недействительными, если разброс между ними был более 15 %. Результаты испытания цементно-песчаного раствора представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты испытания цементно-песчаного раствора**

Показатель	Номер образца (замеса раствора)	Содержание активированной песчано-торфяной массы к массе цемента							
		0:100		10:90		20:80		30:70	
		$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$
Прочность, МПа	1	14,1	40,7	17,2	43,9	14,3	41,0	13,7	39,0
			40,9		43,8		41,5		39,5
	2	14,4	41,2	17,0	43,9	14,1	40,1	13,5	39,0
			39,8		43,5		40,0		39,4
	3	14,3	42,0	17,5	43,8	14,0	38,5	13,5	40,1
			41,7		44,2		38,3		38,8
	4	14,3	41,5	17,6	43,9	14,3	39,9	13,2	37,8
			41,5		44,2		39,4		38,2
5	14,5	41,1	17,1	44,3	14,2	39,7	13,4	38,3	38,8
			41,5	44,0	40,0				
6	14,0	41,9	17,4	44,9	14,5	39,3	13,1	38,2	37,9
			41,8	44,5	39,0				
$R_{cp}$		14,3	41,3	17,3	44,1	14,2	39,7	13,4	38,8

Теплопроводность образцов определяли методом стационарного теплового потока прибором ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076–99. Значения коэффициента теплопроводности определялись на образцах размерами  $100 \times 100 \times 15$  мм, отформованными из цементного теста, где соотношения активированной песчано-торфяной смеси к массе цемента принимались согласно структурной схеме исследования (см. рис. 2). Результаты теплопроводности образцов представлены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-механические показатели цементного камня

Показатель	Отношение активированной песчано-торфяной массы (40:60) к массе цемента			
	0:100	10:90	20:80	30:70
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{cp}$ , Вт/(м · К)	0,399	0,365	0,346	0,319
Прочность при сжатии $R_{ck}^{cp}$ , МПа	57,4	58,1	56,8	47,5
Расчетная пористость $\Pi_{pac}$ , %	4,91	5,04	5,17	5,19
Истинная плотность $\rho_{ист}$ , г/см <sup>3</sup>	2,52	2,31	2,25	2,17
Плотность $\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	2398	2387	2363	2345

Расчетным путем теплопроводность цементно-песчано-торфяных образцов определена по формуле, предложенной авторами для цементного камня без добавок и наполнителей в зависимости от их средней плотности [4]:

$$\lambda = 0,274 \cdot \rho_{cp} - 0,163,$$

где  $\rho_{cp}$  – средняя плотность цементного камня, т/м<sup>3</sup>.

В результате расчеты показали, что при соотношении активированной песчано-торфяной массы к массе цемента 0:100, 20:80, 40:60 и 60:40 со средней плотностью  $\rho_{cp} = 2401 \div 2355$  кг/м<sup>3</sup> теплопроводность составляет  $\lambda = 0,495 \div 0,482$  Вт/(м · К). В данном параметре не учтен модифицированный высокодисперсный торф. По данным авторов других научных работ, теплопроводность цементного камня составляет  $\lambda = 0,4 \div 0,47$  Вт/(м · К). Исследуемые цементно-песчано-торфяные образцы показали меньшую теплопроводность  $\lambda_{cp} = 0,399 \div 0,361$  Вт/(м · К) при  $\rho_{cp} = 2398 \div 2345$  кг/м<sup>3</sup>. Физико-технические характеристики контрольного образца цементного камня без модифицированного высокодисперсного торфа: плотность  $\rho_{cp} = 2398$  кг/м<sup>3</sup>; прочность при сжатии  $R_{ck}^{cp} = 57,4$  МПа; коэффициент теплопроводности  $\lambda_{cp} = 0,399$  Вт/(м · К).

Экспериментально пористость образцов определена методом ртутной порометрии на анализаторе пористости «Porosimeter 2000». Данный прибор позволил исследовать широкий интервал размеров пор. Результаты расчета и испытаний пористости образцов представлены в табл. 4.

Эффективность применения материалов на основе растительно-минеральной композиции и практически неограниченная сырьевая база (свыше 312 млрд м<sup>3</sup>) для жилищного и промышленного строительства может способствовать привлечению значительных инвестиций в регион ХМАО-ЮГра.

Таблица 4. Данные ртутной порометрии цементного камня

П/п	Отношение активированной песчано-торфяной массы (40:60) к массе цемента	По данным ртутной порометрии			
		суммарный объем пор $V_{сум}$ , см <sup>3</sup> /г	объем мезопор $V_{мес}$ , см <sup>3</sup> /г	объем макропор $V_{макр}$ , см <sup>3</sup> /г	средний радиус пор $r_{cp}$ , нм
1	0:100	0,046	0,003	0,043	70,5
2	10:90	0,048	0,004	0,044	69,1
3	20:80	0,049	0,004	0,045	68,7
4	30:70	0,053	0,005	0,048	68,3

На основании полученных результатов по степени помола и процентному содержанию наноразмерных частиц (до  $10^3$  мн) в песчано-торфяной смеси рекомендуется оптимальное соотношение песчано-торфяной смеси 40:60 (см. табл. 4), так как содержание размеров частиц менее  $10^3$  нм больше, чем в других песчано-торфяных смесях, в 2 раза и более.

Прочность образцов цементного камня с песчано-торфяной смесью (40:60) в количестве 20 % от общей массы цемента по сравнению с прочностью контрольных образцов уменьшилась на 1 %, что является незначительным.

Коэффициент теплопроводности данных образцов цементного камня с песчано-торфяной смесью снизился на 16 %.

Полученные результаты исследований образцов цементного камня с принятым соотношением модифицированной, ультрадисперсной песчано-торфяной смеси 40:60 в количестве 20 % от общей массы цемента позволяют снизить среднюю плотность до 15 %, а содержание расчетной пористости и микропористости – на 2–3 %.

Эффективность применения модифицированной, ультрадисперсной песчано-торфяной смеси в цементном камне позволит экономить цемент до 20 %, без изменения прочностных характеристик бетона и улучшать теплофизические характеристики цементного камня до 16 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова И.Н., Ращупкина М.А., Жуков С.В. Технология пенобетона на основе торфа // Вестн. СибАДИ. 2014. № 4 (38). С. 72–77.
2. Косач А.Ф., Кузнецова И.Н., Демодов А.Б., Березкина Ю.В. Свойство бетона на основе модифицируемого высокодисперсного торфа // Вестн. СибАДИ. 2015. № 1 (41). С. 61–67.
3. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Черткова Е.Ю. Гидрофобизация минеральных дисперсных материалов добавками на основе торфа // Тр. Инсторфа. 2010. № (2) 55. С. 15–33.
4. Кузнецова И.Н., Косач А.Ф., Ращупкина М.А., Гутарева Н.А. Влияние основных минералов цементного камня на его структуру и свойства // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8 (680). С. 25–33.

**Косач Анатолий Федорович**, д-р техн. наук, проф.  
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

**Кузнецова Ирина Николаевна**, канд. техн. наук, доц.  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск  
**Гутарева Наталья Анатольевна**, асп.  
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск  
**Березкина Юлия Викторовна**, канд. техн. наук, доц.  
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Получено после доработки 13.04.16

**Kosach Anatoliy Fedorovich**, DSc, Professor  
Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia  
**Kuznetsova Irina Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor  
Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk, Russia  
**Gutareva Natal'ya Anatol'evna**, Post-graduate Student

Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia  
**Berezkina Yuliya Viktorovna**, PhD, Ass. Professor  
Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

## **THE MAIN PROPERTIES CEMENT STONE FROM HIGHLY DISPERSE PEATMINERAL RAW MATERIALS**

In article application of vegetable and mineral composites on the basis of the modified ultradisperse peat in concrete is considered. The cement stone with use of innovative nanodisperse sand-peat mix in a proportion 60:40 is investigated. Sharing of local raw material resources of peat and sand is presented in the production technology of concrete. The big source of raw materials of peat and sand in the region allows to apply these raw materials in the industry and by due preparation to consider their development and application as one of the major directions in development of new progressive construction technologies for housing and industrial complexes in HMAO-Ugra.

**K e y w o r d s:** peat, concrete, cement stone, high-disperse particles, nanoparticles, nanomaterials, porosity, vegetable and mineral composites, thermal conductivity, mechanoactivation, structurization, physical and chemical and mechanical properties.

### **REFERENCES**

1. Kuznetsova I.N., Rashchupkina M.A., Zhukov S.V. Tekhnologiya penobetona na osnove torfa [Technology of foamed concrete on the basis of peat]. Vestnik SIBADI [Bulletin of SibADI]. 2014. No. 4 (38). Pp. 72–77. (in Russia)
2. Kosach A.F., Kuznetsova I.N., Demodov A.B., Berezkina Yu.V. Svoystvo betona na osnove modifitsiruemogo vysokodispersnogo torfa [Manufacture of concrete on the basis of modified finely dispersed peat]. Vestnik SIBADI [Bulletin of SibADI]. 2015. No. 1 (41). Pp. 61–67. (in Russia)
3. Misnikov O.S., Timofeev A.E., Chertkova E.Yu. Gidrofobizatsiya mineral'nykh dispersnykh materialov dobavkami na osnove torfa [Gidrofobization of mineral disperse materials additives on the basis of peat]. Trudy INSTORFA [Works INSTORFA]. 2010. No. (2) 55. P. 15–33. (in Russia)
4. Kuznetsova I.N., Kosach A.F., Rashchupkina M.A., Gutareva N.A. Vliyanie osnovnykh mineralov tsementnogo kamnya na ego strukturu i svoystva [Influence of the main minerals of a cement stone on its structure and properties]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Education Institutions. Construction]. 2015. No. 8 (680). Pp. 25–33. (in Russia)

УДК 691:699.86.002.3

**В.З. АБДРАХИМОВ, Е.С. АБДРАХИМОВА**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ  
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ  
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ<sup>\*</sup>**

Получены керамические теплоизоляционные материалы на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения традиционных природных материалов.

Исследуемые отходы имеют повышенную теплотворную способность, поэтому их целесообразно использовать в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить использование в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и др. Выгорающие добавки не только повышают пористость керамических изделий, но также способствуют равномерному спеканию керамического черепка. Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

**Ключевые слова:** отходы топливно-энергетического комплекса, теплоизоляционные материалы, выгорающие добавки, утилизация отходов, химический состав, физико-механические показатели.

**Введение.** К отходам топливно-энергетической промышленности относятся продукты, получаемые в виде отходов при добыче, обогащении и сжигании твердого топлива [1]. Этую группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому составу, химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости и т.д.

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

**Цель работы:** получение керамических теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природных традиционных материалов.

**Сырьевые материалы.** В настоящей работе были исследованы 10 различных видов отходов топливно-энергетического комплекса, используемых в качестве отощителей и выгорающих добавок.

---

\* Работа выполнена по гранту на тему «Физико-химические процессы и процессы горения при синтезе керамических композиционных теплоизоляционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса» в рамках «Фундаментальные научные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства».

Химический состав является важнейшей характеристикой сырьевых материалов и в значительной мере определяет их пригодность для производства изделий различных видов.

В табл. 1, 2 представлены химические составы (оксидный и поэлементный) исследуемых отходов топливно-энергетического комплекса. Поэлементный анализ

**Таблица 1. Оксидный химический состав компонентов**

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	48–49	16–17	7–8	3–4	2–3	0,1–0,3	20–21
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	35–37	10–11	7,5–10	20–23	2–2,5	2–3	14–19
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	53–54	18–19	6–7	1–2	0,3–0,7	4–5	16–17
Шламы флотационного углеобогащения ЦОФ «Обуховская»	35–36	14–15	5–6	1–2	1–1,5	1–1,5	33–34
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	54–55	16–175	3–4	5–6	1,5–2	3–4	13–14
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	43–44	17–18,5	5–6	3–4	2–3	2–3	19–20
Горелые породы	39–40	12–13	7–8	19–19,5	2–3,5	0,5–1	14–16
Нефтяной шлам Самарской обл.	21–22	8–10	8–10	24–27	1–2	1–2	30–32
Буровой шлам Оренбургской обл.	26–28	4–5	5–6	28–30	1–2	0,5–1	33–35

**Таблица 2. Поэлементный анализ компонентов**

Компонент	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
Буровой шлам Оренбургской обл.	17,08	37,92	0,94	0,83	6,18	10,38	1,87	0,92	19,08	4,08
Нефтяной шлам Самарской обл.	16,02	41,93	0,83	0,87	5,14	5,49	2,10	0,89	22,58	4,15
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	8,88	53,19	—	—	11,64+0,29	19,02	0,28	2,39	0,35	3,96
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	8,84	55,19	—	—	9,64+0,29	19,03	0,28	2,39	0,38	3,88
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	8,80	57,17	1,78	1,05	11,34+0,19	16,03	0,11	—	0,53	3,87
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	7,44	47,38	0,81	0,93	5,65	16,9	1,58	1,53	12,2	5,58
Горелые породы	7,32	53,94	0,37	0,61	9,65	15,15	2,87	0,76	8,46	1,17
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	6,4	51,08	1,09	0,40	10,5+1,44	18,44	1,1	1,5	3,03	4,02
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	6,2	52,92	0,44	0,2	11,58	19,5	0,1	1,71	4,5	2,85

ментный химический состав, проведенный с помощью электронного растрового сканирующего микроскопа Philips 525M, показывает наличие углерода в отходах энергетики. Фракционный состав компонентов представлен в табл. 3, а технологические показатели компонентов в табл. 4.

Гранулометрическим составом сырьевых материалов называется процентное содержание зерен (частиц) различной величины в сырье. Наиболее ценными для производства керамических материалов являются тонкие частицы с зерновым размером менее 0,005 мм.

Таблица 3. Фракционный состав компонентов

Компонент	Содержание фракций, %, размер частиц, мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,0001
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
Буровой шлам Оренбургской обл.	12,1	12,8	15,1	21,3	38,7
Нефтяной шлам Самарской обл.	13,5	14,3	14,8	20,1	37,4
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	35	27,1	6,7	12,8	18,4
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	37,8	24,2	7,1	13,2	17,7
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	52,1	9,8	8,5	12,8	16,8
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	16,84	33,41	32,49	12,68	4,58
Горелые породы	19,05	33,08	32,2	11,78	3,89
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	18,39	33,70	33,8	10,7	3,41
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	38,8	27,1	8,2	11,3	14,6

Таблица 4. Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплопроворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	1100	1260	1290	1320
Буровой шлам Оренбургской обл.	3500	1800	1240	1270
Нефтяной шлам Самарской обл.	3300	1850	1280	1290
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	2700	1220	1260	1300
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	2800	1250	1300	1350
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	2500	1260	1300	1320
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	2000	1300	1340	1380
Горелые породы	1900	1260	1290	1310
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	1800	1300	1350	1370
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	1800	1230	1270	1300

При уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе.

Из табл. 4 видно, что исследуемые отходы топливно-энергетического комплекса имеют повышенную теплотворную способность, поэтому их целесообразно использовать в качестве выгорающих добавок. К этой группе относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и др. Их вводят в состав шихты до 3 % по объему, т. е. до 60–80 % от общей потребности топлива на обжиг изделий. Назначение их – интенсифицировать процесс обжига, улучшить спекаемость массы и тем самым повысить прочность изделий.

Около 66 % зол, образующихся при сжигании тощих углей, имеют повышенное содержание несгоревших остатков [2, 3]. Суммарное содержание подобных остатков может удовлетворить потребность в топливе всей керамической промышленности по производству кирпича, а минеральная часть золы – заменить до трети потребности в глиняном сырье.

1. Межсланцевая глина (Самарская обл.) образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах)<sup>1</sup> и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевая глина относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 23–28) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюды, монтмориллонита и кальцита. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюды.

2. Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС использовался в керамических материалах в качестве отощителя и выгорающих добавок<sup>2</sup>.

Минералогический состав золошлакового материала представлен следующими минералами, мас. %: аморфизованное глинистое вещество – 10–20; органика – 20–25; стекловатые шарики – 45–65; кварц, полевой шпат – 5–15; кальцит – 3–5; гидрогранаты, муллит, оксиды железа – 5–10, примеси – 3–7. Имея повышенное содержание органики, золошлаковый материал может использоваться в производстве керамических материалов и в качестве выгорающей добавки.

3. Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев (Самарская обл.), как и золошлаковый материал, использовалась в керамических материалах в качестве отощителя и выгорающих добавок<sup>3</sup>.

4. В настоящей работе для получения керамических материалов использовались в качестве отощителя и выгорающих добавок отходы

<sup>1</sup> Пат. 2483042 Российская Федерация, МПК C04B 33/135. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / А.В. Колпаков, В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 14.12.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.

<sup>2</sup> Пат. 2508269 Российская Федерация, МПК C04B 33/135. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / Е.С. Абдрахимова, И.Ю. Рощупкина, А.В. Колпаков, В.З. Абдрахимов; заявл. 11.01.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

<sup>3</sup> Пат. 2555170 Российская Федерация, МПК C04B 33/132. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 28.03.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.

флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская» (Кузнецкий бассейн, Кузбасс)<sup>4</sup>.

Отходы флотации углеобогащения представляют собой глинисто-угольные суспензии. Петрографический анализ показал, что состав твердой фазы отходов флотации колеблется в зависимости от месторождения в следующих пределах, мас. %: органическая часть угля 6–24; пирит 4,4–9,4; карбонат 4,0–8,2; глинистое вещество 58–80 и кварц 4–7.

5. Угольные шламы ЦОФ «Обуховская» (Ростовская область) являются малосернистыми по сравнению с другими отходами энергетики. Содержание угольной составляющей может достигать 40 %, а минеральная часть представлена в основном гидрослюдой, кварцем, полевыми шпатами и слюдой. Органическая часть шламов флотационного углеобогащения представлена в большей степени антрацитом, за счет чего в них мало летучих компонентов и поэтому они трудно воспламеняются и горят коротким пламенем (температура обжига керамических изделий должна быть не менее 1050 °C)<sup>4</sup>.

6. Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская» (г. Новокузнецк) представлены сланцами аргиллито-алевролитового состава с прослойками песчаников. Химические составы (оксидный и элементный) отходов углеобогащения представлены в табл. 1, 2, фракционный состав в табл. 3, а технологические свойства в табл. 4.

7. Отходы углеобогащения «Коркинского разреза» (Челябинская обл.), которые сложены аргиллитами, алевролитами, углистыми аргиллитами и сланцами, целесообразно использовать в качестве отощителей и выгорающих добавок<sup>5</sup>.

8. Горелые породы образуются в местах добычи сланцев. Сланец, который не удалось в процессе добычи отделить от пустой породы, направляется в отвал. В терриконах при совместном хранении пустых пород и сланцев за счет повышенного количества в смешанных отвальных массах органических соединений происходит самовозгорание, которое приводит к образованию большого количества отходов – горелых пород<sup>5</sup>. Горелые породы представляют собой продукт низкотемпературного обжига при самовозгорании породы (смесь глины и сланцев) в терриконах в окислительной среде. Количество горелых пород в терриконах составляет от 75 до 90 % от объема отвала. По основным физическим и химическим свойствам они близки к глинам, обожженным при 800–1000 °C.

Самарская область является регионом развитой нефтеперерабатывающей промышленности. Несмотря на то что технологии нефтедобычи и нефтепереработки постоянно совершенствуются, они пока не достигли уровня безотходного производства<sup>6</sup>.

Буровой шлам – водная суспензия, твердая часть которой состоит из продуктов разрушения горных пород забоя и стенок скважины, продуктов

<sup>4</sup> Пат. 2481286. С1 С04В 14/24. Композиция для производства водостойкого пористого заполнителя / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, Е.С. Абдрахимова, Е.В. Вдовина; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13.

<sup>5</sup> Пат. 2550168. С1 С04В 33/132. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 25.02.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13.

<sup>6</sup> Пат. 2493119. С2 С04В 14/12. Керамическая композиция для производства пористого заполнителя / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 22.03.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.

истирания бурового снаряда и обсадных труб, глинистых минералов (при промывке глинистым раствором).

Буровые отходы условно можно разделить на амбарную жидкость и буровой шлам. Хранение выбуренных отходов на кустовых площадках производится в шламовых амбарах. Буровой шлам состоит из выбуренных пород, в основном глины, песка, других пород, встречающихся в конкретной местности, и затвердевших составляющих амбарной жидкости, образуя «дно» шламового амбара. В амбарной жидкости содержатся нефтепродукты, буровые растворы и вода, привнесенная атмосферными осадками и другими источниками.

**Результаты исследования.** Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 18–22 %, из которой формовали кирпичи размером 250×120×65 мм. Высушенные кирпичи до остаточной влажности не более 5 % обжигались при температуре 1000–1050 °C (конечная температура обжига). В табл. 5 приведены составы керамических масс, а в табл. 6 – физико-механические и химические свойства теплоизоляционных материалов.

Таблица 5. Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Межсланцевая глина	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Буровой шлам Оренбургской обл.	30	–	–	–	–	–	–	–	–
Нефтяной шлам Самарской обл.	–	30	–	–	–	–	–	–	–
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	–	–	30	–	–	–	–	–	–
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	–	–	–	30	–	–	–	–	–
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	–	–	–	–	30	–	–	–	–
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	–	–	–	–	–	30	–	–	–
Горелые породы	–	–	–	–	–	–	30	–	–
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	–	–	–	–	–	–	–	30	–
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	–	–	–	–	–	–	–	–	30

При содержании органики 20–30 % положительный эффект достигается добавкой в шихту не более 25–30 % отходов топливно-энергетического комплекса. В этих случаях отходы энергетики способны заменить вводимый в шихту уголь, создавать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в сырьевых материалах оксидов железа (более 3–5 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) перевести их в закисные соединения и интенсифицировать процесс обжига [4].

Строительный легковесный (теплоизоляционный) кирпич подразделяют в зависимости от плотности на три класса: А – от 700 до 1000 кг/м<sup>3</sup>; Б – от 1000 до 1300 кг/м<sup>3</sup>; В – от 1300 до 1450 кг/м<sup>3</sup>. Все теплоизоляционные материалы относятся к классу Б (см. табл. 6).

Выгорающие добавки: шламы флотации углеобогащения, отходы углеобогатительных фабрик, золошлаки, отходы горючих сланцев, нефтяной

Таблица 6. Физико-механические показатели теплоизоляционных материалов

Показатели	Составы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предел прочности при сжатии, МПа	10,4	11,2	11,8	12,4	12,6	12,8	12,7	13,4	13,2
Предел прочности при изгибе, МПа	2,3	2,5	2,7	2,8	2,9	2,9	2,8	3,2	3,1
Морозостойкость, циклы	25	26	28	29	31	32	32	35	34
Усадка, %	7,2	7,3	7,3	7,4	7,5	6,3	6,5	7,5	7,3
Термостойкость, теплосмены	3	3	2	3	2	2	2	2	2
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	1080	1120	1140	1130	1180	1200	1210	1240	1250
Теплопроводность, Вт/(м · °C)	0,16	0,17	0,19	0,18	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23

шлам не только повышают пористость керамических изделий, но также способствуют равномерному спеканию керамического черепка. При выгорании органической добавки выделяется небольшое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частички, а в итоге повышается прочность всего изделия.

Одной из актуальных задач промышленности стенной керамики в настоящее время является производство изделий для несущих и ограждающих конструкций с теплопроводностью не более 20 Вт/(м · °C). Производство и потребление таких теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в странах Европы и Северной Америке, несмотря на то что там во многих странах климат мягче.

Как видно из табл. 6, такую теплопроводность имеют составы 1–5. Теплопроводность для образцов из исследованных составов (1–9) определялась по специальной методике, подробно изложенной в СП 23-101–2004<sup>7</sup>.

Определение коэффициента теплопроводности девяти образцов (из различных составов, см. табл. 5) проводилось с использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»<sup>8</sup>.

Снижение плотности и теплопроводности только за счет пустотности изделий неэффективно. На практике существенное повышение вертикальной пустотности очень часто не дает значительного теплотехнического эффекта и вызывает определенные трудности при возведении стен, так как раствор затекает в пустоты, при этом снижается прочность и возникают трудности при формировании наружного шва. Снижение прочности теплоизоляционного материала является следствием расклинивающего действия раствора, затекающего в пустоты и вызывающего растягивающие напряжения в изделиях.

**Выводы.** Получены керамические теплоизоляционные материалы на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья.

Исследуемые отходы имеют повышенную теплотворную способность, поэтому их целесообразно использовать не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить использование в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и др.

<sup>7</sup> СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты здания. М.: Госстрой России. 2004. 140 с.

<sup>8</sup> Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250». Руководство по эксплуатации. Челябинск: ООО «СКБ Стройприбор». 2008. 29 с.

Выгорающие добавки повышают пористость керамических изделий, а также способствуют равномерному спеканию керамического черепка. При выгорании органической добавки выделяется небольшое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частички, а в итоге повышается прочность всего изделия.

Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве теплоизоляционных материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Abdrahimov V.Z. Use of aluminum-containing waste in production of ceramic materials for various purposes // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54. No. 5. Pp. 2–6.
2. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Ралко А.В. Золокерамические стеновые материалы. Алма-Ата: Наука, 1982. 292 с.
3. Абдрахимов В.З., Никулина Е.Ю., Абдрахимова Е.С. Инновационные направления по использованию отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 9. С. 31–43.
4. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Исследование регрессивным методом зависимости отходов топливно-энергетической промышленности на сушильные свойства стеновой керамики // Экология пром. про-ва. 2015. № 1. С. 6–10.

**Абдрахимов Владимир Закирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный экономический университет

**Абдрахимова Елена Сергеевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Получено после доработки 13.04.16

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, DSc, Professor; E-mail: 3375892@mail.ru  
Samara State University of Economics, Russia

**Abdrakhimova Elena Sergeevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: 3375892@mail.ru  
Samara Aerospace University, Russia

#### **INNOVATIVE TRENDS ON THE USE OF WASTE FUEL AND ENERGY COMPLEX IN THE MANUFACTURE OF INSULATING MATERIALS**

The obtained ceramic heat-insulating materials based on waste of fuel and energy complex without the use of traditional natural materials. The studied wastes have high calorific value, therefore it is advisable to use as a burnable additives, to prevent the use in the compositions of ceramic masses of anthracite, coke breeze, etc. Burnable additives not only increase the porosity of ceramic products, but also contribute to the uniform sintering of the ceramic crock. The use of waste fuel and energy complex in the production of ceramic materials promotes recycling of industrial waste, environment protection and expansion of raw base for construction materials.

**К e y w o r d s:** waste fuel and energy complex, heat insulation materials, burning out additive, waste disposal, chemical composition, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. A b d r a k h i m o v V.Z. Use of aluminum-containing waste in production of ceramic materials for various purposes. Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54. No. 5. Pp. 2–6.
  2. S a y b u l a t o v S.Zh., S u l e y m e n o v S.T., R a l k o A.V. Zolokeramicheskie stenovye materialy [Cindery ceramic wall materials]. Alma-Ata, Nauka, 1982. 292 p. (in Russia)
  3. A b d r a k h i m o v V.Z., N i k u l i n a E.Yu., A b d r a k h i m o v a E.S. Innovatsionnye napravleniya po ispol'zovaniyu otkhodov toplivno-energeticheskogo kompleksa v proizvodstve keramicheskikh materialov [The innovative directions on use of fuel and energy complex in production of ceramic materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 9. Pp. 31–43. (in Russia)
  4. K a y r a k b a e v A.K., A b d r a k h i m o v V.Z., A b d r a k h i m o v a E.S. Issledovanie regressivnym metodom zavisimosti otkhodov toplivno-energeticheskoy promyshlennosti na sushil'nye svoystva stenovoy keramiki [Investigation of the regressive method according to waste the energy industry on the drying properties of wall ceramics]. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. 2015. No. 1. Pp. 6–10. (in Russia)
-

УДК 691.56 : 699.86

В.И. ЛОГАНИНА, М.В. ФРОЛОВ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ШТУКАТУРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОСФЕР ДЛЯ ОТДЕЛКИ ГАЗОБЕТОННОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Сравнивается эффективность использования в качестве наполнителей в составе теплоизоляционной известковой сухой строительной смеси четырех высокопористых материалов: стеклянных полых микросфер, зольных микросфер алюмосиликатных, вспученного вермикулитового песка, вспученного перлитового песка. Изучены структуры порового пространства, определены коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости покрытий, наполненных различными наполнителями. Выполнена оценка влияния наружного теплоизоляционного штукатурного слоя на изменение влажностного режима газобетонной ограждающей конструкции. Подтверждена эффективность применения полых стеклянных микросфер в качестве наполнителя в теплоизоляционных штукатурных растворах.

