

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

№ 4 (688)  
Апрель 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 26.04.16. Формат 70×108 1/16  
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1111

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

**Пинус Б.И., Созонов П.С.** Специфика сейсмического износа железобетонных зданий ..... 5

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Дукарт А.В.** К определению стационарных режимов колебаний линейной консервативной системы с двумя степенями свободы. Часть 1. Периодическое воздействие произвольного вида ..... 13

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Береговой В.А.** Моделирование структуры и прогнозирование свойств пористых композиционных материалов на стеклокристаллической матрице .... 22

**Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В.** Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения ..... 30

**Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З.** Исследование влияния содержания нефтяного шлама на теплопроводность легковесного кирпича ..... 38

<b>Логанина В.И., Фролов М.В.</b> Теплоизоляционные известковые составы, наполненные стеклянными полыми микросферами .....	47
<b>Пименов А.Т., Игнатова О.А., Чикмарев П.А.</b> Зависимость адгезии защитного (отделочного) покрытия от свойств материалов слоя и основания .....	53
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Логачев К.И., Аверкова О.А., Логачев А.К., Толмачева Е.И.</b> Расчет отрывной поверхности тока при входе в круглый всасывающий канал .....	58
<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 1 .....	66
<b>Кочев А.Г., Соколов М.М., Сергиенко А.С., Москаева А.С., Кочева Е.А.</b> Особенности создания микроклимата в православных храмах .....	74
<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 с трубчатым воздухораспределением .....	83
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Гуаньин Чжан.</b> Опыт информационного моделирования беседок – памятников архитектуры Древнего Китая .....	95
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Коянкин А.А., Митасов В.М.</b> Оценка напряженно-деформированного состояния сборно-монолитных конструкций с учетом процесса монтажа .....	101
<b>Талапов В.В.</b> О некоторых принципах, лежащих в основе BIM .....	108

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. 4 (688)**

April 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 E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

## **CONTENTS**

### **BUILDING CONSTRUCTIONS**

- Pinus B.I., Sozonov P.S.** RC building deterioration features under seismic loadings ..... 5

### **THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES**

- Dukart A.V.** Determination of stationary vibrations of a linear conservative system with two degrees of freedom. Part 1. General periodic disturbance ..... 13

### **BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

- Beregovoy V.A.** Modeling of structure and property prediction of porous composite materials on glass-ceramic matrix ..... 22

- Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V.** The suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concretes of new generation ..... 30

- Abdrakhimova E.S., Abdrrakhimov V.Z.** Study of the influence of the content of oil sludge on the thermal conductivity of lightweight bricks ..... 38

- Loganina V.I., Frolov M.V.** Insulation lime compositi-

ons filled with glass hollow microspheres .....	47
<b>Pimenov A.T., Ignatova O.A., Chikmarev P.A.</b> Dependence of adhesion of a protective (finishing) covering on properties of materials of a layer and basis .....	53
<b>SANITARY ENGINEERING</b>	
<b>Logachev K.I., Averkova O.A., Logachev A.K., Tolmacheva E.I.</b> Calculation of the detachable surface of the stream at the entrance to the round suction flue .....	58
<b>Posohin V.N., Ziganshin A.M., Varsegova E.V.</b> Calculation of minor losses. Report 1 .....	66
<b>Kochev A.G., Sokolov M.M., Sergienko A.S., Moskaeva A.S., Kocheva E.A.</b> Features of microclimate creation in orthodox churches .....	74
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Malysheva Yu.E., Abramakov D.E., Dedov A.S., Abramakov E.A.</b> Classification criteria-the elements of the pneumatic impact mechanisms with tubular distribution .....	83
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Guanying Zhang.</b> Experience of information modeling gazebos – monuments of architecture of Ancient China .....	95
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Koyankin A.A., Mitasov V.M.</b> Estimation of stain-stress state cast-in-place and precast construction considering erection procedure .....	101
<b>Talapov V.V.</b> Some of the principles underlying the BIM .....	108

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



УДК 624.012.45.042.7

Б.И. ПИНУС, П.С. СОЗОНОВ

### СПЕЦИФИКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗНОСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ

На основании экспериментальных данных о поведении бетона произведена аналитическая оценка и установлены значимые изменения статистических закономерностей коэффициента затухания, периода и формы колебаний железобетонного здания после немногократных повторных воздействий. Степень сейсмического износа железобетонных элементов вследствие фоновой сейсмической активности может быть оценена по изменению динамических параметров. Снижение рисков от вероятных последствий фонового сейсмического износа может быть достигнуто коррекцией расчетной динамической модели на стадии проектирования на расчетный срок эксплуатации.

Ключевые слова: бетон, декремент затухания, период собственных колебаний, сейсмический износ, немногократные повторные нагрузления.

Эксплуатация зданий и сооружений в сейсмических районах характеризуется периодическими тектоническими воздействиями фоновой (ниже нормируемой) интенсивности. Их уровень и частота проявления достаточны для возникновения в несущих конструктивных элементах напряженно-деформированного состояния, ведущего к постепенной модификации структуры железобетона. Физическое содержание подобных процессов состоит в образовании, развитии и накоплении микроразрушений, а качественно проявляется в исчерпании потенциала работоспособности.

Энергетические и динамические параметры различных конструктивных систем представляются наиболее значимыми, интегрально обобщающими и чувствительными показателями ресурса сейсмостойкости. Их вероятностная экспериментально-аналитическая оценка выполнена методами численного моделирования, основанных:

- на фундаментальных положениях динамики;
- применении апробированных расчетных динамических моделей сооружений;
- экспериментальных данных, характеризующих изменения прочностных и деформативных свойств материала (железобетона), подвергаемого

закопеременным воздействиям, тождественным ожидаемым фоновым текtonическим воздействиям [1–3].

Учитывая существенную качественную трансформацию деформирования бетонов после малоциклических закопеременных воздействий, выполнен дифференцированный учет энергии, используемой на условно упругое и полное деформирование. Первому соответствует наступление текучести в арматуре ( $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y}$ ) или достижение максимальных напряжений в крайних волокнах сжатого бетона ( $\sigma = \sigma_u$ ), второму –  $\sigma = 0,8\sigma_u$  на нисходящей ветви их деформирования.

Энергия деформирования изгибающихся элементов с различным уровнем армирования ( $\mu = 16\%$ ) оценивалась по площади диаграмм «момент-кривизна»  $(M - \frac{1}{\rho})$ , полученных экспериментальным путем и с помощью аналити-

ческих процедур СП 63.13330.2014. Динамика ее изменения до (В0) и после (ВД) закопеременных воздействий характеризуется данными, представленными на рис. 1 и в табл. 1, из которых следует, что при определенном уровне армирования происходит резкое снижение энергии деформирования, обусловленное изменением характера вида разрушения из пластического (по арматуре) в хрупкое (по бетону). Смещение данной границы влево свидетельствует о снижении величины граничного армирования с  $\mu = 2,5\text{--}3$  до  $\mu = 1,5\text{--}2,5\%$ . Очевидно также (см. табл. 1), что влияние «умеренных» землетрясений выражается в постепенной реализации потенциала пластического

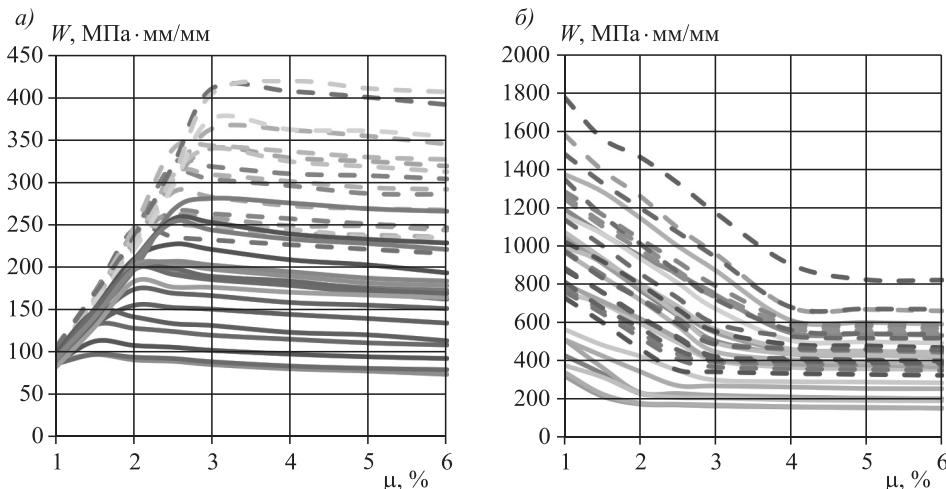


Рис. 1. Энергия деформирования изгибающегося элемента в зависимости от процента армирования  $\mu$  для серий В0 (сплошные) и ВД (пунктирные линии)

*a* – условно упругая; *б* – полная

Таблица 1. Изменение энергии деформирования изгибающегося элемента, %

Граничное условие (деформации)	$\overline{W_{BD}} / \overline{W_{B0}}$ при $\mu$					
	1	1,5	2	2,5	4	6
$\varepsilon_b \leq \varepsilon_{b,ult}$	0,708	0,707	0,687	0,691	0,690	0,689
$\varepsilon_b \leq \varepsilon_{b,u}, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y}$	0,913	0,835	0,729	0,594	0,531	0,516

деформирования и снижении полной (на 30 %) и условно упругой энергии (от 10 до 50 % в зависимости от  $\mu$ ).

Диссипативные свойства конструкций играют важную роль в динамическом поведении зданий и характеризуются коэффициентом демпфирования  $\zeta$ . Согласно гипотезе Фойгта, коэффициент  $\zeta$  чувствителен к изменению энергии деформирования и определяется как [4]

$$\zeta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi}, \quad \psi = \frac{W_i - \overleftarrow{W}_{\text{упр},i}}{W_{\text{упр},i}}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – логарифмический декремент затухания;

$\psi$  – относительная (удельная) потеря энергии;

$W_i$  – энергия деформирования на  $i$ -м цикле;

$\overleftarrow{W}_{\text{упр},i}$  – упругая энергия разгрузки на  $i$ -м цикле;

$W_{\text{упр},i}$  – энергия эквивалентного  $i$ -го упругого цикла деформирования.

По итогам анализа полученные значения коэффициентов демпфирования близки к экспериментально обоснованным [5–8]. Результаты сравнения коэффициента демпфирования до и после фоновых воздействий  $\zeta_{\text{вд}} / \zeta_{\text{в0}}$  в графическом виде представлены на рис. 2. Из них следует, что при сейсмическом износе происходит значительное, до 15–40 % (в зависимости от  $\mu$  и  $\eta$ ), снижение характеристик затухания конструкций, при этом сильно армированные конструкции подвержены более значительному снижению демпфирующих свойств. Это ведет к росту вероятности появления конструкций

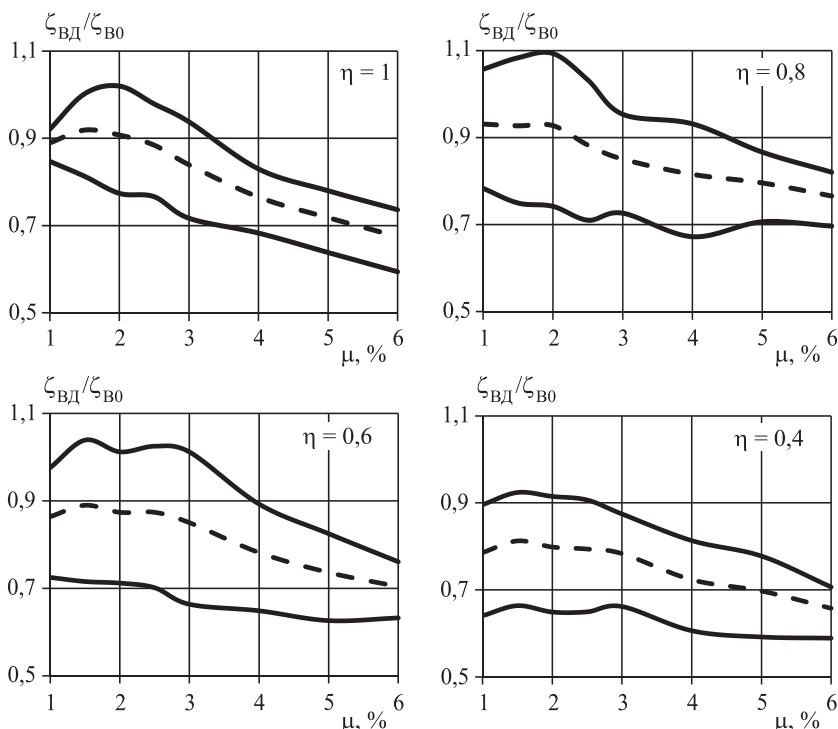


Рис. 2. Отношение коэффициентов демпфирования  $\zeta_{\text{вд}} / \zeta_{\text{в0}}$  при различных уровнях напряжения  $\eta = M / M_{\max}$  с равной обеспеченностью ( $\bar{M}, \bar{M} \pm 2\sigma$ )

с коэффициентом демпфирования  $\zeta = 3,5 - 4 \%$ , что может привести к недооценке сейсмической реакции здания в резонансной области на 5–10 %.