**Ключевые слова:** сухие строительные смеси, стеклянные полые микросфера, силикаты кальция, теплопроводность, паропроницаемость, влажностный режим, газобетон.

В ходе эксплуатации стен из газобетонных блоков часто наблюдается отслоение фрагментов наружного штукатурного покрытия и появление сетки из мелких волосяных трещин. Причиной частичного разрушения отделочного покрытия является конденсация влаги на границе отделочное покрытие–газобетон. В течение периода эксплуатации все материалы в составе стены могут в разной степени увлажняться из-за диффузии водяного пара и влаги через ограждения, а также сорбции водяных паров и влаги в капельно-жидком состоянии. Степень увлажнения материалов зависит от климатической зоны влажности, в которой расположено здание, от влажностного режима помещения, а также от конструктивного исполнения ограждающей конструкции.

Для минимизации количества конденсирующейся влаги в толще стены каждый последующий слой в конструкции ограждения в направлении от внутренней поверхности к наружной должен обладать меньшим сопротивлением паропроницанию и большим сопротивлением теплопередаче по сравнению с предыдущим. Избытки влаги в стеновой газобетонной конструкции чаще всего возникают при использовании для наружной отделки газобетона штукатурных покрытий с высоким значением сопротивления паропроницанию и низким значением сопротивления теплопередаче [1, 2].

Предварительно проведенные нами исследования позволили рекомендовать использовать для наружной отделки газобетона сухую строительную смесь (ССС) следующего состава: известь-пушонка, белый цемент, модифицирующая добавка на основе смеси гидросиликатов и алюмосиликатов кальция, молотый газобетон, редиспергируемый порошок Vinnapas 8031Н,

пластифицирующая добавка Melflux 2651F, гидрофобизатор алеат натрия, легкий высокопористый наполнитель [3–5].

Значительного улучшения свойств теплоизоляционных отделочных покрытий можно добиться за счет выбора оптимального для данной ССС легкого наполнителя [6–8]. В работе исследуется теплопроводность и паропроницаемость четырех отделочных покрытий, наполненных различными высокопористыми наполнителями: полыми стеклянными микросферами (ПСМ), зольными микросферами алюмосиликатными (ЗМА), вспученным вермикулитовым песком (ВВП), вспученным перлитовым песком (ВПП). Свойства наполнителей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства легких наполнителей

Наименование материала	Внешний вид	Насыпная плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Размер частиц $d$ , мм	Теплопроводность* $\lambda$ , Вт/(м · К)
ПСМ	Белый порошок	140	0,01–0,1	0,070
ЗМА	Серый порошок	400	0,01–0,4	0,080
ВВП	Зернистый материал чешуйчатого строения	150	0,14–1,25	0,100
ВПП	Сыпучий зернистый материал	150	0,14–0,63	0,080

\* По данным заводов-производителей наполнителей.

Коэффициент теплопроводности отделочных покрытий  $\lambda$  в высушенном состоянии определяли на образцах размером 10×10×2,5 см с использованием прибора ИТП-МГ4 «100». Для нахождения значения эксплуатационной влажности исследуемых отделочных покрытий для условий эксплуатации А образцы помещались в эксикатор, в котором устанавливалась относительная влажность 80 %. Для нахождения значения эксплуатационной влажности исследуемых отделочных покрытий для условий эксплуатации Б образцы помещались в эксикатор, в котором устанавливалась относительная влажность 97 %. Образцы насыщали влагой до постоянной массы. Коэффициент теплопроводности отделочных покрытий для условий эксплуатации А и Б определялся по «ГОСТ Р 54855–2011. Материалы и изделия строительные. Определение расчетных значений теплофизических характеристик». Результаты исследований приведены в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют, что теплоизолирующая способность покрытий, полученных с использованием разрабатываемой ССС, включающей в состав микросферы, незначительно зависит от условий эксплуатации. Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · К), для условий эксплуатации А и Б у композитов, наполненных ПСМ, выросли по сравнению с коэффициентом теплопроводности тех же композитов в высушенном состоянии на 13,4 и 17,6 %, у композитов, наполненных ЗМА, выросли на 19,9 и 25,6 %. Теплоизолирующая способность двух других штукатурных покрытий в значимо большей степени зависит от условий эксплуатации. Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · К), для условий эксплуатации А и Б у композитов, наполненных ВПП, выросли по сравнению с коэффициентом теплопроводности тех же композитов в высушенном состоянии на 28,0 и 37,3 %, у композитов, наполненных ВВП, – на 33,6 и 43,2 %.

**Таблица 2. Коэффициент теплопроводности отделочных покрытий**

Наполнитель	Условия испытания образцов	Эксплуатационная влажность материала $\phi$ , %	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)
ПСМ	В сухом состоянии	0,0	0,119
	А	3,3	0,135
	Б	5,0	0,14
ЗМА	В сухом состоянии	0,0	0,176
	А	5,0	0,211
	Б	7,9	0,221
ВВП	В сухом состоянии	0,0	0,146
	А	9,4	0,195
	Б	14,3	0,209
ВПП	В сухом состоянии	0,0	0,161
	А	7,2	0,206
	Б	11,9	0,221

Эксплуатационная влажность материала в значительной степени зависит от структуры порового пространства материала. В табл. 3 приведены значения пористости покрытий в зависимости от вида наполнителя.

Преобладание закрытой пористости над открытой у композитов, наполненных ПСМ и ЗМА, является причиной незначительной зависимости теплоизолирующей способности этих покрытий от влажности окружающего воздуха. Высокая открытая пористость у композитов, наполненных ВВП и ВПП, вызвана высокой водопотребностью данных наполнителей. При высыхании таких покрытий влага удаляется, что приводит к возникновению пор, способных активно впитывать влагу из окружающего воздуха.

Коэффициент паропроницаемости отделочного состава  $\mu$  определялся по «ГОСТ 25898–2012. Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию». Коэффициент паропроницания композитов, наполненных ПСМ, составляет  $\mu = 0,157 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ , наполненных ЗМА,  $\mu = 0,164 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ , наполненных ВВП,  $\mu = 0,202 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ , наполненных ВПП,  $\mu = 0,186 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ . Более высокая паропроницаемость композитов, наполненных ВВП и ВПП, вызвана преобладанием в данных композитах открытой пористости над закрытой.

В работе оценивалось также влияние наружного теплоизоляционного штукатурного слоя на изменение влажностного режима газобетонной ограждающей конструкции на примере г. Пенза. Наружные климатические параметры были приняты по «СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99»: средняя температура отопительного периода  $t_{\text{от}} = -4,1^{\circ}\text{C}$ ; продолжительность отопительного

**Таблица 3. Структура порового пространства композитов**

Наполнитель	Пористость, %		
	общая	открытая	закрытая
ПСМ	76,9	26,9	50,0
ЗМА	66,4	31,8	34,6
ВВП	75,2	49,1	26,1
ВПП	66,9	42,9	24,0

периода  $z_{\text{от}} = 200$  сут; средняя температура наиболее холодного месяца  $t_{x.m} = -9,8^{\circ}\text{C}$ ; средняя влажность наиболее холодного месяца  $\varphi_{x.m} = 83\%$ . Расчетные параметры внутреннего воздуха приняты в соответствии с требованиями «СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» для жилых зданий: расчетная температура внутреннего воздуха  $t_b = 20,0^{\circ}\text{C}$ ; относительная влажность внутреннего воздуха  $\varphi_b = 55\%$ .

В работе сравнивается 5 вариантов ограждающих конструкций (рис. 1). Слой 1 и 2 у всех ограждающих конструкций идентичен, изменяется материал слоя 3. Конструктивное исполнение ограждающей конструкции представлено в табл. 4.

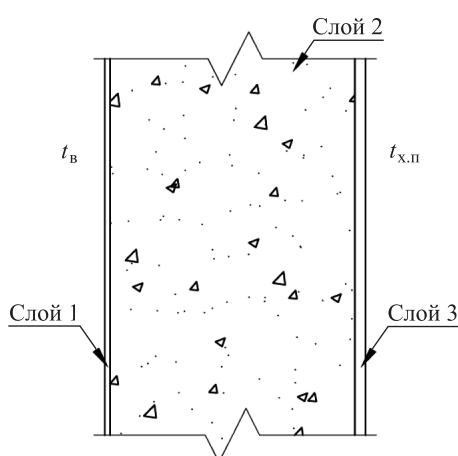


Рис. 1. Расчетная схема ограждающей конструкции

насыщенного водяного пара  $E_i$  определяется по профилю температуры  $t$  и описывается эмпирическими зависимостями:

$$E_i = 610,5 \exp\left(\frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t}\right), \quad t \geq 0^{\circ}\text{C}; \quad (1)$$

$$E_i = 610,5 \exp\left(\frac{21,875 \cdot t}{265,5 + t}\right), \quad t < 0^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

Таблица 4. Конструктивное исполнение ограждающей конструкции

Номер слоя	Материал	Толщина слоя $\delta$ , м	Средняя плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda_A$ , Вт/(м · К)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг/(м · ч · Па)
1	Цементно-шлаковая штукатурка	0,01	1200	0,470	0,140
2	Газобетон	0,45	400	0,14	0,230
3	А Цементно-шлаковая штукатурка	0,02	1200	0,470	0,140
	Б CCC, наполненная ПСМ		600	0,135	0,157
	В CCC, наполненная ЗМА		860	0,211	0,164
	Г CCC, наполненная ВВП		660	0,195	0,202
	Д CCC, наполненная ВПП		800	0,206	0,184

Зоной конденсации считается участок ограждающей конструкции, на котором выполняется условие конденсации влаги (3):

$$e_i > E_i. \quad (3)$$

Графические зависимости, показывающие распределение максимального и действительного значений парциальных давлений водяного пара по фрагменту толщины ограждающей конструкции в зоне возможной конденсации, приведены на рис. 2. Температура и влажность наружного воздуха приняты для наиболее холодного месяца – января.

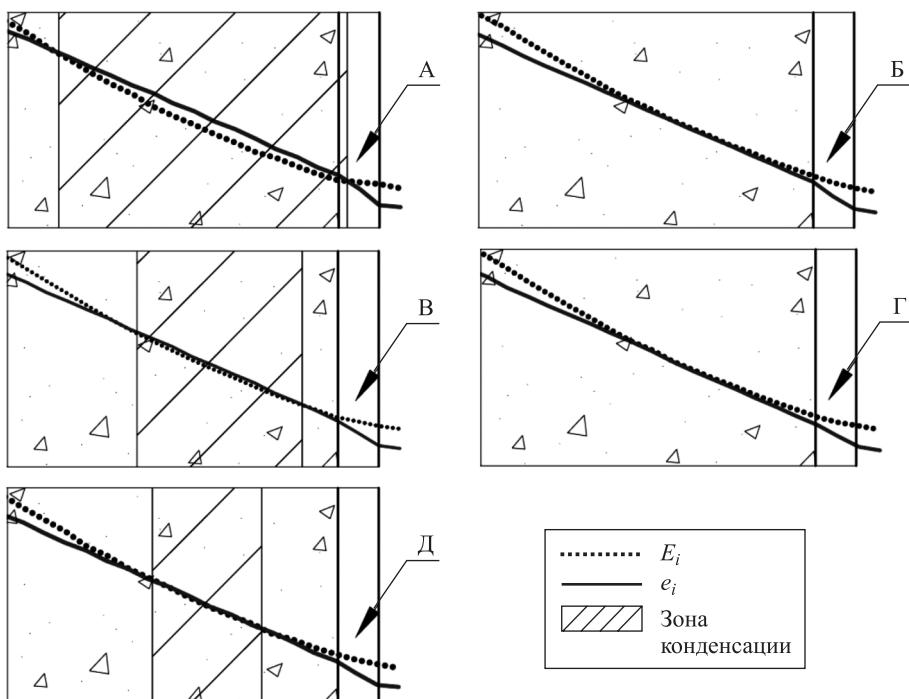


Рис. 2. Фрагменты профилей действительного и максимального парциального давлений для ограждающей конструкции

В литературе [9] для отделки стен из газобетона рекомендуется использовать ССС, позволяющие получить покрытия со средней плотностью до 1300–1600 кг/м<sup>3</sup>. При использовании теплоизоляционного газобетона марки D400 конденсат может возникнуть в стене, отделанной покрытиями со средней плотностью, не превышающей рекомендуемую. Использование в качестве отделки таких газобетонных блоков цементно-шлаковой штукатурки со средней плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup> приводит к образованию конденсата в слое газобетона в количестве  $G = 84,0$  мг/м<sup>2</sup> в час и в слое наружной штукатурки –  $G = 6,0$  мг/м<sup>2</sup> в час. Ширина зоны конденсации составляет 135 мм в слое газобетона и 5 мм в слое наружной штукатурки. Значительная по толщине зона конденсации влаги влияет на механизм массопереноса процессов обратной диффузии и обратного капиллярного переноса, затрудняя удаление влаги из стеновой конструкции [10]. При использовании в качестве отделки разрабатываемой ССС, наполненной ЗМА и ВПП, ширина зон конденсации составляет соответственно 95 и 55 мм, и они полностью расположены в слое

газобетона. Количество конденсата также значительно уменьшается – для штукатурок, наполненных ЗМА, оно составляет  $G = 29,7 \text{ мг}/\text{м}^2$  в час, для штукатурок, наполненных ВПП, –  $G = 11,0 \text{ мг}/\text{м}^2$  в час.

Покрытия, полученные с использованием ССС, наполненных ПСМ и ВВП, обладают наименьшей средней плотностью и при их использовании не создаются условия для образования конденсата. Композиты, наполненные ВВП, вследствие высокой открытой пористости и водопотребности обладают недостаточной водостойкостью (коэффициент размягчения составляет  $K_{разм} = 0,64$ ) и морозостойкостью. Это не позволяет рекомендовать применять ССС, наполненную ВВП, для наружной отделки газобетонных блоков.

Композиты, наполненные ПСМ, обладают достаточной водостойкостью  $K_{разм} = 0,82$  и прочностью при сжатии  $R_{сж} = 3,3 \text{ МПа}$ . Разрабатываемый состав обладает высокой водоудерживающей способностью более 98 % и хорошей удобоносимостью.

Приведенные в статье данные свидетельствуют о высокой эффективности применения ПСМ в качестве наполнителя в теплоизоляционных штукатурных растворах и позволяют рекомендовать разрабатываемую ССС для отделки газобетона.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле // Стр-во уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6. С. 19–33.
2. Ватин В.И., Горшков А.С., Глумов А.В. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // Инж.-строит. журн. 2011. № 1. С. 28–33.
3. Логанина В.И., Фролов М.В. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей // Вестн. гражд. инженеров. 2015. № 5. С. 144–147.
4. Логанина В.И., Кислицына С.Н., Фролов М.В. Известковое композиционное вяжущее с применением добавки на основе алюмосиликатного наполнителя // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 70–73.
5. Логанина В.И., Фролов М.В., Рябо М.А. Теплоизоляционные известковые сухие строительные смеси для отделки стен из газобетона // Вестн. МГСУ. 2016. № 5. С. 82–92.
6. Пашкевич А.А. Эффективные цементные штукатурные растворы с полимерами стеклянными микросферами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. М., 2009. 141 с.
7. Семенов В.С., Розовская Т.А. Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций с применением облегченных кладочных растворов // Стройт. материалы. 2015. № 6. С. 16–19.
8. Трофимов Б.Я., Ахтямов Р.Я., Ахмедъянов Р.М. Теплоизоляционные штукатурные растворы с вермикулитовым заполнителем // Цемент и его применение. 2002. № 6. С. 16–19.
9. Руководство по наружной отделке стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения. 1-я ред. Белгород: Нац. ассоц. производителей автоклавного газобетона, 2010. 3 с.

10. Гоманн М. Поробетон: руководство / пер. с нем. под ред. А.С. Коломацкого. Белгород: Изд-во «ЛитКараВан», 2010. 272 с.

**Логанина Валентина Ивановна**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
**Фролов Михаил Владимирович**, асп.; E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 25.04.16

**Loganina Valentina Ivanovna**, DSc, Professor; E-mail: loganin@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Frolov Mikhail Vladimirovich**, Post-graduate Student; E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **EFFECTIVENESS OF THERMAL INSULATION PLASTER WITH THE USE OF MICROSPHERES FOR FINISHING AERATED CONCRETE WALLING**

The study compared the effectiveness of the use of an ingredient in the composition of insulating dry lime mortar of four highly porous materials: glass hollow microspheres, ash aluminosilicate microspheres, expanded vermiculite sand, expanded perlite. We studied the structure of the pore space, defined coefficients of thermal conductivity and water vapor permeability of coatings, filled with various fillings. The estimation of the impact of external thermal insulation plaster layer to change the humidity conditions of gas concrete walling. It confirmed the effectiveness of hollow glass microspheres as a filler in the heat-insulating plasters.

**К e y w o r d s:** dry mixes, glass hollow microspheres, calcium silicates, thermal conductivity, water vapor permeability, moisture conditions, aerated concrete.

### **REFERENCES**

1. Kornienko S.V., Vatin N.I., Petrichenko M.R., Gorskikh A.S. Otsenka vlazhnostnogo rezhima mnogosloynoy stenovoy konstruktsii v godovom tsikle [Evaluation humidity conditions multilayer wall structure in the annual cycle]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of unique buildings and structures]. 2015. No. 6. Pp. 19–33. (in Russia)
2. Vatin V.I., Gorskikh A.S., Glumov A.V. Vliyanie fiziko-tehnicheskikh i geometricheskikh kharakteristik shtukaturnykh pokrytiy na vlazhnostnyy rezhim odnorodnykh sten iz gazobetonnykh blokov [Effect of physical, technical and geometrical characteristics of plasters on the walls of homogeneous humidity conditions of concrete blocks]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Civil Engineering Journal]. 2011. No. 1. Pp. 28–33. (in Russia)
3. Loganina V.I., Frolov M.V. Tonkodispersnyy napolnitel' na osnove silikatov kal'tsiya dlya izvestkovykh smesey [The fine filler based on calcium silicate for lime blends]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2015. No. 5. Pp. 144–147. (in Russia)
4. Loganina V.I., Kislytsyna S.N., Frolov M.V. Izvestkovoe kompozitsionnoe vyazhushchchee s primeneniem dobavki na osnove alyumosilikatnogo napolnitelya [Lime composite binder with additives based on aluminosilicate filler]. Vestnik Belgorod. gos. tekhnol. un-ta imeni V.G. Shukhova [Bulletin of the Belgorod Shukhov State Technological University]. 2015. No. 6. Pp. 70–73. (in Russia)

5. Loganova V.I., Frolov M.V., Ryabov M.A. Teploizolyatsionnye izvestkovye sukhie stroitel'nye smesi dlya otdelki sten iz gazobetona [Insulation lime dry mixes for the walls of aerated concrete]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016. No. 5. Pp. 82–92. (in Russia)
  6. Pashkevich A.A. Effektivnye tsementnye shtukaturnye rastvory s polimi steklyannymi mikrosferami: dis. ... kand. techn. nauk [Effective cement plasters with hollow glass microspheres: dis. ... cand. of techn. sci.: 05.23.05]. Moscow, 2009. 141 p. (in Russia)
  7. Semenov V.S., Rozovskaya T.A. Povyshenie energoeffektivnosti ogranichdayushchikh konstruktsiy s primeneniem oblegchennykh kladochnykh rastvorov [Improving energy efficiency building envelopes using lightweight mortars]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2015. No. 6. Pp. 16–19. (in Russia)
  8. Trofimov B.Ya., Akhtyamov R.Ya., Akhmed'yanova R.M. Teploizolyatsionnye shtukaturnye rastvory s vermiculitovym zapolnitelem [Thermal insulating plasters with vermiculite filler]. Tsement i ego primenenie [Cement and its applications]. 2002. No. 6. Pp. 16–19. (in Russia)
  9. Rukovodstvo po naruzhnoy otdelke sten iz yacheistobetonykh blokov avtoklavnogo tverdeniya. 1-ya redaktsiya [Guidelines for outer wall decoration from cellular concrete blocks autoclaved. 1 edition]. Belgorod, National Association of autoclaved aerated concrete, 2010. 3 p. (in Russia)
  10. Gomann M. Porobeton: rukovodstvo [Porous concrete: manual]. Per. with it. ed. A. Kolomatskiy. Belgorod, Publishing house «LitKaraVan», 2010. 272 p. (in Russia)
-



## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.922.26

В.Н. ПОСОХИН, А.М. ЗИГАНШИН, Е.В. ВАРСЕГОВА

### К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ<sup>1</sup>

#### Сообщение 2

Обсуждается методика численного расчета сопротивления возмущающих элементов трубопроводных систем. Определяются коэффициенты местного сопротивления на вход в щелевое отверстие, расположенное в стенке воздуховода и на проход мимо него, а также длины зон влияния возмущающих элементов вверх и вниз по потоку. Рассматриваются ситуации, когда отверстие находится в ряду других последовательно размещенных щелей, вблизи торца воздуховода, а также при наличии конструктивных элементов, изменяющих характеристики течения и значения КМС в том числе. Численное решение получено с помощью пакета программ Fluent. При этом используется «стандартная»  $k$ - $\varepsilon$  модель замыкания системы уравнений двумерного турбулентного движения.

**Ключевые слова:** отверстие в стенке, транзитный поток, численный метод, коэффициенты местного сопротивления, зоны влияния, конструктивные элементы.

В сообщении 1 рассмотрено течение, которое образуется при входе воздуха в щелевое отверстие, расположенное в стенке вытяжного воздуховода в ряду других последовательно размещенных отверстий. Здесь мы обратимся к случаям, когда отверстия снабжены конструктивными элементами, изменяющими характеристики потока, в том числе коэффициенты местного сопротивления (КМС) на вход и на проход мимо отверстия, что актуально, например, при проектировании воздуховодов с заданной равномерностью (неравномерностью) всасывания [1–4]. Рассмотрим также вариант, когда отверстие расположено в конце воздуховода вблизи его торца [5, 6].

Не останавливаясь на постановке решения задачи, которая подробно излагалась в сообщении 1, перейдем к обсуждению результатов решения. На рис. 1 приведены картины течений, когда рассмотренная в сообщении 1 схема дополнена козырьком высотой  $t$ . Последний может быть расположен вне воздуховода (рис. 1, *a*) или внутри него на правой или левой границе отверстия (рис. 1, *b*, *c*).

<sup>1</sup> См.: Пosoхин В.Н., Зиганшин А.М., Варсегова Е.В. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщ. 1 // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 66–73.

В численном эксперименте принято:  $H = 0,1 \text{ м}$ ,  $h = 0,015 \text{ м}$ ,  $\bar{h} = h/H = 0,15$ ,  $\bar{t} = t/H = 0; 0,075; 0,15$ . Удельные расходы воздуха: входящего в отверстие  $L_o = 0,15 \text{ м}^2/\text{с}$ , транзитного, проходящего мимо отверстия  $- L_t = 1,35 \text{ м}^2/\text{с}$ , суммарный расход  $L_c = L_o + L_t = 1,5 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\bar{L}_o = L_o / L_c = 0,1$ .

Из рис. 1 видно, что размеры вихревой зоны, так же как и поджатие струи, минимальны (рис. 1, а) и максимальны (рис. 1, в); установка козырька внизу справа (рис. 1, б) – промежуточный вариант. Соответственно следует ожидать, что значение  $\zeta_o$  будет наименьшим в варианте «а» и наибольшим в варианте «в». Кинематика транзитного потока слабо меняется в зависимости от расположения козырька, значит, во всех трех случаях значения  $\zeta_t$  будут примерно одинаковыми.

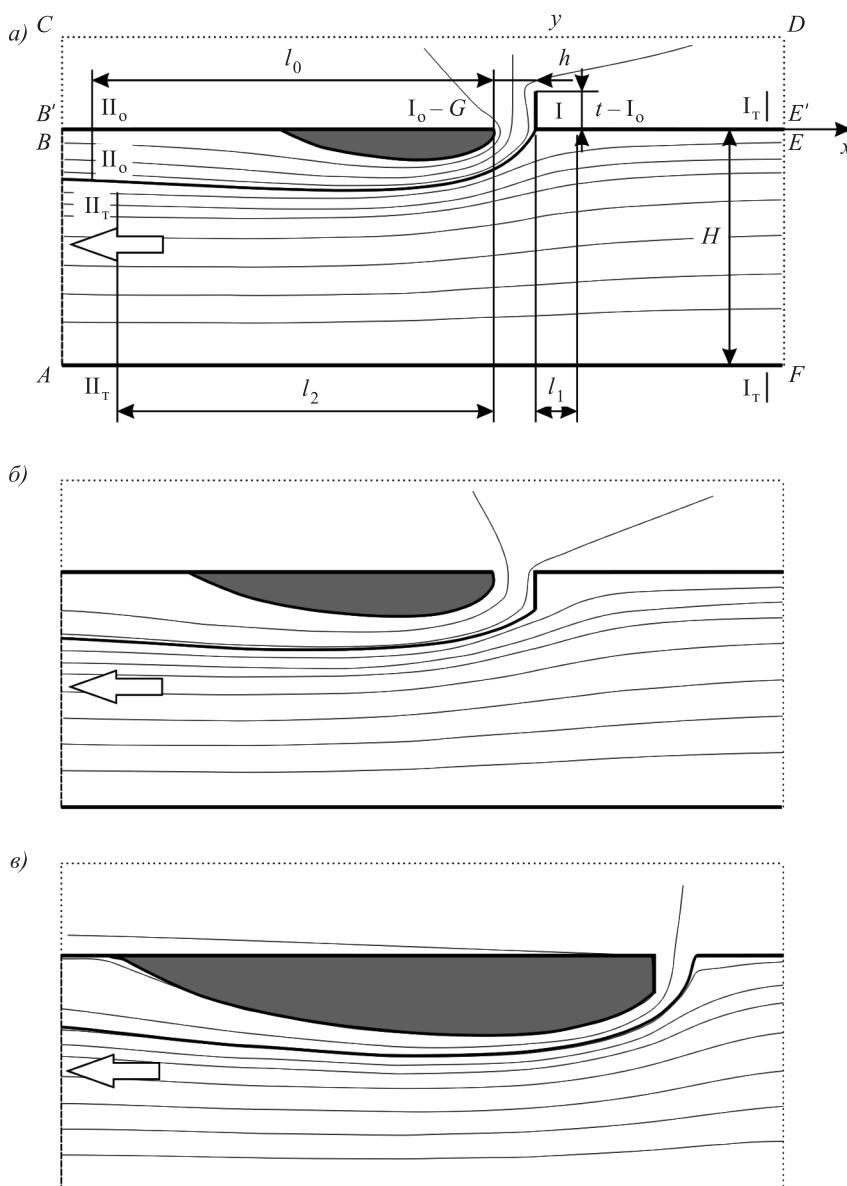


Рис. 1. Линии тока течений

Динамическое давление, определенное:

по средней скорости в отверстии  $P_{\text{до}} = \rho u_{F_0}^2 / 2 = 61,25 \text{ Па};$

по средней скорости на правой границе потока  $P_{\text{дт}} = \rho u_{F_T}^2 / 2 = 111,63 \text{ Па};$

по средней скорости на левой границе потока  $P_{\text{дс}} = \rho u_{F_C}^2 / 2 = 137,81 \text{ Па}.$

Коэффициенты местного сопротивления

$$\zeta = \gamma_I + \alpha_I - \gamma_{II} - \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = \Delta(\gamma + \alpha) - \overline{\Delta P}_{\text{тр}}.$$

Расчетное распределение безразмерного полного давления по длине трубок тока при  $\bar{t} = 0,15$ ,  $\bar{L}_o = 0,1$  показано на рис. 2, из которого следует, что если козырек расположен снаружи, то:

– для транзитного потока –

$$l_1 = 0,15 \text{ м}, \quad l_2 = 1 \text{ м}, \quad \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 0,347,$$

$$R_{y\text{д1}} = 9 \text{ Па/м}, \quad R_{y\text{д2}} = 14,2 \text{ Па/м}, \quad \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = (l_1 \cdot R_{y\text{д1}} + l_2 \cdot R_{y\text{д2}}) / P_{\text{дт}} = 0,139;$$

– для струи –

$$l_0 = 2 \text{ м}, \quad \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{до}} = 0,594, \quad R_{y\text{д0}} = 10,8 \text{ Па/м},$$

$$\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l_0 \cdot R_{y\text{д0}} / P_{\text{до}} = 0,348.$$

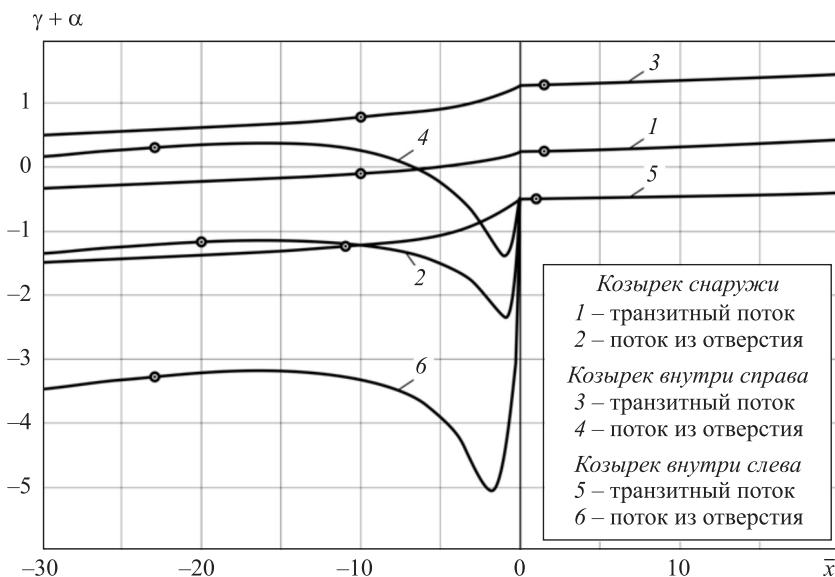


Рис. 2. Распределение безразмерного полного давления по длине канала.  
Кружками обозначены границы зон влияния

Значения КМС –  $\zeta_o = 0,246$ ,  $\zeta_T = 0,208$ .