Динамические характеристики зданий, используемые при анализе их поведения как упругодеформируемых систем, могут быть определены аналитически путем решения основного уравнения динамики

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \quad (2)$$

где матрицы масс  $[M]$ , демпфирования  $[C]$  и жесткости  $[K]$  формируются из данных расчетных динамических моделей (РДМ).

Для целей настоящего исследования, а именно сопоставительной оценки формы и периода колебаний объектов до и по истечении определенного знакопеременного воздействия, логично предположить постоянство матрицы масс ( $[M] = \text{const}$ ). При такой постановке, ввиду малости демпфирования, независимо от фактического объемно-планировочного решения и его модельного представления, только изменение жесткости в результате различных эксплуатационных факторов может привести к изменению динамических параметров объекта. Поэтому дальнейший анализ выполнен для простой (по классификации СП 14.13330.2014, п. 5.3) конструктивной схемы, при которой приемлемо использование РДМ консольного типа. В этом случае поэтажная жесткость на сдвиг составит [4]

$$k = \sum \frac{12\tilde{E}_b I_c}{h^3} \frac{12\rho + 1}{12\rho + 4}, \quad (3)$$

где  $\tilde{E}_b I_c$  – изгибная жесткость вертикального элемента;

$h$  – высота этажа;

$\rho = I_b / 4I_c$  учитывает податливость перекрытия;

$I_b$  – момент инерции перекрытия.

Здесь единственным параметром, чувствительным к рассматриваемым воздействиям, является модуль деформации  $\tilde{E}_b$ . Учитывая объективную зависимость деформаций бетона от уровня нагружения, а также ограничения, накладываемые методом разложения системы на формы колебаний, практическое раскрытие рассматриваемой неопределенности возможно путем линеаризации экспериментально полученных зависимостей  $\sigma_b - \varepsilon_b$  и использования гипотезы плоских сечений.

Линеаризация реальных диаграмм с учетом отжимаемых при ВД остаточных деформаций  $\varepsilon_{\text{res}}$  осуществлялась по принципу соблюдения тождественности определенного, зависящего от относительных напряжений, значения деформаций  $\varepsilon_{b1}$ . При этом (по аналогии с рекомендациями СП 63.13330.2012 п. 6.1.13–6.1.16) линеаризация диаграммы выполнялась путем коррекции секущего модуля с учетом коэффициента  $\varphi_b$ :

$$\varphi_b = \frac{1}{\gamma_E} - 1, \quad (4)$$

$$\gamma_E = \frac{E_{b(N)}}{E_{b(0)}}, \quad (5)$$

где  $E_{b(N)}$  – секущий модуль деформации на  $N$ -м цикле деформирования;  $E_{b(0)}$  – на 1-м цикле деформирования (соответствует серии «B0»).

Проверка приведенной гипотезы относительно изменения динамических параметров зданий при фоновых сейсмовоздействиях проведена методом численного моделирования при следующих граничных условиях:

– база знакопеременных нагрузений соответствует 100 циклам воздействий при уровне напряжений  $\eta = 0,8$  и асимметрии  $\rho = 0$ ;

– за  $\varepsilon_{b1}$  приняты деформации, соответствующие (по СП) первой ступени трехлинейной деформационной модели  $\sigma_b = 0,6\sigma_u$ .

Трансформированный вид линеаризованного поведения бетона на начальном и конечном этапах воздействий представлен на рис. 3. Среднее значение  $\gamma_E$ , полученное в ходе анализа, составляет  $\gamma_E = 0,65$ .

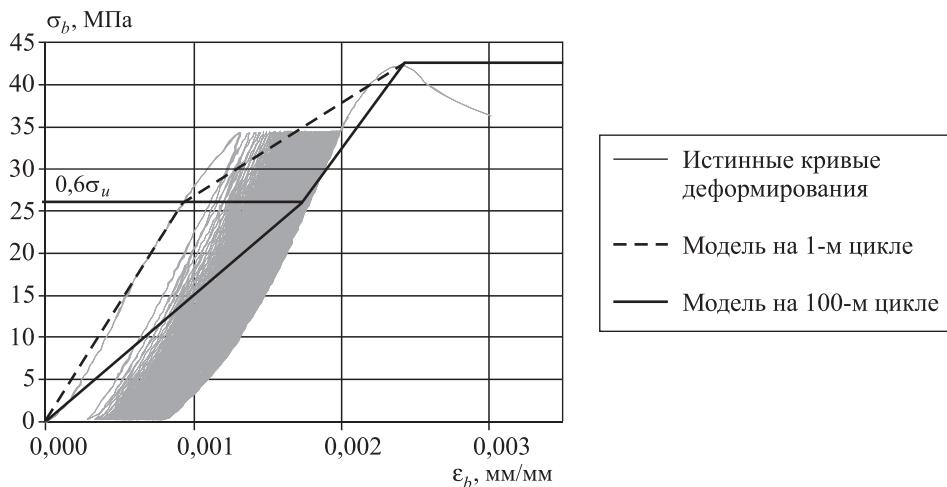


Рис. 3. Построение трехлинейной нормативной модели бетона

Сопоставительный анализ динамических параметров выполнен для модели четырехэтажного железобетонного каркасно-связевого здания при начальных параметрах системы, соответствующих серии В0, с учетом вероятности равномерного (ВД-а) и неравномерного (ВД-б) по высоте здания физического износа несущих колонн. Подобным образом учтено возможное различие в уровне максимума амплитуды напряжений колонн нижнего и последующих ярусов.