Если козырек расположен внутри, на правой границе, то:

– для транзитного потока –

$$l_1 = 0,15 \text{ м}, \quad l_2 = 1 \text{ м}, \quad \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 0,529,$$

$$R_{y\text{д1}} = 9 \text{ Па/м}, \quad R_{y\text{д2}} = 15,6 \text{ Па/м}, \quad \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = (l_1 \cdot R_{y\text{д1}} + l_2 \cdot R_{y\text{д2}}) / P_{\text{дт}} = 0,151;$$

– для струи –

$$l_0 = 2,3 \text{ м}, \quad \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{до}} = -0,791, \quad R_{y\text{д0}} = 11,44 \text{ Па/м},$$

$$\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l_0 \cdot R_{y\text{д0}} / P_{\text{до}} = 0,427.$$

Значения КМС –  $\zeta_o = -1,218$ ,  $\zeta_t = 0,378$ .

Если козырек внутри, на левой границе, то:

– для транзитного потока –

$$l_1 = 0,1 \text{ м}, l_2 = 1,1 \text{ м}, \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 0,745,$$

$$R_{y\text{д}1} = 8,9 \text{ Па/м}, R_{y\text{д}2} = 15,1 \text{ Па/м}, \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = (l_1 \cdot R_{y\text{д}1} + l_2 \cdot R_{y\text{д}2}) / P_{\text{дт}} = 0,157;$$

– для струи –

$$l_0 = 2,3 \text{ м}, \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{до}} = 2,794, R_{y\text{д}0} = 13,1 \text{ Па/м},$$

$$\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l_0 \cdot R_{y\text{д}0} / P_{\text{до}} = 0,491.$$

Значения КМС –  $\zeta_o = 2,303$ ,  $\zeta_t = 0,588$ .

Аналогичные вычисления и построения были проделаны для всех указанных выше значений  $\bar{t}$ . Результаты представлены на рис. 3, где нумерация кривых соответствует рис. 2.

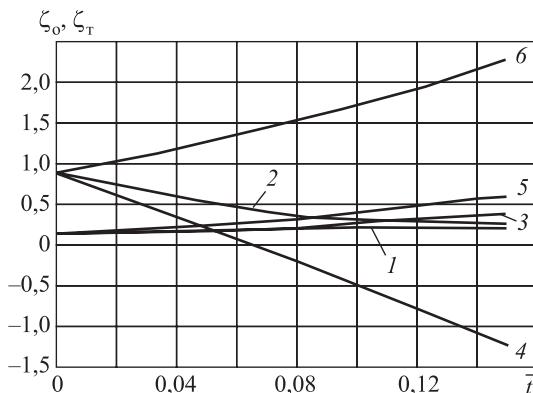


Рис. 3. Графики зависимости  $\zeta_o = \zeta_o(\bar{t})$ ,  
 $\zeta_t = \zeta_t(\bar{t})$

$\zeta_o$  и  $\zeta_t$ , напротив, с увеличением  $\bar{t}$  значения  $\zeta_o$  и  $\zeta_t$  все больше расходятсяся. При установке козырька внутри воздуховода на левой границе отверстия значения  $\zeta_o$  увеличиваются весьма интенсивно,  $\zeta_t$  также возрастает, но слабо.

На рис. 4 приведены картины течения при расположении щелевого отверстия вблизи торца воздуховода высотой  $H = 0,1 \text{ м}$ ,  $L_o = 0,816 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $P_{\text{до}} = 1813 \text{ Па}$  (рис. 4, а –  $\bar{h} = 0,15$ ,  $\bar{s} = 0,15$ ; рис. 4, б –  $\bar{h} = 0,32$ ,  $\bar{s} = 0,32$ ). Струя, образованная потоком, втекающим через отверстие, ударяется о дно, разворачивается и, постепенно расширяясь, заполняет все сечение. Образуются вихревые зоны, число, расположение, форма и размеры которых зависят от значений параметров  $\bar{h}$ ,  $\bar{s}$ . Построены эпюры безразмерного полного давления по длине трубки тока, длины зон влияния и определены значения  $\zeta_o$  (рис. 5).

При  $\bar{h} = 0,15$ ,  $\bar{s} = 0,15$ :

$$l_1 = 0,9 \text{ м}, \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 1,9,$$

$$R_{y\text{д}1} = 9,5 \text{ Па/м}, \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l \cdot R_{y\text{д}} / P_{\text{дт}} = 0,016, \zeta_o = 1,884;$$

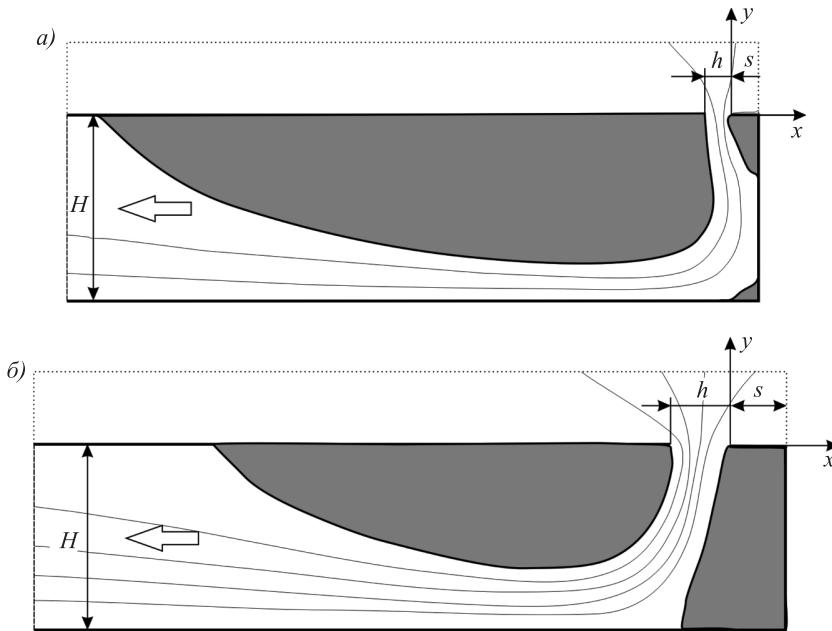


Рис. 4. Линии тока течений

при  $\bar{h} = 0,32$ ,  $\bar{s} = 0,32$ :

$$l_1 = 1,1 \text{ м}, \quad \Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 2,0,$$

$$R_{\text{уд}} = 4,88 \text{ Па/м}, \quad \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l \cdot R_{\text{уд}} / P_{\text{дт}} = 0,037, \quad \zeta_0 = 1,963.$$

Также на рис. 5 представлены графики зависимости  $\zeta_0 = \zeta_0(\bar{h}, \bar{s})$  для вариантов течений рис. 4. Видно, что наличие тупика в обоих случаях приводит к увеличению  $\zeta_0$ , но характер возрастания  $\zeta_0$  неодинаков при разных  $\bar{h}$ , что связано, по-видимому, с условиями формирования вихревых зон в тупике.

Аналогичные вычисления были проделаны для отверстий, снабженных козырьками (рис. 6, при  $\bar{h} = 0,15$ ;  $\bar{s} = 0,15$ ). Для всех вариантов установки

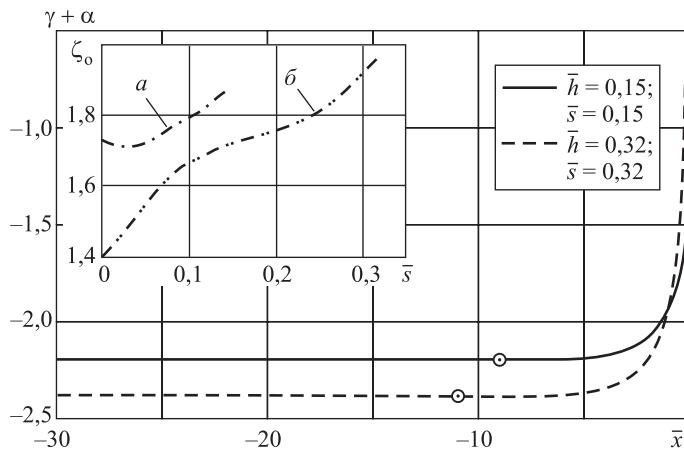


Рис. 5. Распределение безразмерного полного давления по длине канала

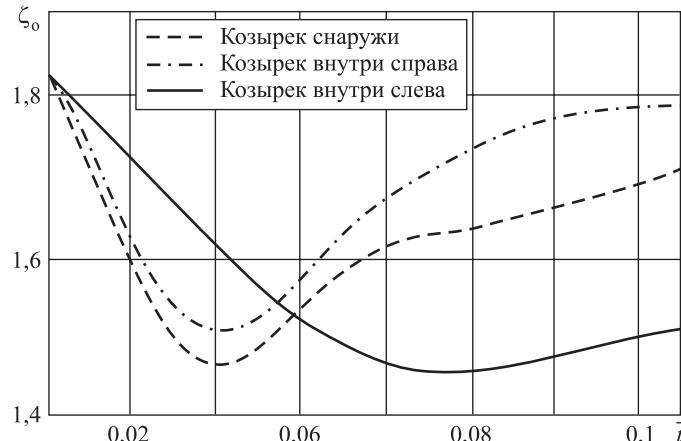


Рис. 6. График зависимости  $\zeta_0 = \zeta_0(\bar{t})$  при  $\bar{h} = 0,15$  и  $\bar{s} = 0,15$

коэффициент  $\zeta_0$  уменьшается с увеличением его высоты до некоторого минимума и далее увеличивается с ростом  $\bar{t}$ .

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании воздуховодов с заданной равномерностью (неравномерностью) всасывания.

Предложенная методика определения коэффициентов местных сопротивлений трубопроводных систем позволяет заменить трудоемкий и дорогостоящий физический эксперимент численным. При этом исключаются возможные ошибки измерений скоростей и давлений в существенно неравномерных полях, увеличивается объем извлекаемой информации. Так, например, при рассмотрении задач на истечение из отверстий в стенке воздуховода появляется возможность численного определения направления истечения струи, ее кинематических и тепловых характеристик; для вытяжных воздуховодов возможно определение неравномерности всасывания по площади отверстий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Усманов Р.А., Давыдов А.П., Валиуллин М.А. Расчет воздухопроводов равномерной раздачи и всасывания с внутренними экранами, установленными под углом // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17. № 12. С. 138–141.
- Давыдов А.П., Ланцов А.Е. Коэффициент расхода всасывающего отверстия при различных значениях  $Re$  // Изв. КазГАСУ. 2011. № 2(16). С. 147–152.
- Валиуллин М.А., Давыдов А.П. Коэффициент расхода всасывающей щели с внутренним экраном // Изв. КазГАСУ. 2011. № 3(17). С. 85–90.
- Носова М.М., Барнакова Т.С. Сопротивление входных и выходных отверстий каналов в присутствии проходящего потока // Тр. ЦАГИ. Промышленная аэродинамика. 1959. № 15. С. 20–37.
- Ханжонков В.И., Давыденко Н.И. Сопротивление боковых отверстий концевого участка трубопровода // Тр. ЦАГИ. Промышленная аэродинамика. 1959. № 15. С. 38–46.
- Внутренние санитарно-технические устройства. В 2-х ч. Ч. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха / В.Н. Богословский, И.А. Шепелев, В.М. Эльтерман и др.; под ред. И.Г. Староверова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1977. 502 с.

**Посохин Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Зиганшин Арслан Маликович**, канд. техн. наук, доц.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Варсегова Евгения Владиславовна**, канд. физ.-мат. наук, доц.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 11.04.16

**Posokhin Vladimir Nikolaevich**, DSc, Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Ziganshin Arslan Malikovich**, PhD, Ass. Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Varsegova Evgeniya Vladislavovna**, PhD, Ass. Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **CALCULATION OF MINOR LOSSES**

### **Report 2**

Discussed the method of numerical calculation of the of pipeline systems disturbing elements. Determined the minor losses of the entry into the slot located in the wall of the duct and to pass after it, as well as the length of the influence zones of the disturbing elements up and down of the stream. We consider the situations where the exhaust orifice is located in a number of other outstanding series of slots and near the end of the duct, as well as the presence of structural elements that alter the flow characteristics and the value of minor losses coefficients as well. The numerical solution is obtained by using Fluent software package. It uses the «standard»  $k-\varepsilon$  model of turbulence to close the two-dimensional system of motion equations.

**Keywords:** orifice in a duct wall, the transit flow, numerical method, minor losses coefficients, the zone of influence, the structural elements.

### **REFERENCES**

1. Usmanov R.A., Davydov A.P., Valiullin M.A. Raschet vozdukhovodov ravnomernoy razdachi i vsasyvaniya s vnutrennimi ekranami, ustanovlennymi pod ugлом [Design of uniform distribution and exhaust air ducts with the internal screens installed at an angle]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [News of Kazan technological university]. 2014. Vol. 17. No. 12. Pp. 138–141. (in Russia)
2. Davydov A.P., Lantsov A.E. Koeffitsient raskhoda vsasyvayushchego otverstiya pri razlichnykh znacheniyakh Re [Flow rate coefficient of the exhaust opening at various Re values]. Izvestiya KazGASU [News of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2011. No. 2(16). Pp. 147–152. (in Russia)
3. Valiullin M.A., Davydov A.P. Koeffitsient raskhoda vsasyvayushchey shcheli s vnutrennim ekranom [Flow rate coefficient of the exhaust slot with the internal screen]. Izvestiya KazGASU [News of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2011. No 3(17). Pp. 85–90. (in Russia)
4. Nosova M.M., Barnakova T.S. Soprotivlenie vkhodnykh i vykhodnykh otverstiy kanalov v prisyestvii prokhodyashchego potoka [Resistance of entry and exhaust slot of channels in the presence of the passing flow]. Trudy CAGI. Promyshlennaya aerodinamika [Industrial Aerodynamics]. 1959. No. 15. Pp. 20–37. (in Russia)

5. Khanzhonkov V.I., Davydenko N.I. Soprotivlenie bokovykh otverstiy kontsevogo uchastka truboprovoda [Resistance of lateral openings of the dead-end section of pipe]. Trudy CAGI. Promyshlennaya aerodinamika [Industrial Aerodynamics]. 1959. No. 15. Pp. 38–46. (in Russia)
6. Bogoslovskiy V.N., Shepelev I.A., El'terman V.M. etc. Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustroystva. V 2-kh ch. Ch. 2. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha [The internal sanitary devices. At 2 h. Part 2. Ventilation and air conditioning]. Pod red. I.G. Staroverova. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Ed. I.G. Staroverov. Ed. 2nd, Revised. and ext.] Moscow, Stroyizdat, 1977. 502 p. (in Russia)

---

УДК 699.86.001.24

О.Д. САМАРИН

## УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОЛЩИНЫ УТЕПЛИТЕЛЯ

Рассмотрены особенности расчета требуемого термического сопротивления слоя изоляционного материала в конструкциях наружных ограждений гражданских зданий при использовании методики СП 50.13330.2012. Показана необходимость учета переменности дополнительных удельных потерь теплоты через точечные и линейные теплотехнические неоднородности в случае изменения толщины утеплителя. Предложен инженерный алгоритм, позволяющий осуществить такой учет на упрощенном уровне для использования в практике массового проектирования на базе анализа данных СП 230.1325800.2015. Изложение проиллюстрировано числовым примером для жилого здания по одному из типовых проектов с целью выявления качественного и количественного изменения результатов за счет применения рассматриваемого алгоритма. Дан анализ полученных данных и выдвинуто физическое объяснение характера поправок, вносимых при уточнении вычислений.

**Ключевые слова:** сопротивление теплопередаче, теплотехническая неоднородность, дополнительные теплопотери, толщина утеплителя.

В рамках пересмотра действующей нормативной базы в области строительства в Российской Федерации с 1 июля 2013 г. вступила в силу актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» – СП 50.13330.2012 (далее – СП). Это потребовало изменения подходов к теплотехническому расчету ограждающих конструкций здания и выбору их требуемого сопротивления теплопередаче. В первую очередь для этого необходимо определять удельные потери теплоты через линейные теплотехнические неоднородности  $\Psi_j$ , Вт/(м · К), и через точечные неоднородности  $\chi_k$ , Вт/К, по результатам расчета двухмерного температурного поля узла конструкций [1, 2].

После этого требуемое термическое сопротивление слоя утеплителя  $R_{yt}$ , м<sup>2</sup> · К/Вт, в соответствии с СП может быть вычислено по следующей формуле:

$$R_{yt} = \frac{1}{U_{tp}} - \sum R_k. \quad (1)$$

Здесь  $\sum R_k$ , м<sup>2</sup> · К/Вт – сумма термических сопротивлений конструктивных слоев стены, а также сопротивлений теплообмену на ее внутренней и наружной поверхности;

$U_{tp}$  – требуемое значение, Вт/(м<sup>2</sup> · К), удельного теплового потока по глади конструкции (т.е. без учета теплопроводных включений)  $U$ , исходя из обес-

печения необходимой величины приведенного сопротивления ограждения теплопередаче  $R_o^{\text{пр}}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ :

$$U_{\text{тр}} = \frac{1}{R_o^{\text{усл}}} = \frac{1}{R_o^{\text{пр}}} - \Delta K. \quad (2)$$

В данном выражении  $R_o^{\text{усл}}$  – условное сопротивление теплопередаче однородной части фрагмента теплозащитной оболочки здания  $i$ -го вида,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  (без учета теплотехнической неоднородности). Параметр  $\Delta K$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , представляет собой суммарную тепловую проводимость, т.е. суммарные дополнительные удельные теплопотери через теплотехнические неоднородности, рассчитываемые с использованием показателей  $\Psi_j$  и  $\chi_k$ . Однако определенная сложность заключается в том, что эта величина в соответствии с данными В.В. Козлова (ФГБУ НИИСФ РААСН), вошедшими впоследствии в СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей», до некоторой степени будет зависеть от искомого значения  $R_{\text{yt}}$ . Анализ данных СП 230 показывает, что указанные дополнительные тепловые потоки несколько снижаются с ростом  $R_{\text{yt}}$ , причем коэффициент пропорциональности при средней теплопроводности конструктивного слоя, равной  $0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , составляет примерно – 0,02. В то же время вклад в  $\Delta K$  оконных откосов от  $R_{\text{yt}}$  зависит очень слабо, а точечных элементов типа тарельчатых дюбелей и вовсе является практически постоянным. Поэтому с учетом относительной доли дополнительной тепловой проводимости углов здания и примыканий к кровле и фундаменту, которую можно оценить примерно в  $2/3$  от суммарной величины  $\Delta K$  [3], в первом приближении для  $\Delta K$  будет справедливо соотношение  $\Delta K = A - BR_{\text{yt}}$ , где  $B = 0,013$ , а значение  $A$  определяется геометрическими характеристиками здания. Если же известно  $\Delta K_1$  при каком-либо определенном  $R_1$ , это выражение можно переписать как

$$\Delta K = \Delta K_1 - B(R_{\text{yt}} - R_1). \quad (3)$$

Подставляя теперь зависимость (3) в соотношение (2) и используя полученный результат в формуле (1), несложно найти уравнение для основного интересующего нас параметра  $R_{\text{yt}}$  в неявном виде. Однако, учитывая относительную малость коэффициента  $B$ , при преобразованиях можно пренебречь некоторыми слагаемыми, и тогда с достаточной точностью окончательное выражение для  $R_{\text{yt}}$  запишется в следующем виде:

$$R_{\text{yt}} = \frac{1}{U_{\text{тр},1} + B/U_{\text{тр},1}} - \Sigma R_k. \quad (4)$$

Величину  $U_{\text{тр},1}$  при этом необходимо вычислять по соотношению (2), где в качестве  $\Delta K$  должно использоваться  $\Delta K_1$ . Иначе говоря, последовательность расчета по формуле (4) будет следующей: вначале определяется  $\Delta K_1$  по методике СП, исходя из существующего набора теплотехнических неоднородностей в ограждении с учетом их размеров и количества для некоторого ориентировочного значения  $R_1 = R_{\text{yt},0}$ , затем рассчитывается соответствующий уровень  $U_{\text{тр}}$  по выражению (2) через  $\Delta K_1$  и принятое заранее значение  $R_o^{\text{пр}}$  и, наконец, уточняется  $R_{\text{yt}}$  по (4).

Если провести вычисления для условий примера, приведенного в [3], а именно для одной секции дома по серии ПЗ-1/16, хотя реально такие здания и не строятся односекционными, то обнаруживаются следующие результаты. Для базового числа этажей, равного 17, имеем  $\Delta K_1 = 0,107 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при  $R_o^{\text{пр}} = 2,99$  и  $\Sigma R_k = 0,4$ , что при вычисленном в [3] коэффициенте теплотехнической однородности  $r = 0,68$  отвечает уровню  $R_1$  около  $4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Тогда

$$U_{\text{тр}} = 1/2,99 - 0,107 = 0,227 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

и

$$R_{\text{yt}} = \frac{1}{0,227 + 0,013/0,227} - 0,4 = 3,12 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}.$$

Легко заметить, что слагаемое  $B/U_{\text{тр},1}$  в соотношении (4) по сути является поправкой к простейшей зависимости для  $R_{\text{yt}}$ , которая может быть получена без учета изменения параметра  $\Delta K$ . Следовательно, без такой поправки, т.е. при  $\Delta K = \text{const}$ , значение  $R_{\text{yt}}$  окажется равным  $1/0,227 - 0,4 = 4,00 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , что как раз совпадает с приведенной выше величиной  $R_1$ . Иначе говоря, в данном случае учет зависимости  $\Delta K$  от  $R_{\text{yt}}$  приводит к необходимости принимать  $R_{\text{yt}}$  на 22 % ниже, чем без этого учета. Вообще, поскольку  $B > 0$  и соответствующее слагаемое находится в знаменателе формулы (4), рассматриваемое обстоятельство будет всегда приводить к уменьшению  $R_{\text{yt}}$ . Физически это можно объяснить тем, что реальный коэффициент теплотехнической однородности ограждения по мере снижения  $R_{\text{yt}}$  будет возрастать и, таким образом, доля теплопроводных включений в суммарной тепловой проводимости конструкции станет падать, так что один и тот же требуемый уровень  $R_o^{\text{пр}}$  может быть достигнут при относительно меньшей толщине утеплителя. Подобный результат имеет очень существенное значение, поскольку позволяет дополнительно сократить объем теплоизоляционного материала в конструкции стены и, следовательно, понизить стоимость строительства. Разумеется, при этом необходимо рассматривать и другие способы снижения энергопотребления, не связанные с повышением теплозащиты наружных ограждений, как отмечалось, в частности, в работах [4, 5] и у ряда других авторов как в нашей стране, так и за рубежом.

Таким образом, получен достаточно простой, наглядный и физически обоснованный способ учета переменности показателей  $\Psi_j$  и  $\chi_k$  при расчете требуемого термического сопротивления слоя утеплителя в наружных ограждениях при использовании методики СП. Данный способ имеет инженерный вид и пригоден для использования в практике массового проектирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строит. материалы. 2010. № 12. С. 4–12.
- Гагарин В.Г., Дмитриев К.А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // Строит. материалы. 2013. № 6. С. 14–16.

3. С а м а р и н О.Д. Использование методики СП 50.13330.2012 для оценки зависимости теплотехнической однородности наружной стены от этажности здания // Монтаж. и спец. работы в стр-ве. 2015. № 3. С. 24–26.
4. Г а г а р и н В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Стройт. материалы. 2010. № 3. С. 8–16.
5. Р ы м а р о в А.Г., С а в и ч е в В.В. Особенности работы регенеративной системы вентиляции административного здания // Вестн. МГСУ. 2013. № 3. С. 174–177.

**Самарин Олег Дмитриевич**, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 25.02.16

**Samarin Oleg Dmitrievich**, PhD, Ass. Professor  
Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **THE ACCOUNT OF CHANGE OF PROPERTIES OF THE THERMAL NON-UNIFORMITIES DURING DEFINITION OF THERMAL INSULATION THICKNESS**

The peculiarities of calculating the required thermal resistance of the layer of insulating material in designs of outdoor fences of civil buildings with the use of the SP 50.13330.2012 are considered. The necessity of accounting for the additional variability of the specific heat losses through point and line thermal non-uniformities in case of changing the thickness of the insulation is shown. The engineering algorithm enabling such account on a simple level for use in the practice of mass design based on data analysis SP 230.1325800.2015 is proposed. The presentation is illustrated with a numerical example for a residential building on one of the standard projects to identify qualitative and quantitative changes in the results due to the application of the algorithm. The analysis of the obtained data is given and advanced physical explanation of the nature of the amendments made in the refinement calculations is proposed.

**К e y w o r d s:** thermal resistance, thermal non-uniformity, additional heat losses, thickness of insulating material.

## **REFERENCES**

1. G a g a r i n V.G., K o z l o v V.V. Teoreticheskie predposylki rascheta privedennogo sопротивления теплопередаче ограждений конструкций [Theoretical reasons for calculation of reduced thermal resistance of building enclosures]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2010. No. 12. Pp. 4–12. (in Russia)
2. G a g a r i n V.G., D m i t r i e v K.A. Uchet teplotekhnicheskikh neodnorodnostey pri otsenke teplozashchity ограждений конструкций в России и европейских странах [Account of thermal non-uniformities during estimation of thermal performance of building enclosures in Russia and European countries]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2013. No. 6. Pp. 14–16. (in Russia)
3. S a m a r i n O.D. Ispol'zovanie metodiki SP 50.13330.2012 dlya otsenki zavisimosti teplotekhnicheskoy odnorodnosti naruzhnoy steny ot etazhnosti zdaniya [Using of the procedure of SP 50.13330.2012 for estimation of the dependence of thermal uniformity of the external wall from the amount of building storeys]. Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve [Erection and special works in construction]. 2015. No. 3. Pp. 24–26. (in Russia)

4. Gagarin V.G. Makroekonomicheskie aspekty obosnovaniya energosberегayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teplozashchity ogranichivayushchikh konstruktsiy zdaniy [Macroeconomic features of justification of energy saving measures during increase of thermal performance of building enclosures]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2010. No. 3. Pp. 8–16. (in Russia)
  5. Rymarov A.G., Savichev V.V. Osobennosti raboty regenerativnoy sistemy ventilyatsii administrativnogo zdaniya [Features of operation of the regenerative ventilating system of the administrative building]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2013. No. 3. Pp. 174–177. (in Russia)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ



УДК 621.542.001

Ю.Э. МАЛЫШЕВА, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ,  
Э.А. АБРАМЕНКОВ

### КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ-ЭЛЕМЕНТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ СО СТЕРЖНЕВЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Рассматривается предложенная классификация и ее возможности по созданию новых конструктивных решений на примере применения стержневых систем воздухо-подвода и воздухоотвода.

Ключевые слова: воздухоподвод, воздухоотвод, воздухораспределение, стержень, признак-элемент, ударник.

**Введение.** Обращаясь к истории появления пневмоударных механизмов и машин на их основе в хронологическом порядке можно проследить применение беззолотниковых и дроссельных механизмов по изданиям [1, 2]. Беззолотниковые механизмы снабжены неподвижными [3–7] и подвижными [8, 9] стержнями, выполняющими совместно с ударниками функции клапанных воздухораспределителей. Практический интерес к ним обусловлен надежностью работы и простотой изготовления. Издания [1, 2] послужили созданию расширенной классификации конструктивных признаков-элементов стержней, что будет содействовать созданию новых принципиальных схем пневмоударных механизмов машин различного назначения с предпочтительной экологической чистотой.

К детальным рассмотрениям и исследованиям пневматических машин ударного действия следует отнести работы М.А. Бариля [10], выполненные в 1907–1910 гг. Им осуществлено подробное рассмотрение конструкций ручных пневматических молотков различного назначения и разделение их по укрупненным группам и принципиальному отличию воздухораспределительных устройств: золотниковые, клапанные, бесклапанные; со ступенчатым и бесступенчатым ударниками; с воздухоподводящими и воздухоотводящими каналами, размещенными в трубчатых и стержневых элементах. Такое рассмотрение не содержало указаний на возможность составления композиций признаков-элементов с целью получения новых технических решений воздухораспределительных систем в пневматических молотках.

© Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Абраменков Э.А., 2016

Появление частных классификаций признаков-элементов пневматических механизмов ударного действия [11–14] позволило предложить их синтез из известных признаков-элементов, а также декомпозицию сложных систем воздухораспределения до уровня их неделимости.

Классификация признаков-элементов [15] содержала классификационные признаки клапанных систем воздухораспределения.

Развитие подобных классификаций позволило обобщить признаки-элементы для средств: впуска, выпуска, наддува, перепуска, задержки, вытеснения, продувки [1, 2].

Однако некоторые конструктивные признаки указанных средств представляются малоинформационными и требуют уточнения в их многообразии и влиянии на рабочий процесс пневматической машины ударного действия.

Для большей конкретизации по дополнительным конструктивным признакам-элементам обратимся к одному из признаков: стержню, выполняющему функции воздухораспределения в беззолотниковых пневмоударных механизмах.

Важность учета дополнительных конструктивных признаков при синтезе и выборе принципиальной схемы пневмоударного механизма отмечалась, например, в работах [1, 16].

Отмеченное следует отнести и к описанию рабочего процесса. Важными при этом являются ограничения на площади проходных сечений каналов впуска в рабочие камеры пневмоударного механизма, которые изменяются в зависимости от перемещения ударника, а потому влияют на полноту физико-математического описания рабочего процесса. Необходимо более осторожно и взвешенно подходить к представлениям о бародинамическом (изменение давления воздуха), термодинамическом (изменение температуры воздуха) и хородинамическом (изменение объемов рабочих камер) процессах, происходящих в объемах камер, и времени цикла.

Поясним некоторые подходы к конструктивному исполнению стержней как признаков-элементов, ответственных за качественное и количественное функционирование системы воздухораспределения.

Стержни в беззолотниковых системах воздухораспределения выполняют функции неподвижного по отношению к ударнику элемента-клапана. Стержни, как и трубки [16], могут быть с наличием наружных и внутренних конструктивных признаков-элементов.

На боковых поверхностях стержней размещаются признаки-элементы в виде каналов-пазов винтовых, фигурных с некоторой кривизной по глубине или ширине; каналов-лысок волнистых прямых параллельных образующей стержня, наклонных под некоторым углом от оси стержня, ступенчатых с некоторой кривизной поверхности. На боковой поверхности поршневой части стержня каналы-пазы могут быть выполнены прерывистыми или непрерывными кольцевыми выточками или проточками; перпендикулярными к оси стержня или наклонными под некоторым углом к образующей поршневой части стержня.

Предпочтительная форма стержня – цилиндрическая с одинаковым сечением или ступенчатым сечением; свободно установленная или закрепленная относительно неподвижной детали, например, фланца, крышки, стакана, цилиндра.

Для стержня следует различать каналы внутри закрытые с обоих его торцов: коленчатые с радиальными входом и выходом на наружную боковую поверхность поршневой части стержня, взаимодействующую с осевым каналом ударника. Форма входных и выходных каналов на боковой поверхности стержня может быть в виде овалов, трапецидальной, прямоугольной, треугольной, ромбической и в виде вписанных в них окружностей с одинаковыми или разными диаметрами.

Поперечные сечения наружных каналов-пазов могут быть по форме прямоугольными, квадратными, овальными, треугольными, трапецидальными и т.п.

Каналы-пазы по протяженности могут быть непрерывными (сквозными) и прерываемыми.

Радиальные входные и выходные каналы-пазы выполняются в виде щелей, круглых отверстий, прямоугольных, квадратных, треугольных, овальных, ромбических, а также вписанных в них с одинаковыми или различными по диаметру круглыми отверстиями. Формы радиальных отверстий могут располагаться симметрично образующей поверхности поршневой части стержня или наклонно к ней, что позволяет удлинить радиальный канал входа-выхода на той же площади и повысить прочность стержня.

Нежелательны применения стержней с поршневой частью, отличной от цилиндрической формы.

Овальная форма сечений площадей каналов-пазов предпочтительнее.

Указанные дополнительные классификационные признаки-элементы, представленные в таблице, можно применить к средствам [1, 2].

#### Классификационные признаки-элементы стержня

Код	Конструктивный признак-элемент				
	Средства формирования впуска	Код	Конструктивный признак	Код	Уточнение конструктивного признака
1	2	3	4	5	6
4*	Стержень средств впуска воздуха $c^*$ [1, 2]	1*	Бесступенчатый*	$a^*$	Канал-паз прямой
				$b^*$	Канал-паз наклонный
				$c^*$	Канал-паз ступенчатый
				$d^*$	Канал-паз прерывистый
				$e^*$	Канал-паз винтовой
				$f^*$	Канал-паз винтовой прерывистый
				$g^*$	Канал-паз с кривизной
				$h^*$	Канал-паз волнистый
				$i^*$	Канал-лыска прямой
				$j^*$	Канал-лыска наклонный
				$k^*$	Канал-лыска ступенчатый
				$l^*$	Канал-лыска волнистый
				$m^*$	Канал-лыска с кривизной
				$n^*$	Канал-выточка
				$o^*$	Канал-проточка

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6
				$p^*$	Канал внутри стержня боковой
				$q^*$	Канал внутри стержня торцевой
				$r^*$	Канал-лыска овальный
				$s^*$	Канал-лыска треугольный
				$t^*$	Каналы-лыски ярусные
				$u^*$	Каналы-выточки ярусные
				$v^*$	
		2*	Ступенчатый	То же $a^* - u^*$	
		3*	Не составной	То же $a^* - u^*$	
		4*	Составной	То же $a^* - u^*$	
		5*	Конический	То же $a^* - u^*$	
		6*	Коническо-цилиндрический	То же $a^* - u^*$	
		7*	Сложной конфигурации	То же $a^* - u^*$	
		8*			
4*	Стержень средств запуска $D^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств перепуска $P^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств задержки $F^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств вытеснения $G^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств форсажа $H^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств продувки $I^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств выпуска $K^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств наддува $J^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств выравнивания параметров $L^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств аккумуляции $M^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств пневматического буфера $P^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств предкамеры $Q^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*	Стержень средств атмосферной камеры $R^*$		То же 1*-7*	То же $a^* - u^*$	
4*					

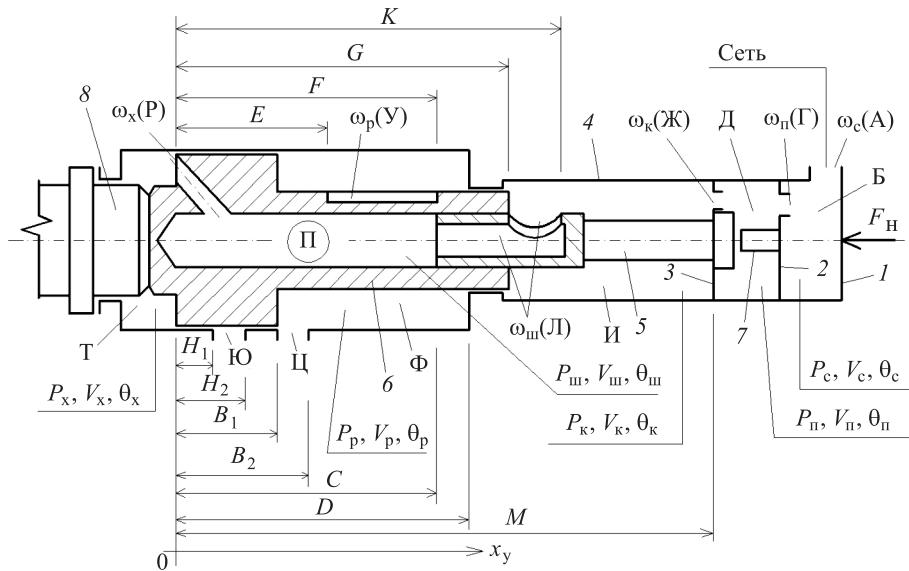


Рис. 1. Принципиальная и расчетная схема синтезированного механизма

Системы уравнений (1) и (2) описывают изменения давления воздуха в рабочих камерах механизма, представленного на рис. 1, 2, при различных конструктивных решениях поршневой части стержня управления впуском в камеру холостого хода (рис. 3–5).

С учетом [1, 2] для различных по форме каналов впуска в камеру холостого хода достаточно обозначения  $\omega_{\text{ш}}(x_y)\phi_{\text{ш}}$ , но при применении расширенных классификационных признаков-элементов учет и ограничения каждой геометрической формы канала-лыски будут различными. Для геометрических форм, например, каналов-пазов влияние ограничений будет более существенным, поскольку при одинаковых значениях  $\omega_{\text{ш}}$  можно получить меньшую прочность поршневой части стержня или уменьшить площадь проходного сечения  $\omega_{\text{ш}}$ . Это понизит ее пропускную способность и уменьшит количество воздуха, подаваемого в камеру холостого хода, что приведет к снижению энергетических характеристик.

Для наглядности рассмотрим только геометрические формы в виде прямого канала-лыски (см. рис. 3), наклонного канала-лыски (см. рис. 4) и прямого наклонного канала-паза с кривизной не ниже второго порядка, например, выполненного по полукубической параболе (см. рис. 5) в соответствии с уравнением кривой [17]:

$$ax^3 - y^2 = 0 \text{ при } a > 0.$$

Сжатый воздух с давлением  $P_c$  и температурой  $\theta_c$  поступает из сети по каналу А в стакане 1 в сетевую камеру Б с объемом  $V_c$  откуда по

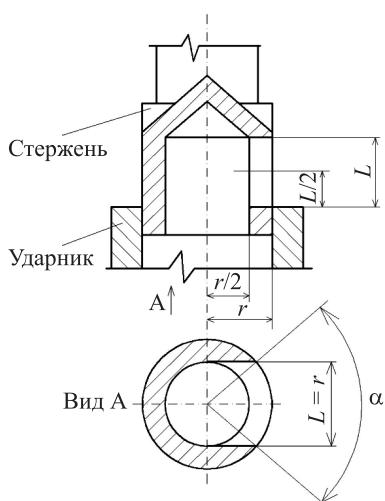


Рис. 2

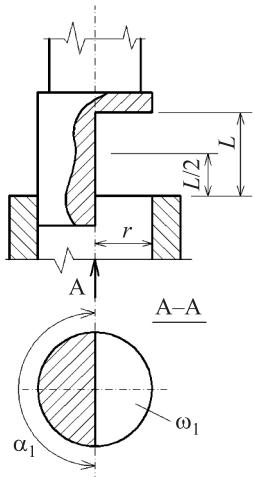


Рис. 3

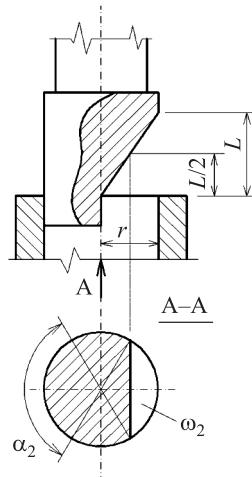


Рис. 4

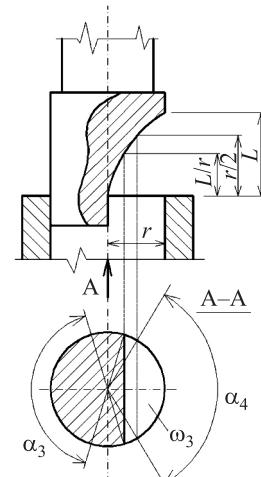


Рис. 5

каналу  $\Gamma$  с площадью сечения  $\omega_n$  в перегородке 2 в предкамеру  $\Delta$  с объемом  $V_n$  давлением воздуха  $P_n$  и температурой  $\theta_n$  и далее по каналу  $\mathcal{J}$  с площадью сечения  $\omega_k$  во фланце 3 в распределительную камеру  $I$  с объемом  $V_k$  в цилиндре-корпусе 4 массой  $m_k$ . Одновременно воздух с давлением  $P_k$  и температурой  $\theta_k$  из камеры  $V_k$  поступает по каналу  $L$  с площадью сечения  $\omega_w$  в поршневой части стержня 5 в камеру  $\Pi$  с объемом  $V_w$  в штоковой части ступенчатого ударника 6 массой  $m_y$ , откуда по радиальному каналу  $R$  с площадью сечения  $\omega_x$  в поршневой части ударника в камеру холостого хода с объемом  $V_x$ . В зависимости от перемещения ударника 6 воздух из распределительной камеры  $I$  поступает по каналу-пазу  $U$  с проходным сечением  $\omega_p$  в кольцевую камеру  $\Phi$  рабочего хода с объемом  $V_p$  в цилиндре-корпусе.

Процесс наполнения камеры  $V_x$  зависит от протяженности участка  $H_1$  до сообщения ее с атмосферой с давлением  $P_A$  при условии:  $(K - G) \leq H_1$ .

Процесс наполнения камеры  $V_p$  зависит от протяженности участка:  $(F - E) < B_2$ .

Опорожнение камеры  $V_p$  осуществляется в зависимости от положения ударника через выпускной канал  $\mathcal{C}$  с проходным сечением  $\omega_{AP}$ , камеры  $V_x$  – через выпускной канал  $\mathcal{Y}$  с проходным сечением  $\omega_{AX}$ .

Неподвижность стержня в осевом направлении гарантируется упором 7, закрепленным относительно перегородки 2.

В зависимости от разности силовых импульсов сил, действующих со стороны камер  $V_p$ ,  $V_k$  и  $V_x$ , ударник совершает возвратно-поступательные движения и наносит удары по хвостовику 8 рабочего инструмента.

Дополнительные обозначения, не указанные на рис. 1, следующие:  
 $x_y$  и  $x_k$  – перемещения ударника и цилиндра-корпуса;

$t$  – время;

$k_y$ ,  $k_k$  – коэффициенты отскока ударника от хвостовика рабочего инструмента и цилиндра корпуса от буртика хвостовика соответственно;

$(dx_y/dt)_0$  и  $(dx_y/dt)_y$  – скорость отскока ударника в конце и начале соударения;

$(dx_{\kappa}/dt)_0$  и  $(dx_{\kappa}/dt)_y$  – скорость отскока цилиндра-корпуса;  
 $F_h$  – сила прижатия цилиндра-корпуса;  
 $W = (2k^*R/(k-1))^{1/2}$  – коэффициент, учитывающий показатель процесса, где  $k$ ,  $R$  – показатель процесса и газовая постоянная;  
коэффициент бародинамического процесса  $\varphi_i$  определяется по (1) с индексом при  $\omega_i$ ;  
 $(d^2x_y/dt^2)$  и  $(d^2x_{\kappa}/dt^2)$  – ускорение перемещения ударника и цилиндра-корпуса;  
 $\varphi_c$ ,  $\varphi_{\Pi}$ ,  $\varphi_k$ ,  $\varphi_p$ ,  $\varphi_{\text{ш}}$ ,  $\varphi_x$  – коэффициенты бародинамического процесса в камерах с объемами  $V_c$ ,  $V_{\Pi}$ ,  $V_k$ ,  $V_p$ ,  $V_{\text{ш}}$ ,  $V_x$ ;  
 $\varphi_{AP}$ ,  $\varphi_{AX}$  – коэффициенты бародинамического процесса в каналах выпуска Ц, Ю;  
 $\Omega_c$ ,  $\Omega_{\Pi}$ ,  $\Omega_k$ ,  $\Omega_p$ ,  $\Omega_{\text{ш}}$ ,  $\Omega_x$  – коэффициенты термодинамического процесса в камерах с объемами  $V_c$ ,  $V_{\Pi}$ ,  $V_k$ ,  $V_p$ ,  $V_{\text{ш}}$ ,  $V_x$ ;  
 $\Omega_{AP}$ ,  $\Omega_{AX}$  – коэффициенты термодинамического процесса в каналах выпуска Ц, Ю.

Ограничения для функций  $\varphi_c$ ,  $\varphi_{\Pi}$ ,  $\varphi_k$ ,  $\varphi_p$ ,  $\varphi_{\text{ш}}$ ,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_{AP}$ ,  $\varphi_{AX}$  –

$$\varphi_j = \varphi_i = \begin{cases} 0,5283 > \left( \frac{p_i}{p_j} \right) & p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq \left( \frac{p_i}{p_j} \right) & p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot \left( \left( \frac{p_i}{p_j} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_i}{p_j} \right)^{(k+1)/k} \right)^{1/2}, \\ 0,5283 > \left( \frac{p_i}{p_j} \right) & -p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq \left( \frac{p_i}{p_j} \right) & -p_i \cdot \theta_i^{1/2} \cdot \left( \left( \frac{p_i}{p_j} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_i}{p_j} \right)^{(k+1)/k} \right)^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

Ограничения для функции  $\Omega_c$ ,  $\Omega_{\Pi}$ ,  $\Omega_k$ ,  $\Omega_p$ ,  $\Omega_{\text{ш}}$ ,  $\Omega_x$ ,  $\Omega_{AP}$ ,  $\Omega_{AX}$  –

$$\Omega_j = \Omega_i = \begin{cases} \varphi_i > 0 & k - \theta_i / \theta_j, \\ \varphi_i \leq 0 & k - 1, \\ \varphi_i > 0 & k - \theta_i / \theta_j, \\ \varphi_i \leq 0 & k - 1. \end{cases} \quad (2)$$

Ограничения для  $x_y$ ,  $x_{\kappa}$  –

$$\begin{aligned} \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_0 &= -k_y \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ \left( \frac{dx_{\kappa}}{dt} \right)_0 &= -k_{\kappa} \left( \frac{dx_{\kappa}}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_{\kappa} \leq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения бародинамической составляющей физико-математического описания рабочего процесса с учетом (1) для рабочих камер (см. рис. 1)  $V_c$ ,  $V_{\Pi}$ ,  $V_k$ ,  $V_p$ ,  $V_{\text{ш}}$ ,  $V_x$  запишем в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_c}{dt} = \frac{k}{V_c} [W(\omega_c \varphi_c - \omega_n \varphi_n)], \\ \frac{dP_n}{dt} = \frac{k}{V_n} [W(\omega_n \varphi_n - \omega_k \varphi_k)], \\ \frac{dP_k}{dt} = \frac{k}{(V_k - x_y S_{\text{ш}})} \left[ W(\omega_k \varphi_k - \omega_p(x_y) \varphi_p - \omega_{\text{ш}}(x_y) \varphi_{\text{ш}}) + P_k \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{dP_p}{dt} = \frac{k}{(V_p - x_y S_{yP})} \left[ W(\omega_p(x_y) \varphi_p - \omega_{AP}(x_y) \varphi_{AP}) + P_p \frac{dx_y}{dt} S_{yP} \right], \\ \frac{dP_{\text{ш}}}{dt} = \frac{k}{(V_{\text{ш}} - x_y S_{\text{ш}})} \left[ W(\omega_{\text{ш}}(x_y) \varphi_{\text{ш}} - \omega_x(x_y) \varphi_x) + P_{\text{ш}} \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{dP_x}{dt} = \frac{k}{(V_x - x_y S_{yx})} \left[ W(\omega_x(x_y) \varphi_x - \omega_{Ax}(x_y) \varphi_{Ax}) + P_x \frac{dx_y}{dt} S_{yx} \right]. \end{array} \right. \quad (4)$$

Уравнения термодинамической составляющей физико-математического описания рабочего процесса с учетом (1) и (2) для рабочих камер запишется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{\theta_c}{P_c V_c} [W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_n \varphi_n \Omega_n)], \\ \frac{d\theta_n}{dt} = \frac{\theta_n}{P_n V_n} [W(\omega_n \varphi_n \Omega_n - \omega_k \varphi_k \Omega_k)], \\ \frac{d\theta_k}{dt} = \frac{\theta_k}{P_k (V_k - x_y S_{\text{ш}})} \times \\ \times \left[ W(\omega_k \varphi_k \Omega_k - \omega_p(x_y) \varphi_p \Omega_p - \omega_{\text{ш}}(x_y) \varphi_{\text{ш}} \Omega_{\text{ш}}) + (k-1) P_k \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{d\theta_p}{dt} = \frac{\theta_p}{P_p (V_p - x_y S_{yP})} \times \\ \times \left[ W(\omega_p(x_y) \varphi_p \Omega_p - \omega_{AP}(x_y) \varphi_{AP} \Omega_{AP}) + (k-1) P_p \frac{dx_y}{dt} S_{yP} \right], \\ \frac{d\theta_{\text{ш}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{ш}}}{P_{\text{ш}} (V_{\text{ш}} - x_y S_{\text{ш}})} \times \\ \times \left[ W(\omega_{\text{ш}}(x_y) \varphi_{\text{ш}} \Omega_{\text{ш}} - \omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x) + (k-1) P_{\text{ш}} \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{d\theta_x}{dt} = \frac{\theta_x}{P_x (V_x - x_y S_{yx})} \times \\ \times \left[ W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x - \omega_{Ax}(x_y) \varphi_{Ax} \Omega_{Ax}) + (k-1) P_x \frac{dx_y}{dt} S_{yx} \right]. \end{array} \right. \quad (5)$$

Уравнения перемещения ударника и корпуса механизма при ограничениях (3) будут иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{P_x S_{yx} - P_p S_{yP}}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{P_x S_{yx} - P_p S_{yP} + F_h}{m_k} & \text{при } x_k > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку сравнение для синтезированного ПУМ ведется по предложению [1, 2] с учетом камер: сетевой, предкамеры, кольцевой распределительной, кольцевой рабочего хода и холостого хода и различия будут касаться конструктивного признака-элемента впуска в камеру холостого хода с учетом классификационных признаков-элементов (см. таблицу), то целесообразно рассмотреть только различия, привносимые в физико-математическое описание рабочего процесса выполнением конструктивных признаков-элементов посредством различий в ограничениях для площадей проходных сечений канала впуска, выполненного в поршневой части стержня.

Некоторые формы каналов впуска представлены на рис. 2–5.

При одинаковом физико-математическом описании (3), (4) и одинаковых ограничениях (1) и (2) различия будут только в ограничениях для конструктивного исполнения, которые обуславливают различия как качественные, так и количественные при одинаковом описании (3) и (4).

Рассмотрим различия при применении классификационных признаков-элементов:  $c4*2*p*q*$  (рис. 2);  $c4*2*i*k*$  (рис. 3);  $c4*2*j*5*$  (рис. 4);  $c4*2*j*m*$  (см. рис. 5).

Исключив общие признаки-элементы ( $c4*2*$ ) для технических решений, представленных на рис. 2–5, получим отличительные:  $p*q*$  (рис. 2);  $i*k*$  (рис. 3);  $j*s*$  (рис. 4) и  $j*m*$  (рис. 5).

Отличительные признаки-элементы должны дать различные ограничения при описании их количественных и качественных свойств, влияющих на рабочий процесс пневмоударного механизма, несмотря на общность физико-математического описания (1)–(4).

Рассмотрим ограничения для  $\omega_i$  с учетом отличительных признаков технических решений в комбинациях  $c$  ( $c4*2*$ ), где признак средств выпуска ( $c$ ). Конструктивный признак стержня ( $4*$ ) и представленный новый признак (см. таблицу) – ( $2*$ ).

В соответствии с рис. 2 запишем: изменения площадей впуска при равенстве диаметров канала впуска и выпуска в поршневой части стержня без учета местных сопротивлений при повороте потока воздуха на  $90^\circ$ :

$$\omega_i(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_i = \pi r^2, \\ x_y = \frac{1}{2}L & \omega_i = \pi r^2 / 2, \\ x_y = L & \omega_i = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Ограничения для конструктивных решений, представленных на рис. 3–5, также не учитывают влияние местных сопротивлений потокам воздуха на впуске и выпуске в каналах предложенных форм.

Например, в ограничениях для площадей  $\omega_i$  проходного сечения канала впуска в комплексе  $\omega_i(x_y)\phi_i$ , где для канала-лыски прямой формы (рис. 3):

$$\omega_i(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_i = \pi r^2 / 2, \\ x_y = \frac{1}{2}L & \omega_i = \pi r^2 / 2, \\ x_y = L & \omega_i = 0; \end{cases} \quad (8)$$

для канала-лыски наклонной формы (рис. 4):

$$\omega_i(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_i = \pi r^2 / 2, \\ x_y = \frac{1}{2}L & \omega_i = \omega(r, \alpha), \\ x_y = L & \omega_i = 0; \end{cases} \quad (9)$$

для канала-лыски с криволинейностью полутиперболы (рис. 5):

$$\omega_i(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_i = \pi r^2 / 2, \\ x_y = \frac{1}{2}L & \omega_i = \omega(r, \alpha), \\ x_y = L & \omega_i = 0. \end{cases} \quad (10)$$

На рис. 3–5, как и на рис. 2, приняты одинаковыми размеры  $L, z$ . Функция  $\omega_{(z,a)}$  подсчитывается при  $z = \text{const}$  в зависимости от  $\alpha \neq \text{const}$ .

Очевидно, что на рис. 3–5 площади впуска при  $x_y = 0$  равны, однако при  $x_y = L/2$  имеет место  $\alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_2$  и следует  $\omega_1 > \omega_3 > \omega_2$ .

При  $x_y = r/2$  следует  $\omega_1 > \omega_3 = \omega_2$ . Заметим, что при кривизне канала-лыски, отличной от принятой на рис. 5, будет  $\omega_3 \neq \omega_2$ .

Площадь сечения сегмента  $\omega_3$  подсчитывается, например, по справочнику [17], применив зависимость –

$$\omega_c = r^2 (\pi\alpha / 360 - \cos\alpha / 2 \cdot \sin\alpha / 2). \quad (11)$$

Сравнивая конструктивные решения ПУМ по рис. 2–5, можно сделать очевидные выводы.

Предпочтительным является полный диаметральный контакт поршневой части стержня в решении по рис. 2. Однако технологическое решение круглого канала в виде признаков-элементов  $p^*q^*$  является более сложным в сравнении с  $i^*k^*, j^*s^*$  и при наличии шаблона с заданной кривизной также  $j^*m^*$ .

При одинаковых геометрических площадях сечения каналов конструктивные решения по рис. 2, 3 являются предпочтительными по сравнению с рис. 4, 5, которые более сложны в расчетах из-за учета углов  $\alpha$  при образовании площадей сегментов проходного сечения каналов-лысок, аналогично каналов-пазов.

В случае  $x_y = 0$  наибольшая площадь проходного сечения канала впуска соответствует при ограничении (8). Это может создавать наибольшее противодавление воздуха со стороны камеры холостого хода, что обусловливает большие силы сопротивления ударнику перед соударением с хвостовиком и потери в передаче кинетической энергии ударника хвостовику инструментов.

Наиболее предпочтительным техническим решением канала выпуска на поршневой части стержня является исполнение канала-лыски с кривизной не ниже второго порядка (рис. 5), поскольку имеет большой диапазон изменения площади сечения.

Важным результатом применения технических решений в пневмоударном механизме могут быть:

для решений (см. рис. 2, 3) – более раннее нарастание противодавления в камере холостого хода, что вызывает торможение ударника и снижение его предударной скорости с уменьшением энергии единичного удара и повышением частоты ударов;

для решений (см. рис. 4, 5) – возрастание противодавления к моменту соударения, что предпочтительнее в сравнении с рис. 2, 3;

для решения (см. рис. 5) – более интенсивное наполнение воздухом камеры холостого хода, что обусловит сокращение времени наполнения и создание импульса холостого хода, достижение расчетного значения энергии единичного удара, возрастание частоты ударов и снижение удельного расхода воздуха.