Определение собственных частот и форм колебаний выполнено из уравнения (2) с использованием стандартных методов. Тогда период колебаний  $T_j$  и эффективная модальная масса  $\mu_j$  (для  $j$ -й собственной формы) находятся по формулам:

$$T_j = \frac{2\pi}{\omega_j}, \quad (6)$$

$$\mu_j = \Gamma_j \frac{\sum_{k=1}^N m_k \Phi_{j,k}}{\sum_{k=1}^N m_k}, \quad (7)$$

$$\Gamma_j = \frac{\{\Phi_j\}^T [M] \{J\}}{\{\Phi_j\}^T [M] \{\Phi_j\}}, \quad (8)$$

где  $N$  – количество узлов в системе;

$m_k$  – масса, сконцентрированная в соответствующем узле;  
 $\{J\}$  – вектор направляющих косинусов по степеням свободы;  
 $\Gamma_j$  – модальный коэффициент участия  $j$ -й формы. Коэффициент  $\Gamma_j$  получен в результате стандартной процедуры разложения по собственным формам уравнения вынужденных колебаний системы.

Таблица 2. Динамические характеристики зданий

Параметр	Форма колебаний	Условия деформирования		
		СН	НмПН-а	НмПН-б
Период колебаний $T$ , с	1	0,284	0,335	0,374
	2	0,096	0,116	0,113
Эффективная модальная масса $\mu$ , %	1	89,3	89,3	96,8
	2	8,4	8,4	2,9

Результаты численного моделирования с обеспеченностью 95 % (табл. 2) показывают, что при НмПН-а знакопеременные нагрузления с заданной интенсивностью приводят к увеличению периода собственных колебаний на 11 и 18 % при оценке соответственно по средним значениям и с 95%-й обеспеченностью. Неравномерный сейсмический износ конструкций преимущественно в уровне первого этаже приводит к значительно большему (31 %) увеличению периода основного тона колебаний при расчетной ( $\geq 95\%$ ) обеспеченности, что обусловлено особенностями рассматриваемой

каркасно-связевой конструктивной схемы. Аналогичные выводы следуют и из анализа форм собственных колебаний (рис. 4) – изменений форм и роста эффективной модальной массы основного тона на 7,5 %. Динамическое поведение здания происходит по схеме гибкого первого этажа, которая является нежелательной для каркасных конструктивных систем в железобетонном исполнении [5].

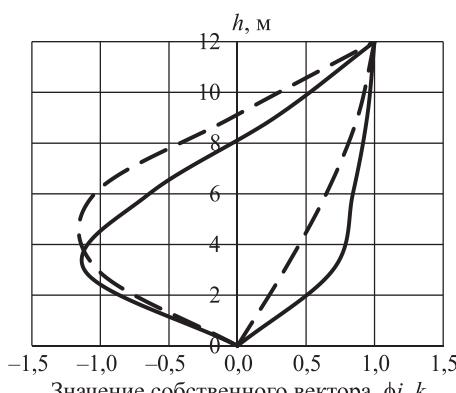


Рис. 4. Формы колебаний для В0 (пунктирные) и ВД-б (сплошные линии)

тона колебаний, логарифмического декремента затухания колебаний и эффективной модальной массы.

2. Установленная времененная структурная модификация железобетонных элементов в сейсмических районах должна быть учтена соответствующей коррекцией используемых расчетно-динамических моделей на рассматриваемый срок эксплуатации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Созонов П.С., Пинус Б.И. Влияние скорости нагружения на конструктивные свойства бетона // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 6. С. 117–120.

2. Созонов П.С., Пинус Б.И. Статистические закономерности изменения прочности железобетонных конструкций при циклических знакопеременных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 6. С. 33–36.
3. Созонов П.С., Пинус Б.И. Изменения свойств бетонов при малоцикловых воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 4. С. 48–51.
4. Клапф Р., Пензисен Дж. Динамика сооружений: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
5. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий. Основы теории сейсмостойкости. М.: Вышш. шк., 1983. 304 с.
6. Котляровский В.А. Диагностика скрытых дефектов сейсмостойких сооружений по изменению частотного спектра // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 36–42.
7. Корчинский И.Л. Сейсмостойкое строительство зданий: учеб. пособие для вузов / под ред. И.Л. Корчинского. М.: Вышш. шк., 1971. 320 с.
8. Chopra A.K. Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering. New Jersey: Prentice Hall, USA, 1995.

**Пинус Борис Израилевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: pinus@istu.irk.ru  
Иркутский национальный исследовательский технический университет  
**Созонов Павел Сергеевич**, асп.; E-mail: sozonovps@gmail.com  
Иркутский национальный исследовательский технический университет

Получено 22.03.16

**Pinus Boris Izrailevich**, DSc, Professor; E-mail: pinus@istu.irk.ru  
National Research Irkutsk State Technical University, Russia  
**Sozonov Pavel Sergeevich**, Post-graduate Student; E-mail: sozonovps@gmail.com  
National Research Irkutsk State Technical University, Russia

## **RC BUILDING DETERIORATION FEATURES UNDER SEISMIC LOADINGS**

Significant statistic changes of the damping coefficient, the natural period and eigenvectors of RC building under low-cycle loading were estimated basing on experimental data. The deterioration rate of RC elements caused by seismic activity can be assessed by dynamic parameters difference. The risk reduction can be achieved using the dynamic model correction on the design stage taking into account the operation time and seismic region hazard.

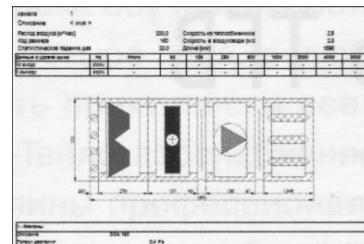
**К e y w o r d s:** concrete, damping decrement, natural period, seismic deterioration, low-cycle loadings.