Учитывая отмеченное, можно констатировать, что при одинаковых физико-математических описаниях синтезированных пневмоударных механизмов с различным конструктивным исполнением признаков-элементов впуска воздуха в камеру холостого хода должны учитываться различия в ограничениях для площадей проходных сечений каналов впуска. Следовательно, уточнение конструктивного исполнения для площадей каналов-лысок и каналов-пазов прямоугольной, треугольной и криволинейной форм позволяет более точно назначать размеры проходных сечений каналов впуска и их взаимодействие с ударником. То есть можно с некоторым допущением считать, что применение дополнительных расширенных признаков-элементов позволит более точно формулировать задачи поиска, прогнозирования и проектирования, более полно представить физико-математическое описание, ограничения и расчет пневмоударного механизма машины конкретного назначения на любые приемлемые энергетические параметры.

**Выводы.** 1. Предложена классификация дополнительных уточняющих конструктивных признаков-элементов стержня для управления процессами впуском и выпуском воздуха в ПУМ.

2. Формализованная запись устройств ПУМ с управляющим стержнем позволяет определить различия в конструкциях, анализировать и синтезировать новые технические решения с предпочтительными качествами признаков-элементов.

3. В большинстве случаев регулирования площадью проходного сечения канала-лыски либо канала-паза, выполненными с кривизной не ниже второго порядка, обеспечит рациональный расход воздуха в рабочем процессе пневмоударного механизма.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в Э.А., А б р а м е н к о в Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1993. 430 с.

2. Кутумов А.А., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: моногр. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
3. Pat. 29227 Dents. Cylinder – Gestein-bohrmachine ohne Stenermechanismen / W. Hesseln. Publ. 1884.
4. Baril M.A. Note sur les trappeurs pneumatiques // Revnemechaning. 1907. Vol. 20. Pp. 5–20; Vol. 21. Pp. 433–458.
5. Pat. 2979033 USA. Flucd actuated impact tool / R. Bassinger. Publ. 1961.
6. А.с. 1649090 СССР, МКИ Е21C 3/24, Е21B 4/14. Погружное пневмоударное устройство / Э.А. Абраменков, А.А. Липин, В.И. Рукавишников, Д.Э. Абраменков; заявл. 31.05.89; опубл. 15.05.91, Бюл. № 18.
7. А.с. 1046496 СССР, МКИ Е21C37/24, В25D9/00. Пневматическая машина ударного действия / Э.А. Абраменков, В.А. Евполов, Ю.Н. Лебедев и др.; заявл. 17.11.81; опубл. 07.10.83, Бюл. № 27.
8. А.с. 1527410 СССР МПК Е21C3/24. Пневматический молоток / Д.А. Абраменков, Э.А. Абраменков; заявл. 04.01.88; опубл. 07.12.89, Бюл. № 45.
9. А.с. 1596106 СССР МПК Е21C3/24. Пневматический молоток / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков; заявл. 10.03.88; опубл. 30.09.90, Бюл. № 36.
10. Baril M.A. Note sur les trappeurs pneumatiques. Revnemechaning. 1907. Vol. XX. Pp. 5–20; Vol. XXI. Pp. 433–458; 1908. Vol. XXII. Pp. 421–436; Vol. XXIII. Pp. 221–241; 1909. Vol. XXIV. Pp. 223–239; Vol. XXV. Pp. 217–241; 1910. Vol. XXVI. Pp. 205–224; Vol. XXVII. Pp. 503–524; Vol. XXVIII. Pp. 418–441.
11. Абраменков Э.А., Петреев А.М. и др. Принципиальные схемы и основные признаки бесклапанных пневмоударных механизмов // Ручные пневматические машины ударного действия с пониженной вибрацией: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1974. С.11–22.
12. Абраменков Э.А., Корчаков В.Ф. Классификация признаков перепуска пневматических ударных механизмов // Ручные пневматические машины ударного действия: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1982. С. 50–57.
13. Абраменков Э.А. Основные признаки дроссельных пневматических механизмов и их развитие // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1979. № 8. С. 109–114.
14. Абраменков Э.А., Тимофеев Г.Ф. Классификация признаков задержки выпуска в пневматических ударных механизмах // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1987. № 7. С. 96–99.
15. Башлыков Ю.М. Экспериментальное исследование кинематики и динамики клапанных воздухораспределительных устройств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1975. 22 с.
16. Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Абраменков Э.А. Классификационные признаки-элементы пневматических ударных механизмов с трубчатым воздухораспределением // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 83–94.
17. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / изд. перераб.; под ред. Г. Гроше и В. Циглера; пер. с нем. И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. Лейпциг: Тойбнер, 1979; М.: Наука, 1980. 974 с.

**Малышева Юлия Эдуардовна**, вед. инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Абраменков Дмитрий Эдуардович**, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Дедов Алексей Сергеевич**, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Абраменков Эдуард Александрович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 15.04.16

**Malysheva Yuliya Eduardovna**, Leading Engineer

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Abramenkov Dmitriy Eduardovich**, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Dedov Alexey Sergeevich**, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Abramenkov Eduard Alexandrovich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **CLASSIFICATION FEATURES ELEMENTS PNEUMATIC HAMMER MECHANISM WITH A ROD OF AIR DISTRIBUTION**

We consider the proposed classification and its ability to create new designs on the example of the application of core systems and air supply vent.

**К e y w o r d s:** air supply, breather, air distribution, a rod, a sign element, drummer.

## **REFERENCES**

1. А б р а м е н к о в Е.А., А б р а м е н к о в Д.Е. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. пособие [Pneumatic mechanisms of impact machines. Handbook]. Novosibirsk, Publishing house of Novosibirsk State University, 1993. 430 p. (in Russia)
2. К у т у м о в А.А., А б р а м е н к о в Д.Е., А б р а м е н к о в Е.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография [Mounted pneumatic hammers for the development of frozen soils. Monograph]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2008. 376 p. (in Russia)
3. Pat. 29227 Dents. Cylinder – Gestein-bohrmachine ohne Stenermechanismen / W. Hesseln. Publ.1884.
4. B a r i l M.A. Note sur les trappeurs pneumatiques. Revnemechaning. 1907. Vol. 20. Pp. 5–20; Vol. 21. Pp. 433–458.
5. Pat. 2979033 USA. Flucd actuated impact tool / R. Bassinger. Publ. 1961.
6. А.с. 1649090 СССР, MKI E21C 3/24, E21B 4/14. Погружное пневмодарное устройство [Submersible pneumatic impact device] / Е.А. Abramenkov, А.А. Lipin, В.И. Rukavishnikov, D.E. Abramenkov; zayavl. 31.05.89; opubl. 15.05.91, Bull. No. 18. (in Russia)
7. А.с. 1046496 СССР, MKI E21C37/24, B25D9/00. Пневматическая машина ударного действия [Pneumatic percussion machine] / Е.А. Abramenkov, В.А. Evpolov, Yu.N. Lebedev i dr.; zayavl. 17.11.81; opubl. 07.10.83, Bull. No. 27. (in Russia)
8. А.с. 1527410 СССР MPK E21S3/24. Пневматический молоток [Pneumatic hammer] / D.A. Abramenkov, E.A. Abramenkov; zayavl. 04.01.88; opubl. 07.12.89, Bull. No. 45. (in Russia)
9. А.с. 1596106 СССР MPK E21S3/24. Пневматический молоток [Pneumatic hammer] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov; zayavl. 10.03.88; opubl. 30.09.90, Bull. No. 36. (in Russia)
10. B a r i l M.A. Note sur les trappeurs pneumatiques. Revnemechaning. 1907. Vol. XX. Pp. 5–20; Vol. XXI. Pp. 433–458; 1908. Vol. XXII. Pp. 421–436; Vol. XXIII.

- Pp. 221–241; 1909. Vol. XXIV. Pp. 223–239; Vol. XXV. Pp. 217–241; 1910. Vol. XXVI. Pp. 205–224; Vol. XXVII. Pp. 503–524; Vol. XXVIII. Pp. 418–441.
11. Abramenchikov E.A., Petreev A.M. et al. Printsipial'nye skhemy i osnovnye priznaki besklapannykh pnevmouzdarnykh mekhanizmov [Concept and main features of valveless pneumatic percussion mechanisms]. Ruchnye pnevmaticheskie mashiny udarnogo deystviya s ponizhennoy vibratsiey: sb. nauch. tr. IGD SO AN USSR [Manual pneumatic percussion machine with reduced vibration]. Novosibirsk, 1974. Pp. 11–22. (in Russia)
12. Abramenchikov E.A., Korchakov V.F. Klassifikatsiya priznakov perepuska pnevmaticheskikh udarnykh mekhanizmov [Classification of signs bypass pneumatic impact mechanisms]. Ruchnye pnevmaticheskie mashiny udarnogo deystviya: sb. nauch. tr. IGD SO AN USSR [Manual pneumatic puncher]. Novosibirsk, 1982. Pp. 50–57. (in Russia)
13. Abramenchikov E.A. Osnovnye priznaki drossel'nykh pnevmaticheskikh mekhanizmov i ikh razvitiye [Main features of pneumatic throttle mechanisms and their development]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1979. No. 8. Pp. 109–114. (in Russia)
14. Abramenchikov E.A., Timofeev G.F. Klassifikatsiya priznakov zaderzhki vypuska v pnevmaticheskikh udarnykh mekhanizmakh [Classification of signs of the production delays in pneumatic impact mechanisms]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1987. No. 7. Pp. 96–99. (in Russia)
15. Bashlykov Yu.M. Eksperimental'noe issledovanie kinematiki i dinamiki klapannykh vozdukhoraspredelitel'nykh ustroystv [Experimental study of the kinematics and dynamics of valve air distribution devices]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [author. dis. ... cand. tech. sciences]. Tomsk, 1975. 22 p. (in Russia)
16. Malyshova Yu.E., Abramenchikov D.E., Dedov A.S., Abramenchikov E.A. Klassifikatsionnye priznaki-elementy pnevmaticheskikh udarnykh mekhanizmov s trubchatym vozdukhoraspredeleniem [Classification criteria-elements of pneumatic hammer mechanism with the tubular air distribution]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 83–94. (in Russia)
17. Bronshteyn I.N. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of higher]. Transl. of German I.N. Bronshteyn, K.A. Semendyaev. Leyptsig: Toybner, 1979; Moscow, Nauka, 1980. 974 p. (in Russia)
-

# НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 711.4-112 : 72.035 (470)

В.М. МЖЕЛЬСКИЙ

## К ИСТОРИИ ПЕРЕПЛАНИРОВКИ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЦЕНТРОВ МАЛЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ РОССИИ В КОНЦЕ XVIII – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX В.

Рассматривается история перепланировки провинциальных городов России по регулярным планам конца XVIII – первой половины XIX в. Разработчики регулярных планов особое внимание уделяли созданию городского общественного центра, соответствующего новым представлениям о городе и актуальным градостроительным требованиям. Проблема разработки, воплощения и корректировки градостроительных замыслов является предметом данного исследования. Анализируются подходы к проблеме перепланировки городов в связи с их происхождением, сложившимся функциональным зонированием и местными особенностями. Автором проведен сравнительный анализ дорегулярных планировок общественных центров исследуемых городов с их утвержденными и скорректированными регулярными планами.

**Ключевые слова:** малый город, исторический город, общественный центр, регулярный план, торговая площадь, историческое ядро, градоформирующая роль, функциональное зонирование, перепланировка, урегулирование, корректировка.

История масштабных градостроительных преобразований, начатых при Екатерине II, неоднократно являлась объектом исследования советских и российских ученых. Но несмотря на это она до сих пор недостаточно освещена и систематизирована. В частности, недостаточно исследована в данном контексте перепланировка малых исторических городов, которые в конце XVIII – первой половине XIX в. имели статус уездных. Интерес для исследования представляет сам процесс разработки регулярных планов и их воплощения, а также сравнительный анализ предшествующих ситуаций, первоначальных и воплощенных градостроительных замыслов.

Цель исследования – анализ подходов к проблеме перепланировки провинциальных городов России по регулярным планам конца XVIII – первой половины XIX в.

Поставленная цель определила задачи исследования: сопоставить роль городского общественного центра с другими основными градообразующими элементами, провести сравнительный анализ дорегулярных планировок общественных центров исследуемых городов с их утвержденными и скорректированными регулярными планами.

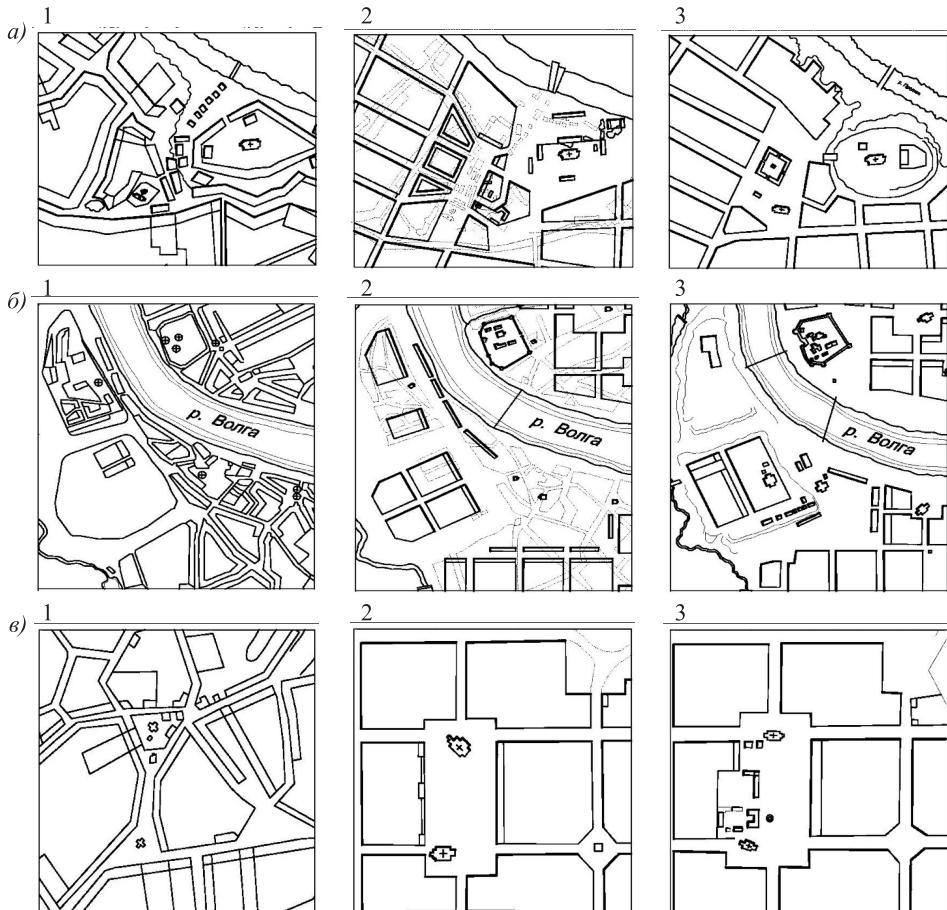
При исследовании исторического города целесообразно особое внимание уделять его общественному центру – наиболее значимому, во многом характеризующему его ключевому элементу. Это касается и малых исторических городов, в которых часто формировался всего один такой центр – место сосредоточения основных общественных функций (духовной, торговой, административной и т.п.).

Облик городского общественного центра предопределяется различными факторами. Один из наиболее важных факторов – происхождение города, история его возникновения и развития. Среди городов России, получивших во времена Екатерины II статус уездных, встречаются и древние городские поселения, возникшие в Средние века (Муром, Сузdalь, Торжок, Углич, Дмитров, Верея, Зубцов, Кинешма), и города, устроенные лишь в Новое время на месте торговых сел, слобод и других негородских поселений (Меленки, Егорьевск, Мышкин, Вязники, Вышний Волочек, Судогда, Подольск). Среди них были довольно крупные, сложившиеся города (Коломна, Серпухов, Вязьма, Переяславль Залесский) и совсем небольшие города-крепости, основанные в большинстве своем в Позднее Средневековье, как окраинные оборонительные форпосты (Скопин, Лух, Епифань, Сапожок, Ряжск).

Для анализа ситуации необходимо сопоставить роль и местоположение сформировавшегося в исследуемый период городского общественного центра с другими основными градообразующими элементами: главными улицами, сложившимся функциональным зонированием, историческим ядром. Соотношение общественного центра города с его историческим ядром в этом контексте показательно, поскольку свидетельствует и о происхождении города, и о его своеобразии, и о том, как в процессе его развития сохранялось либо менялось функциональное зонирование и роль основных градообразующих элементов.

В древнерусском городе историческое ядро, как правило, сосредоточивалось в крепости. И вполне логично, что оно по крайней мере на первых этапах развития поселения вмещало его функциональный и административный центры. В связи с этим оно становилось центральным организующим элементом города. У стен крепости либо внутри нее, как правило, формировалось центральное общественное пространство посада, где размещался городской торг (рынок). Для большинства древнерусских городов характерно близкое соседство средневекового торга и первичного ядра (крепости), что свидетельствует об изначальной важности торговли в городской жизни. Ни одно самодостаточное поселение, будь то город или село, не может существовать и развиваться без экономической базы, основу которой исключительно составляли ремесло (промышленность) и торговля. Именно поэтому торговая площадь, как правило, играла роль общественного центра средневекового города, начиная с ранних этапов его существования [1, с. 4]. И к Новому времени роль этой площади заметно возрастила, в то время как крепости утрачивали свою былую функцию.

То как изменилась планировочная структура исторического и общественного центра того или иного города в результате ее урегулирования, видно при сравнении его дорегулярного и воплощенного регулярного планов. Сами регулярные планы в процессе воплощения могли существенно



Примеры сравнительного анализа планов общественных центров малых исторических городов (чертеж автора)

*a – г. Верея; б – г. Старица; в – г. Малоярославец*

1 – дорегулярный план; 2 – конфirmedенный план конца XVIII в.; 3 – скорректированный план первой четверти XIX в.

корректироваться с учетом условий их реализации. При этом исторический город мог сохранять некоторые элементы своей дорегулярной планировки, либо существенно менял свою структуру. В качестве примера на рисунке приведен сравнительный анализ планов общественных центров трех городов: Верей, Старицы, Кинешмы.

Регулярный город Нового времени отличается от средневекового не только геометрически правильными планировочными элементами, но и тем, что роль его главного функционального центра начинает играть не крепость, а площадь – открытый не изолированный элемент городской архитектурно-пространственной среды, который приобретает в регулярном градостроительстве более четкую, осмысленную структуру. Все это в определенной мере связано с утратой городами того времени военно-оборонительных функций, расцветом торговли, ростом и развитием посада и, следовательно, возрастанием значения торгового и общественного центра.

В связи с этим сформировавшиеся в древности городские торговые центры в большинстве своем сохранили свое прежнее месторасположение,

что можно видеть на примере Коломны, Суздаля, Луха, Углича, Кашина, Кинешмы, Галича и многих других городов. Общегородской торговый центр переносился в сторону от исторического ядра лишь в отдельных случаях. Тот факт, что во многих случаях главная площадь образовывалась за счет расширения, урегулирования и благоустройства средневекового торга, расположенного в городском историческом центре, свидетельствует о том, что составители новых генпланов в той или иной степени считались с дорегулярной планировочной структурой и сложившимся функциональным зонированием города.

Расширяя территории средневековых рынков за счет прилегающей к ним территории посада, благоустраивая их и придавая им геометрически правильную форму, градостроители конца XVIII – начала XIX в. учитывали и подчеркивали значимую роль городских общественных пространств. Например, в Зарайске средневековый торг постепенно преобразовался в ключевой элемент города – центральное общественное пространство, сформировавшееся у стен кремля за счет расширения средневекового торга и объединения его с пространствами перед соседствующими с ним церквями и берегом речки Монастырки.

В процессе градостроительных преобразований конца XVIII в. пространство торга Зарайска расширяется, обретает урегулированный периметр и становится более открытым городу элементом, благодаря утрате крепостных укреплений острога и упорядочению застройки. При этом ретроспективный градостроительный анализ показывает, что в структуре городского центра просматриваются остатки прежних средневековых черт, предопределивших данную ситуацию [2, с. 192–203].

Центральная торговая площадь Верей согласно регулярному плану 1784 г. также значительно расширялась главным образом в западном направлении за счет прилегающей территории посада и приобрела трапециевидные очертания. Между торговой площадью и крепостью были запроектированы кварталы, благодаря чему она стала более обособленным элементом городской структуры. На ней предполагалось выстроить типичное для того времени каре гостиного двора, в связи с чем в изъяснении к плану она и отмечена на рисунке под цифрой 2, как «торговая площадь, на которой гостиный двор» (Полное собрание законов Российской империи (ПСЗРИ). Собрание I. Книга чертежей и рисунков (планы городов). СПб., 1839. № 15).

На дорегулярном плане Верей видно, что ранее ее торговая площадь не имела четкой структуры. Очевидно, к тому времени в городе не сложилось такого крупного торгового центра, как в Коломне, Серпухове или Угличе. Эта площадь выглядела не столько общественным пространством у давно разрушенной и утратившей свою военную функцию крепости, сколько естественным расширением главной улицы у городища и реки, в месте ответвления от нее других основных улиц посада. При этом ее характеризовала непосредственная близость к крепостным валам и рву, а также еще более тесная, чем в последующем, связь с речным берегом и переправой через Протву.

При сравнении регулярного плана Верей 1784 г. с более поздними проектными планами (Российский государственный архив древних актов (РГАДА). Ф. 1356. Оп. 1. Д. 2449. Проектный план города Верей с обозначе-

нием старого строения) заметны несколько отличий. Один из кварталов, примыкающих к центральной площади с южной стороны, был расширен в северном направлении, а другой, наоборот, уменьшен и получил треугольные очертания, из-за чего несколько уменьшилась территория площади и нарушилась симметрия ее планировки. Также был укрупнен квартал со стороны Протвы, который перекрыл улицу, ведущую к речному берегу. Кроме того, был спрятан участок главной улицы от Московской заставы к площади, исчез ее перелом и площадь для помещения полиции, изначально намеченные на регулярном плане. Наконец не были выстроены два треугольных торговых комплекса, запроектированные на плане 1784 г. с юга и севера от каре гостиного двора.

На дорегулярном плане Старицы также не наблюдается крупного, четко выраженного торга. Но согласно конфirmedованному регулярному плану 1772 г. рядом с городищем была запроектирована обширная площадь, раскрытая в сторону реки, которая должна была включать не только пространство средневекового торга, но и значительную часть территории центрального посада (ПСЗРИ. № 350). Позже при корректировке плана территория этой площади была уменьшена главным образом за счет дополнительного ряда кварталов, запроектированного в восточной ее части, что видно на плане 1809 г. (Российский государственный военно-исторический архив (РГВИА). ВУА (21008). Генеральная карта Тверской губернии с приложением городовых планов, сочиненная при губернской чертежной 1809 г. Л. 21). Очевидно, небольшой провинциальный город не нуждался в столь масштабном общественном пространстве. Примечательно, что и на плане Шуи 1792 г., поправленном управляющим губернией «по причине оказавшихся в натуре неудобств к постройке» [3, с. 326], в сравнении с регулярным планом 1788 г. (ПСЗРИ. № 44), пространство Торговой площади также было уменьшено за счет разбивки дополнительного квартала.

В Угличе и Коломне, наоборот, уже в Позднее Средневековье у кремля сложился достаточно крупный торг, который являлся местом схода основных посадских улиц. При разработке регулярных планов этих городов были во многом учтены особенности их сложившейся средневековой структуры, благодаря чему планировка центральной площади, приобретя геометрически правильные очертания, не подверглась значительным изменениям.

Регулярный план Любима получил радиальную структуру, напоминающую угличскую, но кардинально отличающуюся от его порядковой средневековой планировки. Это повлекло за собой и заметные изменения структуры его центральной – торговой площади [4, с. 150–158].

Если новая главная торговая площадь устраивалась вне исторического центра, то и в этом случае она, как правило, делалась самой просторной площадью города, так как она должна была вмещать большое количество народа при многолюдных базарах и ярмарках. Устройству такой площади градостроители, а также городские и губернские власти уделяли особое внимание, что отражено в истории перепланировки и застройки Осташкова, Серпухова, Богородска и других городов [4, с. 166–172].

Как правило, авторами регулярных планов сохранялась, а иногда и еще более усиливалась ориентация основных городских улиц в направлении его торгового центра (Углич, Лух, Солигалич, Любим, Буй, Пошехонье, Нерех-

та), что также в определенной степени подчеркивало значимость последнего в городской планировочной структуре и обеспечивало взаимосвязь с ней [5, с. 50–52]. Если в городе с нецентрической планировочной системой была всего одна главная проезжая улица, то она, как правило, вела к его главной торговой площади (Пронск, Чернь, Галич, Алексин). В городах, где торговая площадь не являлась главным и единственным планировочным центром, также сохранялась ее непосредственная связь с главной или одной из основных улиц-дорог (Кашира, Одоев, Серпухов, Зубцов, Михайлов, Ряжск) [6, с. 128].

Сравнительный анализ дорегулярных и регулярных планировок рассматриваемых городов показывает, что разработчики этих планов по-разному подходили к проблеме их перепланировки. Иногда общественный центр города в соответствии с новыми представлениями подвергался урегулированию в большей степени, чем его окраины (Малоярославец, Бежецк, Можайск, Кашира). Иногда он, наоборот, сохранял сложившиеся средневековые черты (Юрьев-Польский, Углич, Коломна, Кашин, Волоколамск, Епифань, Кинешма).

Утвержденный в 1781 г. регулярный план Кинешмы лишь в общих чертах сохранял сложившееся функциональное зонирование города, а на месте веера средневековых посадских улиц была запроектирована сетка прямоугольных кварталов. Она должна была приобрести геометрически правильную прямоугольную форму и сохранить раскрытие на Волгу. Но позже, к 1811 г. этот план подвергся значительным корректировкам. Об этом, в частности, свидетельствует проектный план Кинешмы, датированный первой четвертью XIX в. [7, с. 184–185], на котором сохранен характер примыкающего к Торговой площади фрагмента веерной планировки центрального средневекового посада. Сохранился общий принцип трассировки его улиц, которые были лишь немного спрятаны и упорядочены. Изменился лишь принцип застройки, которая начала уплотняться и велась отныне по запроектированным красным линиям. Торговая площадь также практически не изменила своих очертаний и размеров. На плане Кинешмы начала 60-х г. XIX в. показано, что в результате город еще в большей степени сохранил средневековые черты, выраженные в частности в переломе Благовещенской улицы [7, с. 185–186].

Архитектурный ансамбль Торговой площади Кинешмы включал в себя группу посадских храмов: Никольского, Крестовоздвиженского, Благовещенского. Расположение на торговой площади группы церквей характерно для сложившихся средневековых городов (Касимов, Кинешма, Лух, Варнавин, Кашин, Углич). Часто такого рода группы формировались постепенно, составляли определенную иерархию архитектурных доминант и отражали историю формирования города [8, с. 24–25].

Разница подходов к проблеме перепланировки городов заключалась и в том, что при урегулировании городской планировочной структуры либо сохранялось прежнее месторасположение общегородских торговых центров, а значит и прежнее функциональное зонирование, либо устраивалась новая главная торговая площадь в стороне от исторического ядра, часто при утрате средневековым торгом своей былой градоформирующей роли.

Главные площади, образованные в историческом центре на месте средневековых рынков, по соседству с крепостными валами и рвами, во многих случаях частично сохраняли элементы дорегулярной планировки (Кинешма, Дмитров, Юрьев-Польский, Волоколамск, Епифань). Кроме того, многие площади исторически соседствовали с берегами рек и другими элементами природного ландшафта, которые также определяли их планировочную структуру (Зубцов, Алексин, Кашин).

Новая главная торговая площадь, устроенная в стороне от средневекового центра поселения, целиком являлась произведением регулярного градостроительства (Серпухов, Звенигород, Осташков, Кашира, Одоев). Иногда такого рода площади начинали формироваться еще в дорегулярный период (Осташков, Малоярославец) [9, с. 35–37, 39], но в большинстве своем они лучше подвергались перепланировке, чем древние, соседствующие с первичным ядром или входящие в его состав и часто включающие в себя элементы средневековой планировки и сложившиеся архитектурные доминанты. Эти новые площади, как правило, имели четкий регулярный периметр и правильную геометрическую форму, не обусловленную частично сохранившимися средневековыми планировочными элементами. То же относится к площадям уездных городов, устроенных на месте сельских поселений (Бронницы, Богородск, Егорьевск, Подольск).