## **REFERENCES**

1. Sozonov P.S., Pinus B.I. Vliyanie skorosti nagruzheniya na konstruktivnye svoystva betona [Loading rate effect on concrete structural characteristics]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015. No. 6. Pp. 117–120. (in Russia)
2. Sozonov P.S., Pinus B.I. Statisticheskie zakonomernosti izmeneniya prochnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy pri tsiklicheskikh znakoperemennykh vozdeystviyah [Strength statistics changes of reinforced concrete elements under reversal cyclic

- loading]. Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake engineering. Safety of structures]. 2015. No. 6. Pp. 33–36. (in Russia)
3. Sozonov P.S., Pinus B.I. Izmeneniya svoystv betonov pri malotsiklovym vozdeystviyakh [Concrete characteristics changes under low-cycle loading]. Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake engineering. Safety of structures]. 2015. No. 4. Pp. 48–51. (in Russia)
4. Cough R.W., Penzien J. Dynamics of structures. N. Y., 1975.
5. Polyakov S.V. Seismostoykie konstruktsii zdaniy. Osnovy teorii seismostoykosti [Earthquake resistant building constructions. Basis of earthquake]. Moscow, 1983. 304 p. (in Russia)
6. Kotlyarevskiy V.A. Diagnostika skrytykh defektov seysmostoykikh sooruzheniy po izmeneniyu chastotnogo spectra [Diagnosis of latent defects earthquake resistant structures on the change of the frequency spectrum]. Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake engineering. Safety of structures]. 2014. No. 4. Pp. 36–42. (in Russia)
7. Korchinskiy I.L. Seismostoykoe stroitel'stvo zdaniy [Earthquake resistant building]. Moscow, 1971. 320 p. (in Russia)
8. Chopra A.K. Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering. New Jersey, Prentice Hall, USA, 1995.
-

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.042 : 534.014

А.В. ДУКАРТ

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

### Ч а с т ь 1. ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО ВИДА

Рассматриваются вынужденные колебания линейной двухмассовой системы с последовательным соединением звеньев без трения. Предполагается, что возмущающая нагрузка описывается периодическими функциями общего вида, удовлетворяющими условиям Дирихле. Используя функции, выражающие реакцию системы на действие единичной ступенчатой нагрузки, в замкнутой форме получено точное решение задачи о стационарных колебаниях системы с периодом внешнего воздействия. В качестве тестовых примеров найдены законы движения рассматриваемой системы при гармонической и «пилюобразной» возмущающей нагрузках.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** консервативная система, степень свободы, произвольная периодическая нагрузка, стационарные (установившиеся) колебания, периодическое решение.

Наряду с гармоническими нагрузками на здания, сооружения и отдельные конструкции, создаваемые большинством машин непрерывного действия [1], в промышленном и гражданском строительстве, транспортном и энергетическом машиностроении и других областях техники широко распространены периодические нагрузки, законы изменения которых во времени являются достаточно сложными функциями [2]. Проблема построения периодических решений, описывающих стационарные колебания дискретных и континуальных механических систем, при таких воздействиях существенно усложняется и для ее реализации предложены различные подходы и методы; некоторые из них перечислены в работах [3–5]. В частности, для определения вынужденных колебаний линейных консервативных и неконсервативных систем с одной и двумя степенями свободы при возмущающих нагрузках произвольного вида (как периодических, так и непериодических) используется реакция системы на действие единичного импульса [4, 6].

В статьях [3, 5] для отыскания периодических режимов колебаний системы с одной степенью свободы как при отсутствии, так и при наличии сил сопротивления реализован подход, в основу которого положена реакция системы на действие единичной ступенчатой нагрузки. В настоящей статье

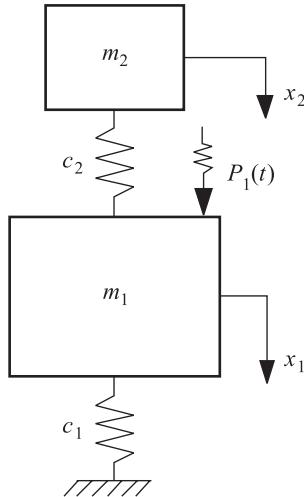


Рис. 1. Консервативная система с двумя степенями свободы с последовательным соединением звеньев

аналогичный способ используется для определения установившихся колебаний линейной консервативной системы с двумя степенями свободы, расчетная схема которой приведена на рис. 1, где через  $m_j$ ,  $c_j$ ,  $k_j$ ,  $x_j$  обозначены соответственно масса, квазиупругий коэффициент и абсолютная координата массы  $j$ -го звена;  $j = 1, 2$ .

Как в работах [3–5], принимается, что возмущающая нагрузка описывается периодическими функциями произвольного вида  $P_1(t)$  периода  $T$ , которые в интервале  $0 \leq t \leq T$  удовлетворяют условиям Дирихле [7]. Для определенности будем считать, что воздействие  $P_1(t)$  приложено к массе  $m_1$  (см. рис. 1). С учетом введенных обозначений имеем следующие дифференциальные уравнения движения рассматриваемой системы:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) &= P_1(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (x_2 - x_1) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Общее решение  $x_j(t)$  системы уравнений (1) складывается [7] из какого-либо его частного  $x_j^*(t)$  и общего решения  $x_j^0(t)$  соответствующей (1) системы однородных уравнений при ненулевых начальных условиях движения системы, т.е.

$$x_j(t) = x_j^0(t) + x_j^*(t); \quad j = 1, 2. \quad (2)$$

Общее решение однородных уравнений, соответствующее свободным колебаниям системы, запишем в форме вещественных функций отклонений масс, полученных в [8] для более общего случая неконсервативной много-массовой системы. В рассматриваемой системе демпфирование в ее звеньях не учитывается и функции  $x_j^0(t)$  могут представлены в виде:

$$x_1^0(t) = \sum_{v=1}^2 (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t); \quad (3)$$

$$x_2^0(t) = \sum_{v=1}^2 \beta_v (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t).$$

Здесь  $\beta_v$  – коэффициенты распределения амплитуд собственных колебаний системы

$$\beta_v = c_2 / (c_2 - m_2 \omega_v^2) = \omega_{02}^2 (\omega_{02}^2 - \omega_v^2); \quad v = 1, 2; \quad (4)$$

$\omega_{02} = \sqrt{c_2 / m_2}$  – парциальная частота собственных колебаний второго звена системы;

$\omega_v$  – частоты собственных колебаний, определяемые как для системы с двумя степенями свободы [6]. Квадраты частот являются положительными корнями уравнения

$$m_1 m_2 \omega^4 - [(c_1 + c_2)m_2 + c_2 m_1]\omega^2 + c_1 c_2 = 0 \quad (5)$$

и вычисляются по формулам:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{(m_1 + m_2)c_2 + m_2c_1}{2m_1m_2} \mp \sqrt{\left[ \frac{(m_1 + m_2)c_2 + m_2c_1}{2m_1m_2} \right]^2 - \frac{c_1c_2}{m_1m_2}}. \quad (6)$$

Произвольные постоянные  $\alpha_{2v-1}^*$ ,  $\alpha_{2v}^*$  должны быть выбраны таким образом, чтобы выполнялись начальные условия движения системы.

Для определения частного решения уравнений (1) предварительно рассмотрим колебания системы, вызываемые единичной ступенчатой силой  $P_1 = 1$ , приложенной к массе  $m_1$  покоящейся системы в момент времени  $t = \tau$ . Общее решение системы уравнений (1), соответствующее такому воздействию, описывается функциями:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1^*(t) &= \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}^* \cos \omega_v(t-\tau) - \alpha_{2v}^* \sin \omega_v(t-\tau)] + \frac{1}{c_1}; \\ \tilde{x}_2^*(t) &= \sum_{v=1}^2 \beta_v [\alpha_{2v-1}^* \cos \omega_v(t-\tau) - \alpha_{2v}^* \sin \omega_v(t-\tau)] + \frac{1}{c_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

В момент приложения силы  $P_1 = 1$  система находится в состоянии покоя, поэтому для определения постоянных  $\alpha_{2v-1}^*$ ,  $\alpha_{2v}^*$  необходимы нулевые начальные условия

$$\tilde{x}_j(\tau) = 0; \quad \dot{\tilde{x}}_j(\tau) = 0; \quad j = 1, 2. \quad (8)$$

Подставляя функции (7) в условия (8), приходим к системе алгебраических уравнений относительно постоянных, решение которой имеет вид

$$\alpha_1^* = \frac{(1-\beta_2)}{c_1(\beta_2 - \beta_1)}; \quad \alpha_2^* = 0; \quad \alpha_3^* = \frac{(\beta_1 - 1)}{c_1(\beta_2 - \beta_1)}; \quad \alpha_4^* = 0. \quad (9)$$

Внося (9) в (8), получим искомую реакцию консервативной системы с двумя степенями свободы на действие единичной ступенчатой нагрузки:

$$\begin{aligned} R_1(t-\tau) &= \frac{1}{c_1} \left[ \frac{(1-\beta_2)}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_1(t-\tau) + \frac{(\beta_1 - 1)}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_2(t-\tau) + 1 \right]; \\ R_2(t-\tau) &= \frac{1}{c_1} \left[ \frac{(1-\beta_2)\beta_1}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_1(t-\tau) + \frac{(\beta_1 - 1)\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} \cos \omega_2(t-\tau) + 1 \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Перейдем к определению движения системы при произвольной возмущающей нагрузке  $P_1(t)$ , представив ее как сумму конечных и «бесконечно малых» разрывных функций [9]: в начальный момент времени ( $t = 0$ ) прикладывается нагрузка  $P_1(0)$ , а в момент времени  $t = \tau$  – бесконечно малая нагрузка  $dP_1 = \dot{P}_1(\tau)d\tau$ , где  $\dot{P}_1(\tau)$  – скорость изменения нагрузки. Используя реакцию системы на действие внезапно приложенной единичной нагрузки в виде функций (10) и суммируя эффект всех ранее приложенных нагрузок, в момент времени  $t$  имеем:

$$x_j^*(t) = P_1(0)R_j(t) + \int_0^t \dot{P}_1(\tau)R_j(t-\tau)d\tau, \quad (11)$$

где  $R_j(t)$  соответствует (10) при  $\tau = 0$ ;  $j = 1, 2$ .

Подставляя далее (3) и (11) в (2), найдем общее решение, описывающее полное движение рассматриваемой системы при произвольном возмущающем воздействии:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \sum_{v=1}^2 (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t) + P_1(0)R_1(t) + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) R_1(t-\tau) d\tau; \\x_2(t) &= \sum_{v=1}^2 \beta_v (\alpha_{2v-1} \cos \omega_v t - \alpha_{2v} \sin \omega_v t) + P_1(0)R_2(t) + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) R_2(t-\tau) d\tau.\end{aligned}\quad (12)$$

При этом очевидно, что функции отклонений (12) справедливы для любых начальных и периодических условий движения системы.

Вернемся к непосредственному решению исходной задачи определения стационарных колебаний системы. В первой части статьи ограничимся рассмотрением стационарного режима движения системы для наиболее общего случая периодической нагрузки  $P_1 = (t) - P_1(t+T) \equiv 0$ . Для того чтобы найти установившиеся колебания системы с периодом  $T$  внешнего воздействия  $P_1(t)$ , необходимо постоянные  $\alpha_{2v-1}$ ,  $\alpha_{2v}$  решения (12) подчинить условиям периодичности движения масс системы в интервале времени  $0 \leq t \leq T$ :

$$x_j(T) = x_j(0); \quad \dot{x}_j(T) = \dot{x}_j(0); \quad j = 1, 2. \quad (13)$$

Используя (12) и (10), выразим отклонения  $x_j(t)$  и скорости  $\dot{x}_j(t)$  масс системы в моменты времени  $t = 0$  и  $t = T$  и внесем их в условия (13). В результате получим систему алгебраических уравнений относительно постоянных в виде:

$$\begin{aligned}\sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}(1 - \cos \omega_v T) + \alpha_{2v} \sin \omega_v T] &= a_1; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1}(1 - \cos \omega_v T) + \alpha_{2v} \sin \omega_v T] \beta_v &= a_2; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1} \sin \omega_v T - \alpha_{2v}(1 - \cos \omega_v T)] \omega_v &= a_3; \\ \sum_{v=1}^2 [\alpha_{2v-1} \sin \omega_v T - \alpha_{2v}(1 - \cos \omega_v T)] \omega_v \beta_v &= a_4.\end{aligned}\quad (14)$$

Здесь

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{1}{c_1} \left\langle P_1(T) + \sum_{v=1}^2 d_v \{ [P_1(0) + U_v] \cos \omega_v T + V_v \sin \omega_v T \} \right\rangle; \\ a_2 &= \frac{1}{c_1} \left\langle P_1(T) + \sum_{v=1}^2 d_v \beta_v \{ [P_1(0) + U_v] \cos \omega_v T + V_v \sin \omega_v T \} \right\rangle; \\ a_3 &= \frac{1}{c_1} \left\langle \dot{P}_1(T) - \dot{P}_1(0) + \sum_{v=1}^2 d_v \omega_v \{ V_v \cos \omega_v T - [P_1(0) + U_v] \sin \omega_v T \} \right\rangle; \\ a_4 &= \frac{1}{c_1} \left\langle \dot{P}_1(T) - \dot{P}_1(0) + \sum_{v=1}^2 d_v \omega_v \beta_v \{ V_v \cos \omega_v T - [P_1(0) + U_v] \sin \omega_v T \} \right\rangle,\end{aligned}\quad (15)$$

где

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

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

В приведенных уравнениях (14) и обозначениях (15) учтено, что

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

в том числе при  $t = T$ .