Исследование позволяет сформулировать следующие выводы: характер планировки городского общественного центра в каждом конкретном случае зависел от его градоформирующей роли и месторасположения в городе, от происхождения, особенностей и потребностей самого города, а также от подходов разработчиков регулярных планов к проблеме урегулирования планировочных структур городов; сравнительный анализ первоначальных замыслов с осуществленными показал, что иногда, для того чтобы регулярный план соответствовал сложившейся градостроительной ситуации и реальным потребностям города, его приходилось существенно корректировать в целях достижения компромисса между прежней ситуацией и новым проектом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мокеев Г.Я. Черты своеобразия в структурах городов восточных и западных славян // Архит. наследство. 1975. № 23. С. 3–13.
2. Мжельский В.М. Особенности архитектурно-пространственной структуры центра Зарайска рубежа XVIII–XIX вв.// Архит. наследство. 2008. № 49. С. 188–203.
3. Москва и сложившиеся русские города / под ред. Н.Ф. Гуляницкого. М.: Стройиздат, 1998. 439 с.
4. Швариков В.А. Планировка городов России XVIII и начала XIX века. М.: Изд-во Всесоюз. акад. архитектуры, 1939. 256 с.
5. Исторические города и села Костромской области / под ред. С.Н. Конопатова. Кострома: Комитет по охране и использ. ист.-культ. наследия, 2004. 222 с.
6. Разумовский Ф.В. На берегах Оки. М.: Изд-во «Искусство», 1988. 216 с.
7. Мжельский В.М. Черты преемственности и своеобразия в архитектурно-пространственной композиции исторического центра Кинешмы рубежа XVIII–XIX веков // Архит. наследство. 2010. № 52. С. 177–189.

8. Мжельский В.М. Типология торговых площадей уездных городов России конца XVIII – первой половины XIX в. // Архитектура. Строительство. Дизайн. 2007. № 4 (49). М.: Междунар. Ассоц. Союза Архитекторов. С. 20–25.
9. Васильев А.А., Меленчук Л.В. Малоярославец. История и современность. Калуга: Изд-во «Фридгельм», 2002. 246 с.

**Мжельский Виктор Михайлович**, архитектор; E-mail: vickt.mj@yandex.ru  
ООО «ТЭЗИС»

Получено после доработки 28.04.16

**Mzhel'skiy Viktor Mikhaylovich**, Architect; E-mail: vickt.mj@yandex.ru  
Ltd «TEZIS»

## **THE HISTORY OF REPLANNING OF PUBLIC CENTERS OF SMALL HISTORICAL CITIES IN RUSSIA IN THE END OF XVIII – 1<sup>st</sup> HALF OF XIX CENTURY**

The paper presents the history of replanning of provincial cities in Russia in accordance with regular plans in the end of XVIII – 1<sup>st</sup> half of XIX century. The developers of regular plans paid special attention to creation of city public centers, corresponding to new ideas about the city and actual town-planning requirements. These plans were developed in accordance with historical reality of that time. The problem of development, adjustment and realization of town-planning design is the object of present investigation. Particularly, the approaches to the problem of replanning of cities, depending on their origin, functional zoning and local peculiarities are analyzed in the present paper. The author made comparative analysis of pre-regular public centers plans of studied cities with their approved regular plans.

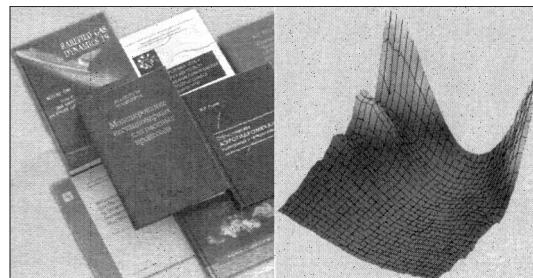
**К e y w o r d s:** small city, historical city, public center, regular plan, merchant's square, historical core, city-forming role, functional zoning, replanning, settlement, adjustment.

### **REFERENCES**

1. Мокеев Г.Я. Cherty svoeobraziya v strukturakh gorodov vostochnykh i zapadnykh slavyan [Features originality in the structure of the city Eastern and Western Slavs]. Arkhitekturnoe nasledstvo [Architectural heritage]. 1975. No. 23. Pp. 3–13. (in Russia)
2. Mzhe'l'skiy V.M. Osobennosti arkitekturno-prostranstvennoy struktury tsentra Zarayska rubezha XVIII–XIX vv. [Features Saransk center architectural and spatial structures abroad XVIII–XIX centuries]. Arkhitekturnoe nasledstvo [Architectural heritage]. 2008. No. 49. Pp. 188–203. (in Russia)
3. Moskva i slozhivshiesya russkie goroda. Pod red. N.F. Gulyanitskogo [Moscow and developed Russian cities. Ed. N.F. Gulyanitskiy]. Moscow, Stroyizdat, 1998. 439 p. (in Russia)
4. Shkvarikov V.A. Planirovka gorodov Rossii XVIII i nachala XIX veka [Disposition XVIII Russian cities and the start of the XIX century]. Moscow, Publishing house of the All-Union Academy of Architecture, 1939. 256 p. (in Russia)
5. Istoricheskie goroda i sela Kostromskoy oblasti. Pod red. C.N. Konopatova [Historic towns and villages of the Kostroma region. Ed. S.N. Konopatov]. Kostroma, The Committee on the Protection and Use of Historical and Cultural Heritage, 2004. 222 p. (in Russia)
6. Razumovskiy F.V. Na beregakh Oki [On the banks of the Oka]. Moscow, Publishing house «Art», 1988. 216 p. (in Russia)

7. M z h e l' s k i y V.M. Cherty preemstvennosti i svoeobraziya v arkitekturno-prostranstvennoy kompozitsii istoricheskogo tsentra Kineshmy rubezha XVIII–XIX vekov [Features of continuity and identity in architectural and spatial composition of the historic center of Kineshma abroad XVIII–XIX centuries]. Arkhitekturnoe nasledstvo [Architectural heritage]. 2010. No. 52. Pp. 177–189. (in Russia)
  8. M z h e l' s k i y V.M. Tipologiya torgovykh ploshchadey uezdnykh gorodov Rossii kontsa XVIII–pervoy poloviny XIX v. [Russia Typology of retail space provincial towns the end of XVIII – first half XIX centuries]. Arkhitektura. Stroitel'stvo. Dizayn [Architecture. Building. Design]. 2007. No. 4(49). Pp. 20–25. (in Russia)
  9. V a s i l' i e v A.A., M e l e n c h u k L.V. Maloyaroslavets. Iстoriya i sovremennost' [Maloyaroslavets. Past and Present]. Kaluga, Publishing house «Fridge'l'm», 2002. 246 p. (in Russia)
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 627.45.001.24

А.А. АТАВИН, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.П. ЯНЕНКО

### ОБ ОТДЕЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ «АКТУАЛИЗИРОВАННОЙ РЕДАКЦИИ СНиП 2.06.07–87»

Анализируются отдельные положения действующего на данный момент времени СНиП 2.06.07–87 в части вопросов расчета габаритных размеров камер судоходных шлюзов и скоростей движения в камере шлюзующегося судна. Отмечается, что приведенные в этом нормативном документе рекомендации по расчету габаритных размеров камер шлюза даны без учета гидродинамических явлений, происходящих в камере шлюза при движении судна.

На основе теоретических и экспериментальных исследований этих явлений авторы предлагают свой способ расчета габаритных размеров камер судопропускных сооружений.

**Ключевые слова:** судоходный шлюз, СНиП, проектирование шлюзов, пропускная способность шлюза, скорости движения судна в камере шлюза, определение габаритов шлюза.

Специалистам в области проектирования и эксплуатации судоходных шлюзов известно, что с 1 января 2013 г. вступила в силу «Актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87», которая носит название «СП 101.13330.2012 Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» [1].

В этом нормативном документе в приложении В приведены рекомендации по определению грузооборота, судооборота и пропускной способности шлюза. Отмечается, что пропуск судна через шлюз может производиться при одностороннем или двустороннем шлюзовании. Указываются рекомендации по расчету времени цикла как одностороннего, так и двустороннего шлюзования, включающего «техническую» и «движженческую» составляющие этого цикла. Причем в состав «движженческой» составляющей входит время ввода судна в шлюз, вывода из него и перехода из камеры в камеру для случая многокамерного шлюза.

В соответствии с этими рекомендациями для предварительных расчетов грузопропускной способности проектируемого шлюза в таблице В.1 указаны средние значения скоростей движения судна в камере судопропускного сооружения, рекомендуемые для входа самоходного судна в камеру (чаще

всего выступающее в качестве расчетного при проектировании конкретного шлюза) – 1,0 м/с; для выхода судна из камеры шлюза – 1,4 м/с. Если шлюз многокамерный, скорость перехода самоходного судна из камеры в камеру рекомендуется принимать равной 0,75 м/с.

Однако необходимо отметить, данные многочисленных натурных наблюдений и экспериментальных исследований [2–6] говорят о том, что реальные значения скоростей движения судов в камерах судопропускных сооружений намного ниже рекомендуемых. В связи с этим реальная пропускная способность шлюзов оказывается ниже расчетных величин, что со временем может привести к существенным экономическим издержкам. Это происходит потому, что все рекомендуемые значения скоростей движения судна в камерах судопропускных сооружений взяты без учета гидродинамических процессов, происходящих в них при движении судна.

В свое время по заданию Ленинградского отделения Института «Гидро-проект» в Новосибирске были проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования этих процессов. В работе по этим вопросам принимали участие сотрудники Института гидродинамики Сибирского отделения Российской академии наук и Новосибирского инженерно-строительного института.

В результате проведенных исследований было установлено, что скорости движения судна в камере шлюза ограничены, с одной стороны, так называемой критической скоростью вывода  $v_c^{kp}$ . Заметим, что понятие критической скорости вывода судна из камеры шлюза было введено в результате анализа гидродинамических явлений, происходящих в камере шлюза при выводе судна из камеры. При этой операции наблюдается «поршневой эффект»: уровень воды за кормой судна начинает интенсивно понижаться в процессе вывода судна из камеры и возникает опасность посадки судна на дно камеры. В силу этих причин скорость вывода судна из камеры шлюза не должна превышать ее критической величины, а сам процесс вывода судна из камеры шлюза должен быть расчетным при определении глубины воды в камере шлюза.

Величину критической скорости вывода судна из камеры шлюза следует определять с помощью выражения (1), полученного в результате проведенных теоретических исследований [7, 9]:

$$v_c^{kp} = \frac{3}{8} \frac{h_k - T_c}{\Omega_c} \sqrt{gB_k(B_k h_k - \Omega_c)}. \quad (1)$$

С другой стороны, скорость движения судна в камере шлюза ограничена максимальной скоростью, которую может развивать судно в камере. Эта скорость зависит от величины тяговых усилий –  $F_{max}$ , которые развиваются силовые установки расчетного судна или же механизмы ввода судна в камеру шлюза, а также от габаритных размеров камеры шлюза. Значение максимальной скорости движения судна в камере шлюза определяется с помощью выражения (2), также полученного в результате проведенных исследований:

$$v_c^{max} = (1 + \varepsilon^*) \frac{F_{max}}{\gamma_B \Omega_c^2} \sqrt{gB_k(B_k h_k - \Omega_c)}, \quad (2)$$

где  $h_k$  – глубина воды в камере шлюза;

$T_c$  – осадка судна;

$\Omega_c$  – площадь судна по миделю;

$B_k$  – ширина камеры шлюза;

$F_{max}$  – максимальная величина тяговых усилий;

$$\varepsilon_* = \frac{\mu_*}{\mu_* + \mu_c}, \quad \mu_* = \frac{B_{pk} C_{pk}}{B_k C_k}, \quad \mu_c = \sqrt{1 - \sigma_c}, \quad \sigma_c = \frac{\Omega_c}{B_k h_k},$$

$C$  – скорость распространения малых возмущений в подходном канале или камере шлюза с соответствующими индексами «пк» или «к»,  $C = \sqrt{g \frac{\omega}{B}}$ ,

$\omega$  – площадь камеры шлюза или подходного канала с соответствующими индексами,  $B$  – ширина камеры шлюза или подходного канала поверху также с соответствующими индексами.

Расчеты по определению скоростей движения расчетного судна в камере шлюза показали высокое совпадение с данными экспериментальных исследований. В силу этих причин, с нашей точки зрения, при расчете пропускной способности шлюза рекомендуемые значения скоростей движения судна в камере шлюза, указанные в таблице В.1 рассматриваемого нормативного документа, следует уточнять по приведенным выше зависимостям после назначения габаритных размеров камер шлюза.

Заметим, что приложение Г этого СНиПа посвящено именно определению габаритов шлюзов. Как отмечено в этом приложении, оно рекомендуется в качестве основного при принятии решения по размерам камер шлюза. Причем основные габариты шлюзов (полезная длина и ширина камеры, а также глубина на порогах) должны отвечать характеристикам расчетных судов.

Однако при принятии габаритных размеров камеры шлюза возникает естественный вопрос, а в реальности будут ли в этом шлюзе суда двигаться с той скоростью, которая рекомендуется в таблице В.1 данного нормативного документа. Наши исследования показывают, что реальная скорость движения судов в камере шлюза будет намного меньше рекомендуемой. Следовательно, реальная грузопропускная способность этого шлюза не будет соответствовать расчетным значениям.

Все дело в том, что скорость движения судна в камере шлюза целиком и полностью зависит, согласно выражениям (1, 2), от габаритных размеров как камеры шлюза, так и шлюзующегося судна, т.е. от ширины камеры шлюза, глубины воды на пороге, ширины шлюзующегося судна и его осадки. А если это так, тогда при определении габаритных размеров шлюза следует учитывать эти факторы.

При определении габаритов камеры шлюза, а именно глубины воды на пороге, расчетным случаем должен быть случай вывода судна из камеры, так как именно при этой операции возникает опасность посадки судна на дно камеры шлюза, если скорость вывода судна превысит ее критическую величину (1).

Авторы статьи в работах [8, 9] провели преобразования выражения (1), а именно для придания этой зависимости универсального характера ввели безразмерные переменные (относительные величины):

$$v_* = \frac{v_c}{\sqrt{gT_c}}; \quad b_* = \frac{B_k T_c}{\Omega_c}; \quad h_* = \frac{h_k}{T_c}. \quad (3)$$

После их подстановки в (1) получили

$$v_* = \frac{3}{8} (h_* - 1) \sqrt{b_* (b_* h_* - 1)}. \quad (4)$$

Эта зависимость представлена на рисунке в виде серии кривых в плоскости  $(v_*, h_*)$ , различающихся значениями параметра  $b_*$ .

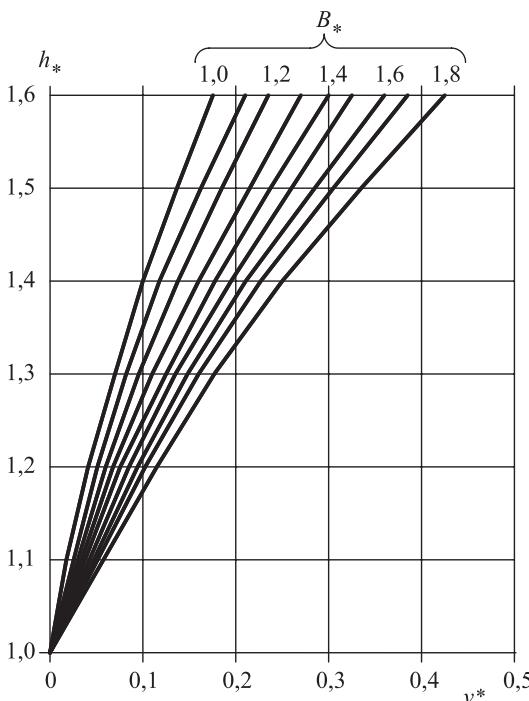


График для определения размеров поперечного сечения камеры судопропускных сооружений

ширина камеры  $b_*$  с помощью графика на рисунке находится относительная глубина  $h_*$  (в случае необходимости проводится линейная интерполяция по параметру  $b_*$ ).

5. На заключительном этапе определяется глубина воды в камере шлюза  $h_k$  по формуле

$$h_k = h_* T_c.$$

Таким образом, в результате расчета получаются значения ширины камеры  $b_k$  и глубины воды в ней  $h_k$ , обеспечивающие возможность движения судна в камере с заданной скоростью  $v_c$ . В полном соответствии с рекомендациями рассматриваемого нормативного документа после этого осуществляется

С нашей точки зрения, именно этот график следует использовать для нахождения габаритных размеров камер шлюзов. Для этого необходимо знать размерения расчетного судна: ширину  $b_c$ , его осадку  $T_c$  и площадь погруженного поперечного сечения судна по миделю  $\Omega_c$ .

Расчет проводится в следующем порядке.

1. В полном соответствии с рекомендациями рассматриваемого нормативного документа [1] определяется полезная ширина камеры шлюза  $b_k$ .

2. В соответствии с (3) вычисляется относительная ширина камеры шлюза  $b_*$ .

3. Задается расчетная скорость движения судна в камере шлюза  $v_c$  и затем в соответствии с (3) определяется относительная скорость движения судна  $v_*$ .

4. По относительной скорости судна  $v_*$  и относительной

округление габаритных размеров камеры шлюза в сторону их увеличения до ближайших размеров, приведенных в таблице Г.1.

Подводя итог, заметим, что данный нормативный документ служит для предварительного назначения габаритных размеров камер шлюза и расчета его пропускной способности. Однако необходимо с помощью предлагаемой в этой работе методики уточнить значения габаритных размеров камеры шлюза, в особенности глубины воды на пороге шлюза, тех скоростей, которые будут в ней наблюдаться, и затем скорректировать величину реальной пропускной способности проектируемого шлюза. А на заключительном этапе ответить на вопрос – удовлетворит ли данная пропускная способность шлюза заказчиков его строительства.

Если ответ будет отрицательным, следует изменить габаритные размеры камеры шлюза (особенно глубину воды на пороге) в сторону увеличения и затем определить реальную пропускную способность шлюза с измененными размерами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 101.13330.2012 Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.03.07–87 / ОАО «Институт Гидропроект». Санкт-Петербург, 2012.
2. Кирьяков С.С., Тимошина В.И., Белякова Т. Допустимые скорости движения судов в шлюзах // Речной транспорт. 1975. № 8. С. 44–45.
3. Клюев В., Гапеев А. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Речной трансп. 1980. № 11. С. 38–39.
4. Атавин А.А., Васильев О.Ф. Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением его камер // Гидравлические и гидродинамические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений: тез. докл. междунар. симп. СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники, 2002.
5. Романов Е.М., Яненко А.П. О некоторых результатах экспериментального исследования условий ввода судна большой грузоподъемности в камеру судопропускного сооружения // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1975. № 10. С. 101–104.
6. Атавин А.А., Яненко А.П. О скоростях движения судна в камере судоходного шлюза при расчете его пропускной способности // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 60–66.
7. Атавин А.А., Яненко А.П. О колебаниях уровня воды при выводе судна из камеры судопропускного сооружения // Динамика сплошной среды. Новосибирск, 1977. Вып. 30. С. 35–52.
8. Атавин А.А., Васильев О.Ф., Яненко А.П. Гидродинамические процессы в судопропускных сооружениях. Новосибирск: Наука, 1993. 327 с.
9. Атавин А.А., Букреев В.И., Васильев О.Ф., Дегтярев В.В., Яненко А.П. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография. Новосибирск, 2009.

**Атавин Аркадий Анатольевич**, канд. техн. наук, доц., директор Новосибирского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН

**Дегтярев Владимир Владимирович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Яненко Аркадий Петрович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 19.02.16

**Atavin Arkadiy Anatol'evich**, PhD, Ass. Professor, Director of Novosibirsk Branch of Institute for Water and Ecological Problems of SB RAS, Russia

**Degtyarev Vladimir Vladimirovich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Yanenko Arkadiy Petrovich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **ABOUT SEPARATE PROVISIONS «THE UPDATED EDITION CONSTRUCTION NORMS AND REGULATIONS 2.06.07–87»**

Separate provisions of time operating at the moment Construction Norms and Regulations 2.06.07–87 regarding questions of calculation of overall dimensions and speeds of the movement in chambers of navigable locks are analyzed. It is noted that the recommendations about calculation of overall dimensions of chambers of a lock provided in his normative document are made without the hydrodynamic phenomena occurring in a lock chamber at the movement of the vessel.

On the basis of theoretical and pilot studies of these phenomena authors offer the way of calculation of overall dimensions of chambers of navigable hydraulic structures.

**K e y w o r d s:** navigable lock, Construction Norms and Regulations, design of locks, throughput of a lock, speed of the movement of the vessel in the lock chamber, definition of dimensions of a lock.

## **REFERENCES**

1. SP 101. 13330. 2012 Podpornye steny, sudokhodnye shlyuzy, rybopropusknnye i rybozashchitnye sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.07.–87. OAO «Institut Gidroproekt» [Set of Rules 101.13330.2012 Retaining walls, navigable locks, skipping fish and fish protection structures. The updated edition of Construction Norms and Regulations 2.03.07–87. JSC «Institut Hidroproject»]. Saint-Petersburg, 2012. (in Russia)
2. Kir'yakov S.S., Timoshina V.I., Belyakova T. Dopustimye skorosti dvizheniya sudov v shlyuzakh [Admissible speeds of the movement of courts in locks]. Rechnoy transport [River transport]. 1975. No. 8. Pp. 44–45. (in Russia)
3. Klyuev V., Gapayev A. Uskorenie propuska sudov cherez shlyuzy [Acceleration of the admission of courts through locks]. Rechnoy transport [River transport]. 1980. No. 11. Pp. 38–39. (in Russia)
4. Atavin A.A., Vasilev O. F. Otsenka vozmozhnykh posledstviy avariya na sudokhodnom shlyuze, svyazannykh s razrusheniem ego kamer [Evaluation of possible consequences of the accidents on a navigable gateway associated with the destruction of its chambers]. Gidravlicheskie i gidrodinamicheskie aspekty nadezhnosti i bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzheniy. Tez. dokl. mezhdunar. simp. [Hydraulic and hydrodynamic aspects of reliability and safety of hydraulic structures: Proceedings of the International Symposium]. Saint-Petersburg, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering, 2002. (in Russia)
5. Romanov E.M., Yanenko A.P. O nekotorykh rezul'tatakh eksperimental'nogo issledovaniya usloviy vvoda sudna bol'shoj gruzopod'yemnosti v kameru sudopropusknogo sooruzheniya [About some results of experimental studies of conditions

- of an entrance of the vessel with big loading capacity, in the camera of navigation pass]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1975. No. 10. Pp. 101–104. (in Russia)
6. Atavin A.A., Yanenko A.P. O skorostyakh dvizheniya sudna v kamere sudokhodnogo shlyusa pri raschete ego propusknoy sposobnosti [About speeds of the movement of the vessel in the camera of a navigable lock at calculation of its capacity]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 7. Pp. 60–66. (in Russia)
7. Atavin A.A., Yanenko A.P. O kolebaniyakh urovnya vody pri vyvode sudna iz kamery sudopropusknykh sooruzheniy [About fluctuations of water level at a vessel conclusion from the camera of a shipping building]. Dinamika sploshnoy sredy [Dynamics of the continuous environment]. Novosibirsk, 1977. Fasc. 30. Pp. 35–52. (in Russia)
8. Atavin A.A., Vasil'ev O.F., Yanenko A.P. Gidrodinamicheskie protsessy v sudopropusknykh sooruzheniyakh [Hydrodynamic processes in shipping facilities]. Novosibirsk, Nauka, 1993. (in Russia)
9. Atavin A.A., Bukreev V.I., Vasil'ev O.F., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Gidrodinamicheskie aspekty neshtatnykh i avariynykh situatsiy na gidrotehnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya [Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions: monograph]. Novosibirsk, 2009. (in Russia)
-

УДК 624.073.042

М.Н. ДАНИЛОВ, В.В. АДИЩЕВ

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ\*

Выполнен сравнительный анализ нескольких математических моделей многослойных пластин, доступных в ПК ANSYS. Сопоставлены результаты расчетов, полученные с использованием полных математических моделей и упрощенных моделей, в основе которых лежит теория многослойных пластин, предполагающая выполнение процедуры осреднения свойств. Даны рекомендации по использованию различных моделей и установлены диапазоны толщин и жесткости среднего слоя, в которых эти модели применимы. Выполнен анализ собственных частот и форм колебаний конструкции.

**Ключевые слова:** многослойные пластины, сэндвич-панели, численное моделирование, динамика, собственные частоты и формы колебаний, ANSYS.

**1. Введение.** Многослойные конструкции в настоящее время широко применяются в строительстве в качестве ограждающих конструкций жилых, общественных и промышленных зданий. Это объясняется тем, что они являются наиболее рациональными с точки зрения обеспечения минимума веса, расхода материалов и стоимости при высоких показателях прочности и жесткости [1]. Конструкции, обеспечивающие высокий уровень теплоизоляции [2], не всегда удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к строительным конструкциям.

Высокие требования по пожаро- и взрывостойкости предъявляются, например, к газонаполнительным станциям. Их строительные конструкции должны быть устойчивыми к воздействию ударных волн, пожаростойкими, иметь малый вес и высокую прочность, а также не допускать возможности катастрофического разрушения с фрагментацией.

Особые требования предъявляются к сейсмостойкости конструкций высотных зданий. Известно, что с увеличением высоты здания возрастает сила сейсмического воздействия на конструкции. Низшая частота колебаний сэндвич-панелей может совпадать с частотой сейсмических колебаний. При этом может возникнуть эффект резонанса и как следствие разрушение конструкции.

Поведение сэндвич-панелей при действии на них взрывных и сейсмических нагрузок не является достаточно изученным. Их использование в рассматриваемых зданиях требует дополнительного обоснования. Достоверность оценки величины нагрузки во многом зависит от точности и полноты используемой математической модели исследуемой конструкции и исполь-

---

\* Работа выполнена в рамках гранта «Поддержка научных исследований молодых ученых» на 2014–2015 гг. Соглашение на предоставление гранта от 25 декабря 2014 г. № 1.

зумого метода расчета. Работа [3] посвящена проблеме численного моделирования ударно-волновых течений в окрестности плохообтекаемых тел.

В [1, 4] описана методология численного исследования напряженно-деформированного состояния строительных сэндвич-панелей при статических нагрузках и представлены результаты расчетов этих конструкций как без учета, так и с учетом физической нелинейности свойств материалов.

Настоящая работа является продолжением предыдущих [1–4] и посвящена исследованию динамического отклика многослойных конструкций на воздействие импульсных нагрузок.

Данное направление исследований – весьма актуально, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [5–14] как отечественных, так и зарубежных исследователей. В [5] приводится обзор работ, посвященных исследованиям в области нелинейных колебаний многослойных пластин и оболочек при периодических воздействиях.

Обзор публикаций по теме настоящего исследования показал наличие малого количества изданий по экспериментальным исследованиям работы многослойных пластин при воздействии на них статических и динамических нагрузок. Большая часть работ посвящена экспериментальным исследованиям отклика многослойных пластин при воздействии на них статических нагрузок. Например, в [6] проводилось экспериментальное определение физико-механических характеристик элементов трехслойной панели со средним слоем из базальтовой ваты. Работы [7–9] посвящены экспериментальному исследованию отклика слоистых конструкций на ударное воздействие. В [10] исследован отклик многослойной пластины на ударно-волновую нагрузку от взрыва. В исследованиях [11, 12] экспериментально изучены колебательные процессы в многослойных пластинах.

Большое количество исследований связано с численным моделированием динамики многослойных оболочек и пластин, например [13, 14].

Данная статья включает исследование динамики трехслойных сэндвич-панелей и определение областей применимости некоторых математических моделей.

Решение задач динамики многослойных пластин сопряжено с рядом трудностей. Сочетание в одной конструкции физически нелинейных материалов с существенно различающимися свойствами затрудняет построение новых и использование существующих математических моделей. Примером подобного материала могут быть минераловатные плиты, которые имеют ярко выраженную физическую нелинейность и обладают свойствами демпфирования и гашения упругих волн. Многие математические модели многослойных пластин построены на принципе осреднения свойств материалов слоев. Точность и адекватность результатов расчетов с использованием таких моделей определяется степенью различия свойств материалов слоев – чем существеннее различие, тем больше вероятность получения некорректного результата.

В связи с увеличившейся вычислительной мощностью современных ЭВМ для решения задач динамики активно применяется метод конечных элементов и более полные математические модели, учитывающие основные особенности динамических процессов.

Целью работы является определение областей применимости различных математических моделей многослойных пластин, имеющихся в программном комплексе ANSYS Mechanical, а также сравнение методов решения задач динамики многослойных пластин.

**2. Объект исследования и постановка задачи.** В настоящей работе рассматриваются трехслойные стеновые сэндвич-панели (рис. 1), состоящие из стальных профилированных листов (1, 2) и теплоизоляционного слоя (3), который выполнен из материала типа пенополистирола. Металлические листы соединены со средним слоем с помощью синтетического клея. Рассматриваются панели шириной  $B = 1,0$  м, длиной  $L = 3$  м. Толщина среднего слоя  $H = 100$  мм; толщина металлических листов  $\delta = 0,7$  мм.

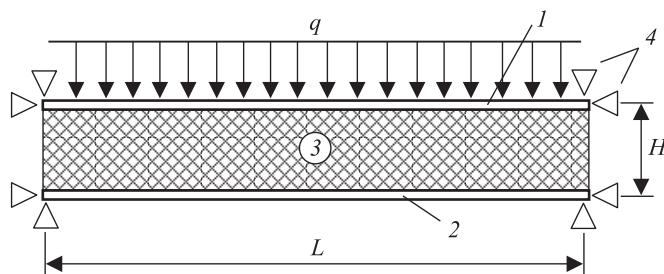


Рис. 1. Схема нагружения «классической» трехслойной стеновой панели

1 – наружная металлическая обшивка; 2 – внутренняя металлическая обшивка; 3 – утеплитель; 4 – места закрепления

Физико-механические свойства стали: плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 210$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Панель закреплена по двум сторонам, как показано на рис. 1. На верхнюю обшивку панели действует импульсная нагрузка  $q(x, y, t)$ . Величина нагрузки, законы ее изменения во времени и распределения по поверхности панели определяются видом взрывного процесса. Исследуется поведение панели при действии равномерно распределенной по поверхности нагрузки в виде короткого импульса с постоянной по времени амплитудой.

Требуется определить динамический отклик конструкции на воздействие нагрузки – частоты колебаний, формы колебаний, зависимости перемещений точек конструкции от времени.

**3. Методика решения задачи и математическая модель.** Расчеты проведены с применением программного комплекса ANSYS 17.1<sup>1</sup>. Использовались модули ANSYS Mechanical и Autodyn.

Математическое моделирование механической реакции многослойных конструкций на импульсные нагрузки основано на методе конечных элементов [15].

Движение конструкции описывается системой уравнений динамики [15]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где  $M$  – матрица масс;

$C$  – матрица демпфирования;

$K$  – матрица жесткости;

$u$  – вектор перемещений;

<sup>1</sup> ACADEMIC Research, Custom number 531493.

$F$  – вектор внешних сил;

$t$  – время.

В ANSYS доступны два метода решения задачи динамики: полный метод и метод суперпозиции мод.

Полный метод предполагает решение системы уравнений динамики (1). При этом имеется возможность учета физической, геометрической и конструктивной нелинейностей, что требуется при решении большинства задач механики оболочек и пластин.

Схема прямого интегрирования уравнения движения по времени, используемая в программе ANSYS Mechanical, является неявной и базируется на методе Ньюмарка [16]. В программе Autodyn используется явная центрально-разностная схема интегрирования.

Метод суперпозиции мод предполагает, что решение для перемещений может быть получено в виде линейной комбинации (суперпозиции) собственных форм колебаний (описываемых вектором перемещений), умноженных на соответствующие амплитудные коэффициенты. Вектор перемещений  $\{u(t)\}$  рассматривается как сумма произведений амплитудных коэффициентов (относительных смещений для  $i$ -й собственной формы)  $y_i(t)$  и собственных векторов  $\{\varphi_i\}$ :

$$\{u(t)\} = y_1(t)\{\varphi_1\} + y_2(t)\{\varphi_2\} + \dots + y_p(t)\{\varphi_p\}. \quad (2)$$

Каждый вектор имеет  $n$  компонент ( $n$  равно числу главных степеней свободы), а число слагаемых  $p \leq n$ .

Недостатками метода суперпозиции мод являются невозможность учета нелинейностей, невозможность использования переменного шага по времени. Достоинство метода – высокая скорость вычислений.

Решение системы уравнений динамики (1) в совокупности с использованием полной 3D модели для описания работы рассматриваемой конструкции требует наличия соответствующих компьютерных ресурсов и значительных временных затрат. Поэтому в данной работе часть динамических расчетов проводилась методом суперпозиции. В этом случае решалась следующая система уравнений

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\varphi_i\} = \{0\}. \quad (3)$$

Здесь  $\omega_i$  – это собственные круговые частоты (рад/с);  
 $i$  – номер собственной частоты и соответствующей ей формы колебаний, изменяющийся в диапазоне от 1 до  $n$ .

Собственные частоты  $f_i$  рассчитываются по формуле

$$f_i = \omega_i / 2\pi \text{ (Гц).} \quad (4)$$

Перемещения, получаемые в результате определения форм колебаний, вычисляются в относительных единицах. Вычисление собственных значений и векторов выполняется методом Ланцшоша [17].

Для решения поставленной задачи используются следующие алгоритмы:

1) интегрирование системы уравнений движения (1) с применением неявной схемы;

2) интегрирование системы уравнений движения (1) с применением явной схемы;

3) решение поставленной задачи методом суперпозиции собственных форм колебаний.

В ANSYS имеются следующие способы моделирования рассматриваемой конструкции:

1. Полная 3D-модель, предполагающая использование объемных конечных элементов (КЭ). Использование этой модели затруднительно, так как обшивки имеют малую толщину и при их дискретизации соотношение размеров сторон элементов будет превышать 1:10, что приведет к накоплению погрешностей. Для дискретизации обшивок на сетку КЭ с соблюдением вышеуказанного требования к соотношению сторон необходимо большое количество элементов. Используются 8- и 20-узловые изопараметрические элементы формы гексаэдра (называющиеся в программном комплексе ANSYS «solid185» и «solid186» соответственно).

2. Упрощенная модель, построенная на основе теории многослойных оболочек и пластин и предполагающая использование оболочечных КЭ с осредненными характеристиками свойств материалов по слоям. Использование этой модели позволяет существенно упростить и ускорить решение задачи, значительно уменьшив ее размер (количество узлов). Используются 4- и 8-узловые элементы-оболочки прямоугольной формы – «shell181» и «shell281» соответственно. Также используется 8-узловой элемент формы гексаэдра. Элемент «solsh190», как и элементы «shell181» и «shell281», имеет в своей основе теорию оболочек Миндлина–Рейснера [18, 19]. Отличием элемента «solsh190» от элементов «solid185» и «solid186» является то, что этот элемент основан на теории пластин и для моделирования многослойной пластины с помощью этого КЭ достаточно одного элемента по толщине.

3. Используется также комбинация полной 3D-модели (объемные КЭ) для среднего слоя и упрощенной оболочечной модели для обшивок панели. Такой подход является наиболее эффективным. В этом случае нет необходимости использования осреднения свойств материалов по слоям.

Таким образом, для выполнения расчетов использованы шесть конечно-элементных моделей (см. таблицу).

#### **Конечно-элементные модели**

Модель	Обшивки	Средний слой
<i>Связывание слоев, контактная задача</i>		
1	Полная модель «solid185»	Полная модель «solid185»
2	Упрощенная модель «solsh190»	Полная модель «solid185»
3	Упрощенная модель «solsh190»	Упрощенная модель «solsh190»
4	Упрощенная модель «shell181»	Полная модель «solid185»
<i>Единый слой, осреднение свойств</i>		
5	Упрощенная модель «shell181»	
6	Упрощенная модель «solsh190»	

При создании математической модели приняты следующие основные допущения: 1) элементы конструкции неразрывно связаны (расслоение

не допускается); 2) поведение всех материалов предполагается линейно-упругим.

При решении задачи использовалась структурированная сетка. Характерный размер элементов слоя утеплителя и обшивок составлял  $0,0025 \div 0,025$  м. Общее число узлов в зависимости от геометрических размеров конструкции  $1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^6$ .

Контактное взаимодействие стальных обшивок со средним слоем моделировалось с помощью алгоритма, основанного на методе штрафов. Закрепление панели выполнено путем задания в качестве граничных условий на торцах нулевых перемещений в направлении длины и толщины панели.

В [4] показано, что моделирование данных конструкций необходимо выполнять с использованием математических моделей, учитывающих большие перемещения. Поэтому расчеты выполняются с использованием модели, учитывающей геометрическую нелинейность. Для решения нелинейной задачи использовался метод Ньютона–Рафсона с обновлением матрицы жесткости на каждой итерации (полная процедура метода).

Решение систем линейных алгебраических уравнений выполнялось с использованием прямого (точного) решателя.

**4. Решение тестовых задач.** Для тестирования математических моделей, заложенных в программном комплексе ANSYS, требуется выполнить решение ряда тестовых задач.

**4.1. Решение статических задач.** Ниже рассмотрено решение задач о статическом поведении слоистой панели при воздействии равномерно распределенной нагрузки  $q = 1$  кПа. Варьируемыми параметрами модели являются толщина панели  $H = 2,5 \div 100$  мм, модуль упругости материала среднего слоя  $E = 5 \div 150\,000$  МПа.

На рис. 2 приведены результаты расчетов панелей различной толщины с модулем упругости среднего слоя 5 МПа. Модели 1–5 дают близкие ре-

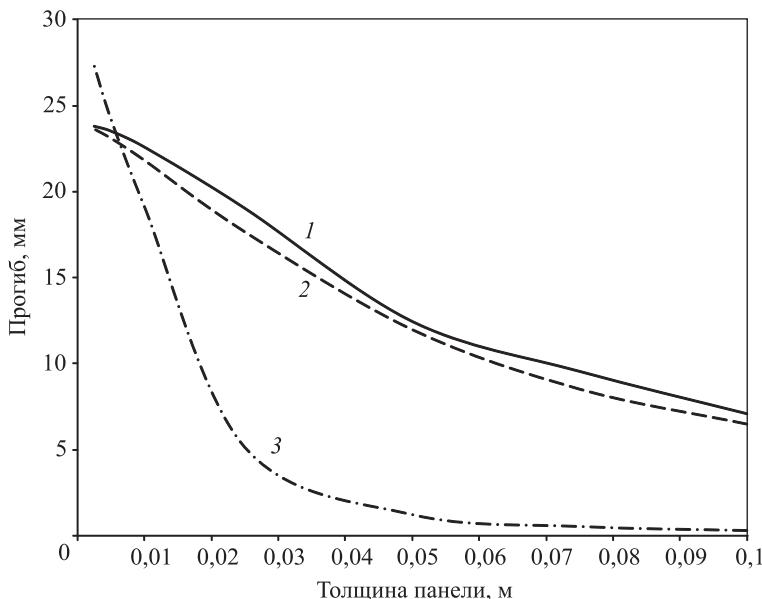
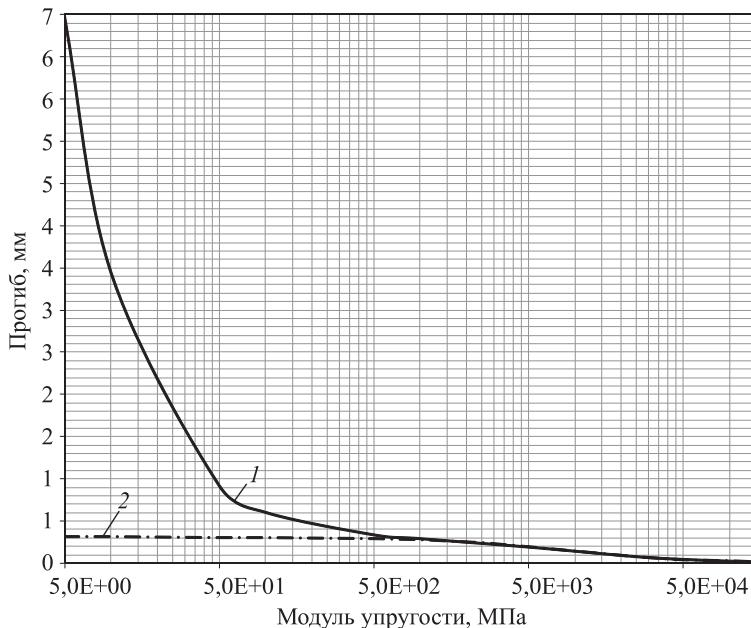


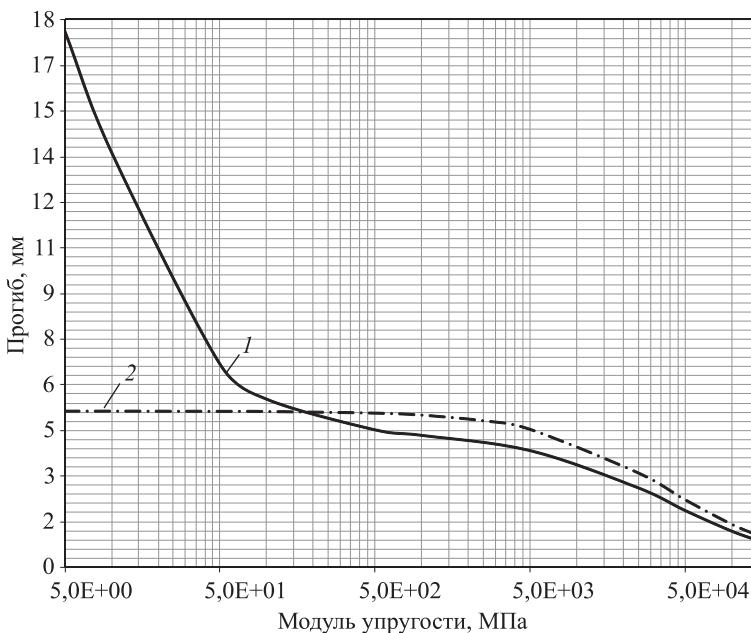
Рис. 2. Сравнение моделей  
1 – расчет по моделям 1 и 4; 2 – расчет по моделям 2, 3 и 5;  
3 – расчет по модели 6

зультаты и могут быть использованы для моделирования многослойных панелей.

На рис. 3, 4 приведено сопоставление результатов расчетов панелей с толщиной среднего слоя 10 см по моделям 5 и 6 с осреднением свойств. Модель 5 работает в широком диапазоне модулей упругости среднего слоя. При уменьшении толщины панели точность расчетов по модели 6 снижается. Модель 6 не применима при значении модуля упругости среднего слоя более 500 МПа.



*Рис. 3. Сравнение моделей (толщина среднего слоя  $t = 10,0$  см)  
1 – расчет по модели 5; 2 – расчет по модели 6*



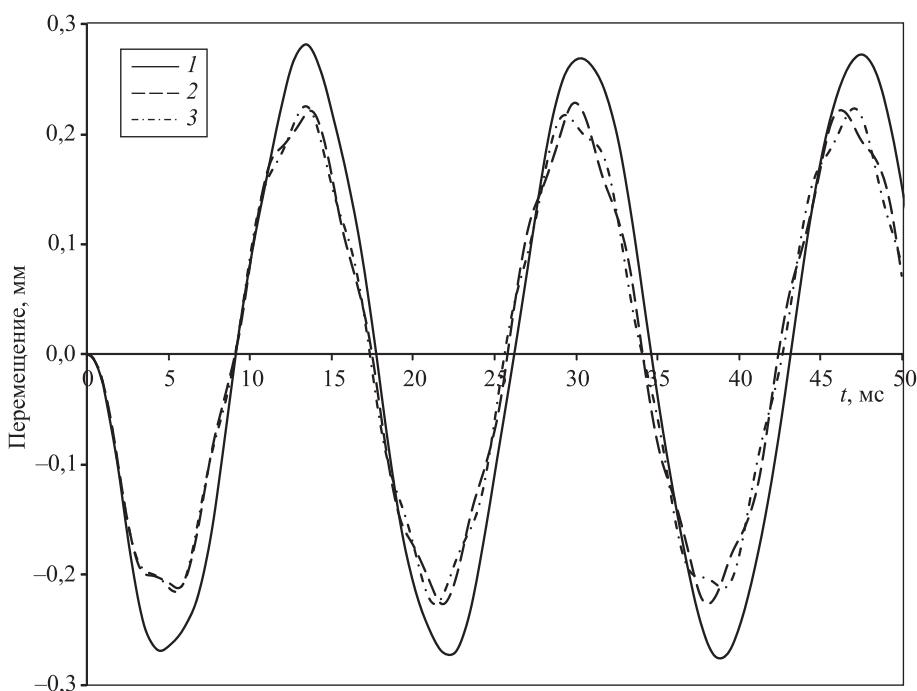
*Рис. 4. Сравнение моделей (толщина среднего слоя  $t = 2,5$  см)  
1 – расчет по модели 5; 2 – расчет по модели 6*

Таким образом, наиболее согласованные результаты дают модели 1–5. В статье [1] проведено сравнение численных результатов, полученных с использованием модели 4 и экспериментальных данных. Показана адекватность модели 4. Таким образом, модели 1–5 могут быть использованы для статических расчетов панелей в широком диапазоне толщин и жесткости среднего слоя. Модель 6, основанная на осреднении свойств, на всем диапазоне толщин дает резко отличающиеся результаты от всех других моделей и не применима для моделирования трехслойных панелей с существенным различием жесткости слоев.

Анализ результатов статических расчетов показал, что упрощенная модель 5, построенная из элементов многослойных оболочек «shell181», дает результаты, близкие к результатам, полученным на полной модели 1. Однако использование модели 5 позволяет значительно эффективнее решать задачи, благодаря снижению затрат компьютерных ресурсов и сокращению времени счета. Поэтому для решения задач рекомендуется использовать многослойные оболочки «shell181».

**4.2. Решение динамических задач.** Ниже рассмотрено решение задач о динамическом поведении слоистой панели при воздействии импульсной нагрузки. Варьируемыми параметрами модели являются толщина панели  $H = 2,5 \div 100$  мм, модуль упругости материала среднего слоя  $E = 5 \div 150\,000$  МПа, плотность материала среднего слоя  $\rho = 25 \div 7850$  кг/м<sup>3</sup>. Амплитуда импульсной нагрузки составляет  $q = 50$  кПа при длительности импульса  $t_i = 1 \div 5$  мс; импульс  $I = 50 \div 250$  Па · с.

Все методы решения динамической задачи 1–3 дают близкие результаты по частотам и амплитудам колебаний (рис. 5).



*Рис. 5.* Зависимость перемещения точки от времени для импульса 50 Па · с  
1 – расчет по методам 1 и 2; 2 – расчет по методу 3 (используется 1 мода); 3 – расчет по методу 3 (используются 2 моды)

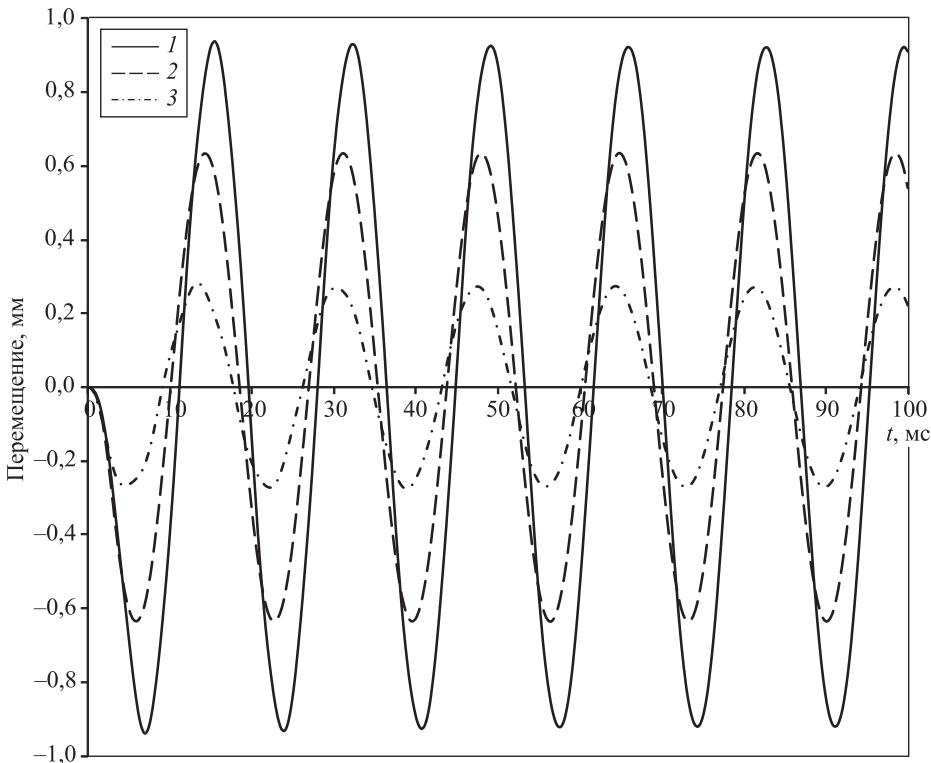


Рис. 6. Зависимость перемещения точки от времени для различной длительности импульса

1 –  $t_i = 1$  мс; 2 –  $t_i = 3$  мс; 3 –  $t_i = 5$  мс

Результат по методу 3 слабо зависит от количества мод колебаний, использующихся в расчете.

На рис. 6 приведены графики временной зависимости перемещения точки в центре нижней обшивки панели  $H = 100$  мм,  $E = 5,0$  МПа,  $\rho = 25$  кг/м<sup>3</sup>. Расчет проведен по методам 1 и 2.

Частота колебаний составляет  $f = 59,5$  Гц. При увеличении длительности импульса увеличивается продолжительность первого периода колебаний. Однако следующие периоды колебаний равны и частота колебаний совпадает с собственной частотой конструкции. Амплитуда колебаний возрастает при увеличении длительности импульса.

Частоты колебаний конструкции, полученные в полном динамическом расчете, соответствуют первой собственной частоте конструкции.

На рис. 7 приведены результаты модального анализа конструкции толщиной  $H = 100$  мм с использованием конечно-элементной модели 5 – зависимость первой собственной частоты колебаний конструкции от плотности и модуля упругости материала среднего слоя.

При увеличении плотности материала среднего слоя низшая частота колебаний уменьшается. При увеличении модуля упругости материала среднего слоя частота колебаний увеличивается, так как жесткость конструкции возрастает.

**Заключение.** 1. Математические модели и расчетные алгоритмы, заложенные в программный комплекс ANSYS, позволяют решить задачу о поведении трехслойных панелей при сейсмическом и ударном воздействиях

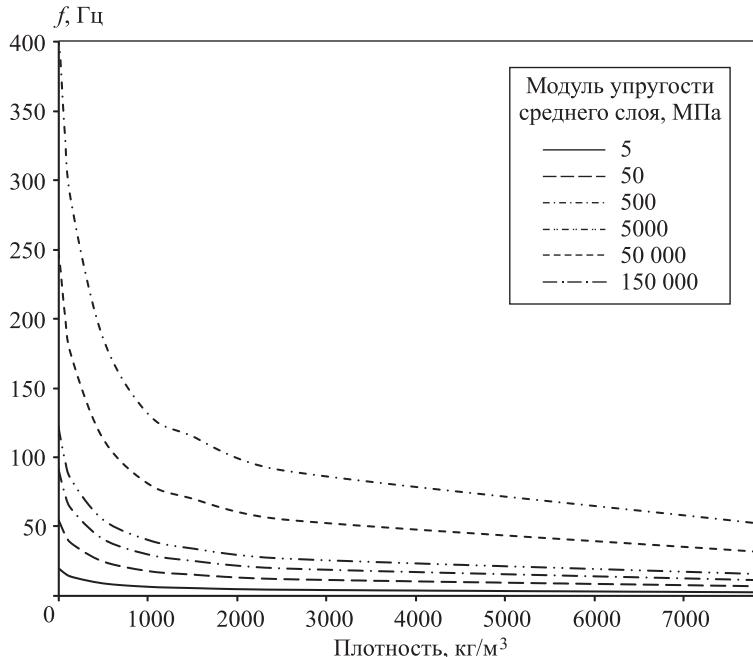


Рис. 7. Зависимость первой собственной частоты колебаний конструкции от плотности и модуля упругости материала среднего слоя

с приемлемой точностью. Даны рекомендации по использованию различных моделей и установлены диапазоны толщин и жесткости среднего слоя, в которых эти модели применимы. Показано, что задача может быть решена как методом интегрирования системы уравнений движения, так и более простым методом суперпозиции собственных форм колебаний без существенной потери точности.

2. Наиболее эффективно решать поставленную задачу позволяет модель на основе конечных элементов-оболочек «shell181». Использование КЭ «solid190» дает резко отличающиеся результаты от всех других моделей и, по нашему мнению, не применим для моделирования трехслойных панелей с существенным различием жесткости слоев.

3. Установлено, что при импульсном нагружении амплитуда первой формы колебаний значительно превосходит амплитуды следующих форм. Для выполнения расчета с помощью метода суперпозиции мод требуется удерживать только три первые моды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Данилов М.Н., Федорова Н.Н. Конечно-элементное моделирование многослойных ограждающих конструкций // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 10. С. 92–100.
- Данилов М.Н., Федорова Н.Н. Численное исследование теплозащитных характеристик строительных сэндвич-панелей // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 5.
- Вальгер С.А., Данилов М.Н., Федорова Н.Н., Федоров А.В. Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием ПК ANSYS AUTODYN и LS-DYNA // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 9. С. 85–96.

4. Данилов М.Н., Федорова Н.Н. Методика расчета многослойных ограждающих конструкций с учетом нелинейных свойств материалов // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 8. С. 81–92.
5. Коган Е.А., Юрченко А.А. Нелинейные колебания трехслойных и многослойных пластин и оболочек при периодических воздействиях (обзор) // Изв. Моск. гос. техн. ун-та «МАМИ». 2014. Т. 4. № 1 (19). С. 55–70.
6. Ильдиров Е.В., Холопов И.С. Определение физико-механических характеристик элементов трехслойной панели со средним слоем из базальтовой ваты // Пром. и гражд. стр-во. 2012. № 2. С. 9–21.
7. Russell B.P., Malcolm A., Haydn N.G., Vigran S.D. Dynamic compressive response of composite corrugated cores. Journal of mechanics of materials and structures. 2010. Vol. 5. No. 3. Pp. 477–493.
8. Daniel I.M., Abot J.L., Schubel P.M., Luo Jyi-Jin. Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact // Experimental Mechanics. 2012. No. 52(1). Pp. 37–47.
9. Kong S.Y., Remennikov A. & Uy B. An experimental investigation of the performance of non-composite steel-concrete-steel protective panels under large impact loading. Advances in Structural Engineering: an international journal. 2013. No. 16 (7). Pp. 1163–1174.
10. Mori L.F., Lee S., Xue Z.Y., Vaziri A., Queheillalt D.T., Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Hutchinson J.W., Espinosa H.D. Deformation and fracture modes of sandwich structures subjected to underwater impulsive loads // Journal of mechanics of materials and structures. 2007. Vol. 2. No. 10. Pp. 1981–2006.
11. Bennett J.A., Easley J.G. A multiple degree-of-freedom approach to nonlinear beam vibrations AIAA Journal. 1970. Vol. 8. No. 4. Pp. 734–739.
12. Lu Y.P., Killian J.W., Everstine G.C. Vibrations of three layered damped sandwich plate composites. Journal of Sound and Vibration. 1979. No. 64(1). Pp. 63–71.
13. Kong S.Y., Remennikov A. & Uy B. Numerical simulation and validation of impact response of axially-restrained steel-concrete-steel sandwich panels // Composite Structures. 2012. No. 94 (12). Pp. 3546–3555.
14. Андреев А.Н., Тайлакова Е.В. Численное исследование низших собственных частот слоистой композитной цилиндрической оболочки, нагруженной осесимметричным внешним давлением // Вестн. Кемеров. гос. ун-та. 2009. № 2 (38). С. 21–25.
15. Голованов А.П., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод коначных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 392 с.
16. Newmark N.M. Method of Computation for Structural Dynamics // ASCE Journal of Engineering Mechanics Division. 1959. Vol. 85. Pp. 67–94.
17. Rajakumar C., Rogers C.R. The Lanczos Algorithm Applied to Unsymmetric Generalized Eigenvalue Problems // International Journal for Numerical Method in Engineering. 1991. Vol. 32. Pp. 1009–1026.
18. Mindlin R.D. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic elastic plates // J. Appl. Mech. 1951. No. 18. Pp. 31–38.
19. Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates // J. Appl. Mech. 1945. No. 12. A-69–A-77.