Используя правило Крамера [7], найдем решение системы уравнений (14) в замкнутой форме:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_2 - \beta_2 a_1) + \frac{1}{\omega_1} (a_4 - \beta_2 a_3) \operatorname{ctg} 0,5\omega_1 T]; \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(a_2 - \beta_2 a_1) \operatorname{ctg} 0,5\omega_1 T - \frac{1}{\omega_1} (a_4 - \beta_2 a_3)]; \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(\beta_1 a_1 - a_2) + \frac{1}{\omega_2} (\beta_1 a_3 - a_4) \operatorname{ctg} 0,5\omega_2 T]; \\ \alpha_4 &= \frac{1}{2(\beta_1 - \beta_2)} [(\beta_1 a_1 - a_2) \operatorname{ctg} 0,5\omega_2 T - \frac{1}{\omega_1} (\beta_1 a_3 - a_4)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя (16) в (12), с учетом обозначений (10) и (15) получим искомое периодическое решение в виде:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \frac{1}{c_1} P_1(t) + \frac{1}{2c_1(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 \left\langle \frac{b_v}{\sin 0,5\omega_v T} \{ [P_1(0) + U_v] \sin \omega_v (t + 0,5T) - \right. \\ &\quad \left. - V_v \cos \omega_v (t + 0,5T) - P_1(T) \sin \omega_v (t - 0,5T) + \frac{1}{\omega_v} [\dot{P}_1(T) - \dot{P}_1(0)] \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \omega_v (t - 0,5T) \} - 2b_v [P_1(0) \cos \omega_v t + \int_0^t P_1(\tau) \cos \omega_v (t - \tau) d\tau] \right\rangle; \\ x_2(t) &= \frac{1}{c_1} P_1(t) + \frac{1}{2c_1(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 \left\langle \frac{b_v \beta_v}{\sin 0,5\omega_v T} \{ [P_1(0) + U_v] \sin \omega_v (t + 0,5T) - \right. \\ &\quad \left. - V_v \cos \omega_v (t + 0,5T) - P_1(T) \sin \omega_v (t - 0,5T) + \frac{1}{\omega_v} [\dot{P}_1(T) - \dot{P}_1(0)] \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \omega_v (t - 0,5T) \} - 2b_v \beta_v [P_1(0) \cos \omega_v t + \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v (t - \tau) d\tau] \right\rangle. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь для упрощения записи уравнений движения введены дополнительные обозначения

$$b_1 = \beta_2 - 1; \quad b_2 = 1 - \beta_1. \quad (18)$$

Уравнения (17) определяют колебания рассматриваемой системы в промежутке времени  $0 \leq t \leq T$ , причем, как и для системы с одной степенью

свободы [3, 5], найденное решение, удовлетворяющее условиям (13), является периодическим с периодом  $T$  возмущающей нагрузки. Зная законы движения масс системы в интервале  $[0, T]$ , можно полученное решение без изменений сместить в соседние промежутки времени.

Отметим, что периодическое решение в форме (17) сохраняется и в том случае, когда возмущающее воздействие задано силой  $P_2(t)$ , приложенной к массе  $m_2$ .

С целью сопоставления уравнений движения рассматриваемой системы, определяемых с помощью полученного решения, с известными, найдем, прежде всего, ее колебания, вызываемые гармонической силой  $P_1(t) = P_0 \sin \theta t$ , приложенной к массе  $m_1$ , где  $P_0$  – амплитуда и  $\theta$  – частота воздействия. Для такого воздействия имеем:

$$\begin{aligned} P_1(0) &= P_1(T) = 0; \quad \dot{P}_1(0) = \dot{P}_1(T) = P_0 \theta; \\ U_v &= -\frac{P_0 \theta \omega_v}{(\theta^2 - \omega_v^2)} \sin \omega_v T; \quad V_v = \frac{P_0 \theta \omega_v}{(\theta^2 - \omega_v^2)} (\cos \omega_v T - 1); \\ \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v \tau d\tau &= \frac{P_0 \theta}{(\theta^2 - \omega_v^2)} (\theta \sin \theta t \cos \omega_v t - \omega_v \cos \theta t \sin \omega_v t); \\ \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \sin \omega_v \tau d\tau &= \frac{P_0 \theta}{(\theta^2 - \omega_v^2)} [\omega_v (\cos \theta t \cos \omega_v t - 1) + \theta \sin \theta t \sin \omega_v t]; \quad v = 1, 2. \end{aligned} \tag{19}$$

Подставим (19) в исходные уравнения (17), выполнив простые алгебраические преобразования, с учетом (4) и (18) получим

$$x_1(t) = \frac{P_0 \omega_1^2 \omega_2^2 (\omega_{02}^2 - \theta^2)}{c_1 [\theta^4 - (\omega_1^2 + \omega_2^2) \theta^2 + \omega_1^2 \omega_2^2] \omega_{02}^2} \sin \theta t; \tag{20}$$

$$x_1(t) = \frac{P_0 \omega_1^2 \omega_2^2}{c_1 [\theta^4 - (\omega_1^2 + \omega_2^2) \theta^2 + \omega_1^2 \omega_2^2] \omega_{02}^2} \sin \theta t. \tag{21}$$

Для квадратов частот собственных колебаний системы, вычисляемых по формулам (6), как для корней биквадратного уравнения (5), справедливы соотношения

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = [(m_1 + m_2)c_2 + m_2 c_1]/(m_1 m_2); \quad \omega_1^2 \omega_2^2 = c_1 c_2 / (m_1 m_2). \tag{22}$$

Внося (22) в (20) и (21), найдем

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \frac{P_0 (c_2 - m_2 \theta^2)}{[(c_1 + c_2 - m_1 \theta^2)(c_2 - m_2 \theta^2) - c_2^2]} \sin \theta t; \\ x_2(t) &= \frac{P_0 c_2}{[(c_1 + c_2 - m_1 \theta^2)(c_2 - m_2 \theta^2) - c_2^2]} \sin \theta t. \end{aligned} \tag{23}$$

Решение (23) совпадает с известными уравнениями движения системы с двумя степенями свободы, приведенными практически во всех известных курсах теории колебаний (см., например, [6]).