**Данилов Максим Николаевич**, инж.; E-mail: danilov-m-n@ya.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Адищев Владимир Васильевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: adishch@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 14.04.16 г.

**Danilov Maksim Nikolaevich**, Engineer; E-mail: danilov-m-n@ya.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Adishchev Vladimir Vasil'evich**, DSc, Professor; E-mail: adishch@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **APPLICATION OF ANSYS SOFTWARE FOR SOLVING PROBLEMS OF DYNAMICS OF MULTILAYER SHELLS**

A comparative analysis of several mathematical models of multilayer shells available in ANSYS was performed. The simplified mathematical models, based on the theory of multilayer shells and assuming the implementation of the averaging properties were studied. The comparison of simplified models and full models was performed. Based on the analysis, the ranges of the geometric scales and material properties were determined that provided an adequate simulation results for different mathematical models. The recommendations on the use of different models have been developed.

**K e y w o r d s:** layered shell, sandwich panels, numerical simulation, dynamics, natural frequencies and mode shapes, ANSYS.

### **REFERENCES**

1. Danilov M.N., Fedorova N.N. Konechno-elementnoe modelirovanie mnogosloynykh ogranzhdayushchikh konstruktsiy [Finite element modeling of the multilayer constructions]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 10. Pp. 92–100. (in Russia)
2. Danilov M.N., Fedorova N.N. Chislennoe issledovanie teplozashchitnykh kharakteristik stroitel'nykh sendvich-paneley [Numerical investigation of thermal-protection characteristics of structural sandwich panels]. IFZh [Journal of Engineering, Physics and Thermophysics]. 2014. Vol. 87. No. 5. Pp. 1141–1150. (in Russia)
3. Valger S.A., Danilov M.N., Fedorova N.N., Fedorov A.V. Sravnenie dannykh modelirovaniya udarno-volnovogo vozdeystviya na sooruzheniya s ispol'zovaniem PK ANSYS AUTODYN i LS-DYNA [The comparison of results of simulation of shock wave action on structures using ANSYS and Autodyn and LS-DYNA software]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 9. Pp. 85–96. (in Russia)
4. Danilov M.N., Fedorova N.N. Metodika rascheta mnogosloynykh ogranzhdayushchikh konstruktsiy s uchetom nelineynykh svoystv materialov [Finite element modelling of nonlinear behavior of the multilayer constructions]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 8. Pp. 81–92. (in Russia)
5. Kogan E.A., Yurchenko A.A. Nelineynye kolebaniya trekhloynykh i mnogosloynykh plastin i obolochek pri periodicheskikh vozdeystviyakh (obzor) [Nonlinear oscillations of a three-layer and multi-layer plates and shells during periodic impacts (survey)]. Izvestiya Mosk. gos. tekhn. un-ta «MAMI» [Proceedings Moscow State Technical University «MAMI»]. 2014. Vol. 4. No. 1 (19). Pp. 55–70. (in Russia)
6. Il'dyarov E.V., Holopov I.S. Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik elementov trekhloynoy paneli so srednim sloem iz baza'l'tovoy vaty [Determination of physical and mechanical characteristics of the elements of sandwich panels with a core of basalt wool]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2012. No. 2. Pp. 9–21. (in Russia)
7. Russell B.P., Malcolm A., Haydn N.G., Vikram S.D. Dynamic compressive response of composite corrugated cores. Journal of mechanics of materials and structures. 2010. Vol. 5. No. 3. Pp. 477–493.

8. Daniel I.M., Abot J.L., Schubel P.M., Luo Jyi-Jiin. Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact. *Experimental Mechanics.* 2012. No. 52(1). Pp. 37–47.
  9. Kong S.Y., Remennikov A. & Uy B. An experimental investigation of the performance of non-composite steel-concrete-steel protective panels under large impact loading. *Advances in Structural Engineering: an international journal.* 2013. No. 16 (7). Pp. 1163–1174.
  10. Mori L.F., Lee S., Xue Z.Y., Vaziri A., Queheillalt D.T., Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Hutchinson J.W., Espinosa H.D. Deformation and fracture modes of sandwich structures subjected to underwater impulsive loads. *Journal of mechanics of materials and structures.* 2007. Vol. 2. No. 10. Pp. 1981–2006.
  11. Bennett J.A., Easley J.G. A multiple degree-of-freedom approach to nonlinear beam vibrations. *AIAA Journal.* 1970. Vol. 8. No. 4. Pp. 734–739.
  12. Lu Y.P., Killian J.W., Everstine G.C. Vibrations of three layered damped sandwich plate composites. *Journal of Sound and Vibration.* 1979. No. 64(1). Pp. 63–71.
  13. Kong S.Y., Remennikov A. & Uy B. Numerical simulation and validation of impact response of axially-restrained steel-concrete-steel sandwich panels. *Composite Structures.* 2012. No. 94 (12). Pp. 3546–3555.
  14. Andreev A.N., Taylakova E.V. Chislennoe issledovanie nizshikh sobstvennykh chastot sloistoy kompozitnoy tsilindricheskoy obolochki, nagruzhennoy osesimmetrichnym vneshnim davleniem [Numerical study of the lower natural frequencies of laminated composite cylindrical shell loaded axially symmetric external pressure]. *Vestnik Kemerov. gos. un-ta* [Bulletin of Kemerovo State University]. 2009. No. 2 (38). Pp. 21–25. (in Russia)
  15. Golovanov A.P., Tyuleneva O.N., Shigabutdinov A.F. Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruktsiy [The finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 392 p. (in Russia)
  16. Newmark N.M. Method of Computation for Structural Dynamics. *ASCE Journal of Engineering Mechanics Division.* 1959. Vol. 85. Pp. 67–94.
  17. Rajakumar C., Rogers C.R. The Lanczos Algorithm Applied to Unsymmetric Generalized Eigenvalue Problems. *International Journal for Numerical Method in Engineering.* 1991. Vol. 32. Pp. 1009–1026.
  18. Mindlin R.D. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic elastic plates. *J. Appl. Mech.* 1951. No. 18. Pp. 31–38.
  19. Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates. *J. Appl. Mech.* 1945. No. 12. A-69–A-77.
-

УДК 662.63

О.Э. КОШЕЛЕВА, И.А. ПАУЛИ, В.А. ЛОГВИНЕНКО

## КИНЕТИКА ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ С АНТИПИРЕНАМИ

Рассмотрены кинетические закономерности процесса термодеструкции древесины сосны после обработки антипиренами.

**Ключевые слова:** древесина сосны, термический анализ, кинетика, антипирены.

Древесина среди всех строительных материалов сильнее подвержена возгоранию. В условиях пожара незащищенные деревянные конструкции легко воспламеняются, что является главной причиной их обрушения. В связи с этим актуальной проблемой остается защита деревянных изделий и сооружений от действия огня.

Один из способов защиты от огня – пропитка древесины и материалов на ее основе огнезащитными веществами – антипиренами, которые на современном рынке представлены в широком ассортименте. Антипирены проникают в древесину, заполняя поры и окружая волокна. Пропитанная огнезащитным составом деревянная конструкция дольше противостоит огневому воздействию, время возгорания увеличивается от нескольких минут до часа. Механизм действия антипирена определяется его химическим составом и протекающими при горении древесины реакциями.

Термическое разложение в древесине хвойных пород начинается быстрее, чем у лиственных, при этом увеличиваются слой кокса и скорость выгорания деревянной поверхности. Кинетика горения древесины березы и сосны изучалась ранее [1].

В целях защиты древесины от огня необходимо снизить скорость термического разложения для уменьшения выхода в газовую фазу горючих продуктов и повысить образование негорючих веществ в продуктах разложения. Пропитка деревянных поверхностей антипиренами неорганического состава – один из способов достижения этих целей.

Защитное действие неорганических антипиренов заключается в том, что воспламенение продуктов разложения не происходит, процесс горения не распространяется за пределы действия источника огня, несмотря на прогрессирующее разложение древесины [2]. Под воздействием открытого пламени и высоких температур химически связанные в поверхностном слое древесины компоненты антипирена подвергаются эндотермическому распаду и образуют негорючие газообразные и твердые материалы. Газообразные вещества при испарении охлаждают деревянную поверхность, а обуглившиеся твердые компоненты образуют сплошную пленку, которая блокирует поступление кислорода. Таким образом осуществляется как внутренняя, так и наружная огнезащита пропитанной антипиренами древесины.

К антиприренам предъявляются следующие требования [3]. Они должны:

- 1) эффективно снижать горючесть вещества древесины по разным механизмам;
- 2) иметь высокую реакционную способность для химического взаимодействия с полимерными компонентами древесины и сшивания волокон с образованием огнезащитного комплекса;
- 3) быть нелетучими и нетоксичными, не содержать органических растворителей и дорогостоящих компонентов, иметь высокую растворимость в воде.

В России в основном распространены неорганические антиприрены на основе растворимых в воде солей, способные плавиться или разлагаться при нагревании. При воздействии высоких температур сначала происходит обезвоживание древесного материала, а затем реализуется один из двух основных механизмов действия в зависимости от природы веществ [4].

Если в состав огнезащитных средств входят вещества с невысокой температурой плавления (соли фосфорной, борной и кремниевой кислот), реализуется следующий механизм. Антиприрены начинают плавиться до начала возгорания древесины, образуя оплавленную пленку, которая покрывает волокна древесины и ограничивает доступ кислорода к поверхности. Также они могут выделять кристаллизационную воду. В результате часть тепла расходуется на плавление антиприрена – температура воспламенения древесины повышается. Другой механизм реализуется в случае содержания в антиприрене разлагающейся при нагревании соли. В состав неорганических антиприренов могут входить также компоненты полимерного происхождения.

В данной работе изучалось действие борной кислоты. Древесину сосны обрабатывали насыщенным раствором борной кислоты в течение 30 мин без нагревания. Далее обработанная древесина высушивалась до постоянной массы сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при температуре 70 °C.

Термический анализ образцов обработанной борной кислотой древесины проводился на термовесах Netzsch Thermal Analyzer TG 209 F1. Кривые потери массы в процессе горения были получены в протоке смеси аргона и кислорода (40 см<sup>3</sup>/мин + 10 см<sup>3</sup>/мин); скорости нагрева 5, 10, 20, 40 К/мин, корундовый стандартный тигель, массы образцов ≈ 5 мг (рис. 1).

Обработка термоаналитических кривых проводилась на основе компьютерной программы NETZSCH Thermokinetics 2 [5].

Изучение кинетики окислительной термодеструкции обработанной древесины сосны проводилось в интервале температур 180–460 °C (рис. 2), что соответствует первому сложному пику ДТГ-2 на рис. 1 (условия анализа указаны выше).

Процесс горения сосны является многостадийным, что показал анализ кривых по методу Фридмана, поскольку величина энергии активации непостоянна во всем интервале реакции.

Ранее было показано [1], что начало окислительной термодеструкции необработанной древесины сосны (200 – 360 °C) – это двухстадийная реакция (первая стадия A → B – 95,9 %; вторая стадия B → C – 4,1 %):

$$A \rightarrow B. \text{An}, \quad f_1(\alpha) = (1 - \alpha)/[-\ln(1 - \alpha)]^{0.67}, \quad E_1 = 165 \pm 1 \text{ кДж/моль}, \\ \lg A_1 = 12.2 \pm 0.1.$$

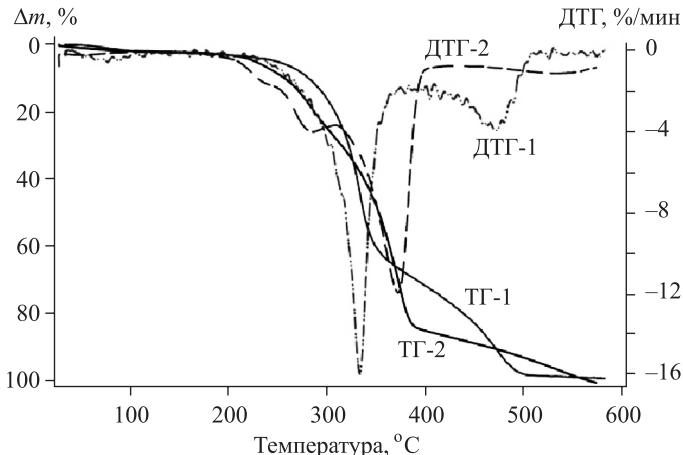


Рис. 1. Кривые потери массы образцов при термодеструкции древесины сосны (TG-1 и DTG-1) и после ее обработки антипиреном (TG-2 и DTG-2) при скорости нагрева 10 град/мин

$B \rightarrow C$ . An,  $f_2(\alpha) = (1 - \alpha) \cdot [-\ln(1 - \alpha)]^{0.64}$ ,  $E_2 = 113 \pm 1$  кДж/моль,  
 $\lg A_2 = 8,1 \pm 0,1$ .

Коэффициент корреляции 0,999894.

Вклад второй стадии  $B \rightarrow C$  невелик, т. е. основную роль в горении сосны играет первая стадия.

В аналогичных экспериментальных условиях начало окислительной термодеструкции древесины сосны после обработки (при температуре 180–400 °C) также является двухстадийной реакцией. Первая стадия описывается уравнением первого порядка, для второй стадии применяется уравнение Аврами–Ерофеева, с заметным вкладом диффузии (рис. 3).

Вклады обеих стадий изменились: первая стадия  $A \rightarrow B$  – 14,5 %, для второй стадии ( $B \rightarrow C$ ) – 85,5 %:

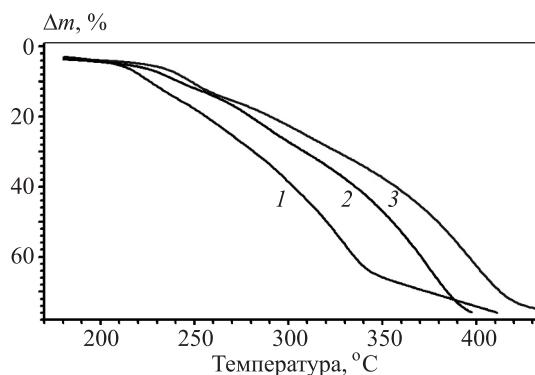
$A \rightarrow B$ .  $F_1$ ,  $f_1(\alpha) = (1 - \alpha)$ ,  $E_1 = 134 \pm 6$  кДж/моль,  $\lg A_1 = 11,7 \pm 0,6$ .

$B \rightarrow C$ . An,  $f_2(\alpha) = (1 - \alpha)/[-\ln(1 - \alpha)]^{0.22}$ ,  $E_2 = 84 \pm 2$  кДж/моль,  
 $\lg A_2 = 4,8 \pm 0,2$ .

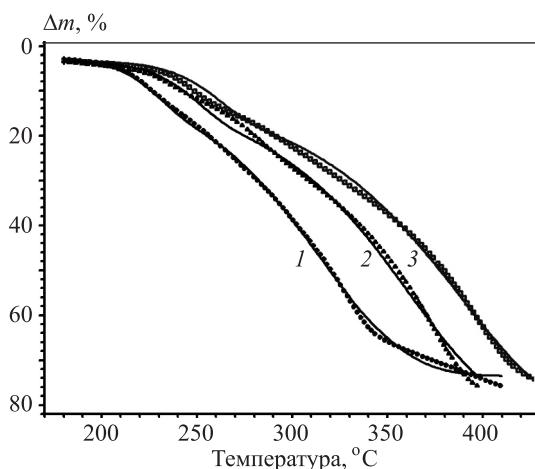
Коэффициент корреляции 0,999129.

Из кривых ДТГ (см. рис. 1) следует, что вклад первой, низкотемпературной стадии термодеструкции ( $A \rightarrow B$  при температуре 200–300 °C) уменьшился до 14,5 %, а основная часть процесса окисления (стадия  $B \rightarrow C$ ) сдвинулась в высокотемпературную область, максимальная температура поднялась с 335 до 370 °C. Процесс догорания коксового остатка (ранее при температуре 360–500 °C) теперь сдвинут и растянут во времени, его температурный интервал составляет 400–580 °C.

Склонность к возгоранию древесины сосны, относящейся к нестойким породам, и ее огнестойкость будут определяться, по-видимому, первой ступенью термодеструкции древесины (по первым пикам ДТГ) в интервале температур 220–400 °C, т. е. начальными характеристиками процесса горения. По данным кинетического исследования установлена разница

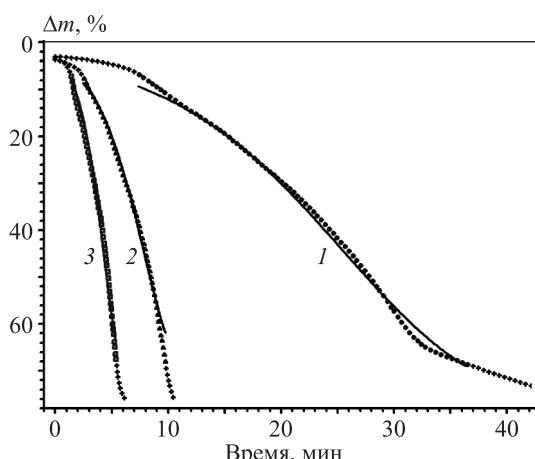


*Рис. 2. Кривые потери массы образцов при термодеструкции обработанной борной кислотой древесины сосны при скоростях нагрева 1 – 5, 2 – 20 и 3 – 40 град/мин*



*Рис. 3. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных данных (линии) потерь массы при термодеструкции обработанной древесины сосны при скоростях нагрева*

*1 – 5, 2 – 20 и 3 – 40 град/мин (зависимость от температуры)*



*Рис. 4. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных данных (линии) потерь массы при термодеструкции древесины сосны при скоростях нагрева*

*1 – 5, 2 – 20 и 3 – 40 град/мин (зависимость от времени)*

в процессе горения обоих исследуемых образцов древесины, которая заметна как по температурному интервалу термодеструкции при линейном нагреве (рис. 4), так и по кинетическим параметрам этих процессов.

Это подтверждается результатами расчета изотермического процесса горения на основе кинетических параметров при температуре 320 °C (рис. 5, 6).

Анализ графических результатов показывает, что полная деструкция для двухстадийного процесса горения у необработанной древесины достигается

Рис. 5. Изменение количества компонентов при окислительной термодеструкции древесины сосны при 320 °C

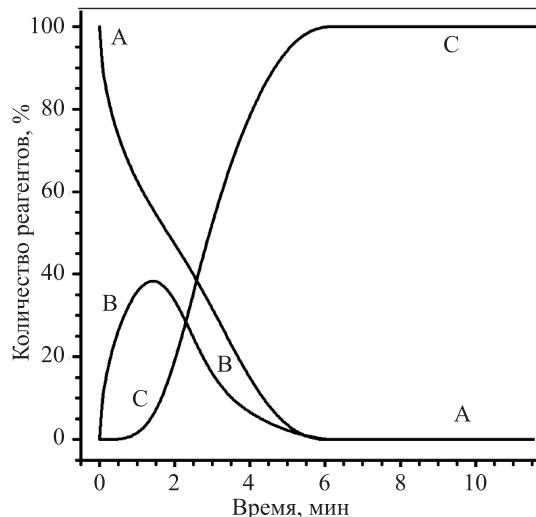
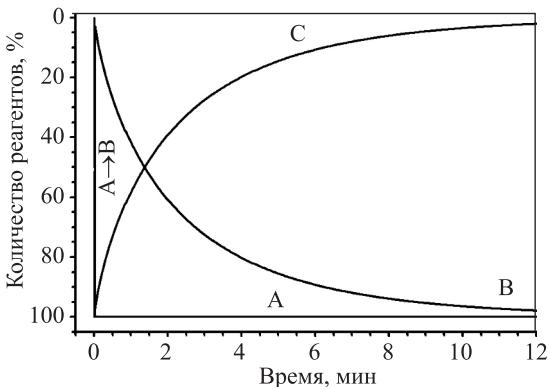


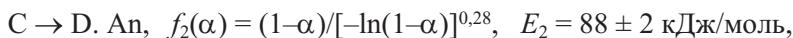
Рис. 6. Изменение количества компонентов при окислительной термодеструкции обработанной древесины сосны при 320 °C



за 6 мин при температуре 320 °C (см. рис. 5), а обработанная борной кислотой древесина при данной температуре сгорает при термодеструкции за 12 мин (см. рис. 6).

Компонент А мгновенно превращается в В; практически во всем временном интервале термодеструкции компонент А не накапливается (см. рис. 6). В этом случае лимитирующей стадией скорости термодеструкции является стадия В → С, которая при 320 °C заканчивается за 12 мин.

Если же рассмотреть обе стадии как две параллельные реакции (A → B и C → D), то кинетическое описание будет иметь вид:



$$\lg A_2 = 5,2 \pm 0,2.$$

Коэффициент корреляции 0,999129.

Оба кинетических описания процесса (параллельные или последовательные реакции) почти не различаются по кинетическим параметрам и времени термодеструкции.

Меньшая горючесть древесины сосны после обработки установлена при сравнении рис. 1 и 5, 6. На кривых термического анализа (см. рис. 1)

этому соответствует сдвиг основного процесса горения (острые пики ДТГ) в высокотемпературную область.

В кинетике реакций в твердом теле используется уравнение скорости реакции:

$$V = k \cdot f(\alpha),$$

где  $\alpha$  – степень превращения, меняется от 0 до 1.

Из уравнения Аррениуса константа скорости реакции

$$k = A \cdot e^{-E/RT}.$$

Хотя энергия активации первой стадии процесса термодеструкции обработанной древесины сосны больше, чем для второй стадии ( $E = 134(136)$  и  $84(88)$  кДж/моль соответственно), скорость первой стадии термодеструкции существенно выше, чем на второй стадии (см. рис. 2, 3). Повышенная скорость термодеструкции в начале процесса обусловлена не величиной энергии активации ( $E_1 > E_2$ ), а соотношением величин предэкспоненциального множителя:  $\lg A = 12,2 (11,7)$  – 1-я стадия и  $8,1 (4,8)$  – 2-я стадия. Значит, имеющаяся разница в величинах предэкспоненты ( $A_1 > A_2$ ) увеличивает скорость первой ступени реакции ( $200\text{--}400$  °C) существенное, чем снижает ее разница в величинах энергии активации ( $E_1 > E_2$ ).

Аналогично объясняется разница в скоростях термодеструкции обработанной и необработанной древесины. Энергия активации процесса термодеструкции необработанной древесины больше, чем у обработанной (см. таблицу). Поэтому меньшая скорость термодеструкции обработанной древесины (полное сгорание за 12 мин при 320 °C) по сравнению со скоростью термодеструкции необработанной древесины (при той же температуре сгорание за 6 мин) объясняется изменением величины предэкспоненты при переходе от необработанной древесины к обработанной ( $A_1 > A_2$ ): это снижает скорость термодеструкции больше, чем ее увеличение за счет снижения энергии активации ( $E_1 > E_2$ ).

#### **Величина кинетических характеристик процесса**

Образец древесины	Энергия активации $E$ , кДж/моль		$\lg A$	
	1-я стадия	2-я стадия	1-я стадия	2-я стадия
Необработанная	165	113	12,2	8,1
Обработанная	134	84	11,7	4,8

Энергия активации процесса термодеструкции и предэкспоненциальный множитель характеризуют энタルпийный и энтропийный вклады в константу скорости реакции. Данные исследования показывают, что снижение склонности древесины сосны к горению за счет ее специальной обработки может в большей мере определяться энтропийным, а не энталпийным вкладом.

Таким образом, увеличение огнестойкости при обработке древесины сосны сдвигает основную часть горения (как и сгорание коксового остатка) в область более высоких температур. Данный сдвиг связан в первую очередь не с энергетическими характеристиками термодеструкции (энергией активации), а с энтропийным вкладом (величиной предэкспоненты). Возможно,

что такое замедление возгораемости древесины сосны объясняется пространственными затруднениями движения зоны окисления сквозь пропитанную древесину (параметры уравнения Аррениуса подтверждают наличие диффузионных затруднений).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелева О.Э., Логвиненко В.А. Термический анализ древесины. Ч. II // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 3. С. 95–99.
2. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
3. Серков Б.Б., Асеева Р.М., Сивенков А.Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины. Ч. 1 // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2011, № 6. С. 1–18 (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
4. Корольченко А.Я., Петрова Е.А. Современные средства огнезащиты древесины // Российский хим. журн. 2003. № 4. (<http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyid=357>)
5. M ou k h i n a E. Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments // J. Therm. Anal. Calorim. 2012. No. 109. Pp. 1203–1214.

**Кошелева Ольга Эдуардовна**, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Паули Ирина Анатольевна**, канд. хим. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Логвиненко Владимир Александрович**, д-р хим. наук, проф.

Институт неорганической химии СО РАН, г. Новосибирск

Получено 20.04.16

**Kosheleva Ol'ga Eduardovna**, DSc, Professor  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Pauli Irina Anatol'evna**, PhD, Ass. Professor  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Logvinenko Vladimir Alexandrovich**, DSc, Professor  
Institute of Inorganic Chemistry Siberian office of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia

#### **KINETICS OF THE THERMAL DESTRUCTION OF THE WOOD OF PINE TREE WITH THE FIREPROOFING COMPOUNDS**

Kinetic laws the process of the thermal destruction of the wood of pine tree with the fireproofing compounds are examined.

**Key words:** the wood of pine tree, thermal analysis, kinetics, fireproofing compounds.

#### REFERENCES

1. Kosheleva O.E., Logvinenko V.A. Termicheskiy analiz drevesiny. Ch. II [Thermal analysis of wood. P. II]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 3. Pp. 95–99. (in Russia)
2. Romanenkov I.G., Levites F.A. Ognezashchita stroitel'nykh konstruktsiy [Fire protection of structures]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 320 p. (in Russia)

3. Serkov B.B., Aseeva R.M., Sivenkov A.B. Fiziko-chimicheskie osnovy goreniya i pozharnaya opasnost' drevesiny. Ch. 1 [The physical chemistry bases of combustion and the fire hazard of wood. P. 1]. Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti» [Internet-periodical «The technology of the technosfernoy safety»]. 2011. No. 6. Pp. 1–18 (in Russia) (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
4. Korol'chenko A.Ya., Petrova E.A. Sovremennye sredstva ognezashchity drevesiny [Contemporary means of fire protection of wood]. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal [Russian chemical periodical]. 2003. No. 4. <http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyid=357>. (in Russia)
5. Moukhina E. Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments. J. Therm. Anal. Calorim. 2012. No. 109. Pp. 1203–1214.

## **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ**

**1.** Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присыпать статьи на *английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский. Вместе с рукописью представляются:

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
- *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

**2.** Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Сгт размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу посередине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

**3.** Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала <http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/>

*a) русскоязычная часть:*

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи;
- аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
- ключевые слова (не менее 5);
- текст статьи:
  - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
  - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
  - ф о р м у л ы набирать шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
  - русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
  - во избежание смещения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
  - и л л ю с т р а ц и и представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 дпі, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
  - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4;
  - т а б л и ц ы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
  - б и б л и о г р а ф и ч е с к и й с п и с о к (не менее 8 ссылок), составляется по следующим правилам:
    - в список включаются только опубликованные работы, в порядке упоминания в статье, ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках, в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНиПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте [http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules\\_and\\_examples\\_of\\_design\\_bibliographies\\_list/](http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliographies_list/)), ссылки на интернет- сайты не допускаются;
    - для статей из зарегистрированных электронных журналов указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;
  - с в е д е н и я о б а в т о р а х: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), учченая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

*б) англоязычная часть:*

- сведения об авторах — последовательно для каждого:
  - фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «правила транслитерации» см. на сайте [http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN\\_PCGN\\_romanization/](http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/));

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Ass. Professor, Academician of..., Cor. Member of... — профессор, доцент, академик ...), член-корреспондент ...), другое — Senior Lecturer (ст. преподаватель), Engineer (инженер), Post-graduate Student (аспирант), Student (студент);
  - официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в наименовании организации), страны;
  - название статьи;
  - аннотация;
  - ключевые слова (Keywords);
  - библиографический список:
    - для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
    - для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, —, // и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце — (in Russia).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присыпать в электронном виде.
6. Корректура статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики: фамилия, имя, отчество полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высыпаются.

## 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 раздел
- В лабораториях вузов
- Внедрение научных достижений в производство
- Научная информация

На 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2016 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**  
**№ 5 (689) 2016**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*