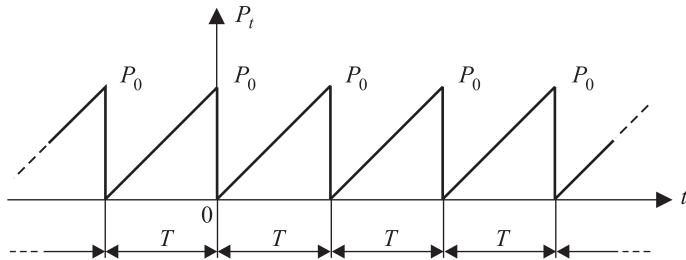


Рис. 2. «Пилообразная» возмущающая нагрузка

В качестве другого примера установим закон стационарных колебаний системы с двумя степенями свободы, вызываемых «пилообразной» периодической возмущающей силой (рис. 2), приложенной к массе  $m_1$ . Такая нагрузка в интервале времени  $[0, T]$  описывается линейной функцией  $P_1(t) = (t/T)P_0$ . Для рассматриваемого воздействия:

$$P_1(0)=0; \quad P_1(T)=P_0; \quad \dot{P}(t)=\dot{P}_1(0)=\dot{P}_1(T)=\frac{1}{T}P_0;$$

$$U_v = \frac{P_0}{\omega_v T} \sin \omega_v T; \quad V_v = \frac{P_0}{\omega_v T} (1 - \cos \omega_v T); \quad (24)$$

$$\int_0^t \dot{P}_1(\tau) \cos \omega_v \tau d\tau = \frac{P_0}{\omega_v T} \sin \omega_v t; \quad \int_0^t \dot{P}_1(\tau) \sin \omega_v \tau d\tau = \frac{P_0}{\omega_v T} (1 - \cos \omega_v t).$$

Подставляя (24) в (17), после элементарных выкладок найдем уравнения стационарных колебаний системы в виде:

$$x_1(t) = \frac{P_0}{c_1} \left[ \frac{t}{T} - \frac{1}{2(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 \frac{b_v \sin \omega_v (t - 0,5T)}{\sin 0,5 \omega_v T} \right];$$

$$x_2(t) = \frac{P_0}{c_1} \left[ \frac{t}{T} - \frac{1}{2(b_1 + b_2)} \sum_{v=1}^2 \frac{b_v \beta_v \sin \omega_v (t - 0,5T)}{\sin 0,5 \omega_v T} \right]. \quad (25)$$

Непосредственной подставкой функций отклонений масс системы (25) и их производных можно убедиться в выполнении условий периодичности (13). Отметим, что уравнения установившихся колебаний рассматриваемой системы в виде (25) могут быть получены также с помощью периодического решения, приведенного в статье [4].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Динамический расчет зданий и сооружений: справ. проектировщика / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
2. Вибрации в технике: справ. Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
3. Дукарт А.В. К определению установившихся колебаний линейной системы при произвольной периодической возмущающей нагрузке // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 5–12.
4. Дукарт А.В. Об установившихся колебаниях двухмассовой системы с демпфированием при произвольной периодической возмущающей нагрузке // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 3–4. С. 3–13.

5. Дукарт А.В. Стационарные режимы колебаний линейной неконсервативной системы при периодических воздействиях произвольного вида // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 9. С. 5–11.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Политехника, 1990. 272 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
8. Дукарт А.В. Способ построения периодических режимов движения многомассовых виброударных систем и его применение к расчету ударного гасителя колебаний с демпфированием // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 3. С. 16–22.
9. Тонг Кин Н. Теория механических колебаний. М.: Машгиз, 1963. 352 с.

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

Получено 11.03.16

**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 1. GENERAL PERIODIC DISTURBANCE**

Forced vibrations of a linear undamped two-mass system connected in series are considered. It is assumed that the exciting loads are general periodic functions satisfying the Dirichlet conditions. Applying functions of the system response resulting from the application of the unit step load, the exact closed-form solution of vibrations of the system with the period of excitation is obtained. As examples, the vibrations of the system under harmonic and «saw tooth» loads are found.

**Keywords:** conservative system, degree of freedom, arbitrary periodic load, stationary (steady state) vibration, periodic solution.

### **REFERENCES**

1. 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)
2. Vibratsii v tekhnike: sprav. T. 4: Vibratsionnye protsessy i mashiny; pod red. E.E. Lavendela [Vibrations in technique: Handbook. Vol. 4. Vibration processes and machines; ed. by E.E. Lavendel]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 509 p. (in Russia)
3. Dukart A.V. K opredeleniyu ustannovivshikhsya kolebaniy lineynoy sistemy pri proizvol'noy periodicheskoy vozmushchayushchey nagruzke [Determination of steady state vibrations of linear system under periodic excitation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 8. Pp. 5–12. (in Russia)
4. Dukart 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)

5. 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)
  6. P a n o v k o Ya.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara [Basics of applied theory of vibrations and impact]. Leningrad, Politekhnika, 1990. 272 p. (in Russia)
  7. 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)
  8. D u k a r t A.V. Sposob postroeniya periodicheskikh rezhimov dvizheniya mnogomassovyykh vibroudarnykh sistem i ego prilozhenie k raschetu udarnogo gasitelya kolebaniy s dempfirovaniem [Method for construction of the periodic modes of motion of the multimass vibroimpact systems and its application to the design of impact absorber with damping]. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of engineering and reliability of machines]. 1993. No. 3. Pp. 16–22. (in Russia)
  9. T o n g K i n N. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Theory of mechanical vibration]. Moscow, Mashgiz, 1963. 352 p. (in Russia)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.6.001

В.А. БЕРЕГОВОЙ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Разработаны составы пористых композиционных материалов на стеклокристаллических матрицах, вырабатываемых на основе кремнистого природного сырья. Смоделированы процессы формирования структурно-зависимых свойств материала. Составлен алгоритм проектирования пористого композита по заданным физико-механическим показателям.

**Ключевые слова:** пористые композиционные материалы, моделирование структуры, проектирование составов.

**Введение.** Композиционные стеклокристаллические материалы (СКМ) получают путем ступенчатого охлаждения стекольных расплавов, формирующих заданное количество кристаллической фазы. Особенности химического состава и микроструктуры обеспечивают существенное улучшение свойств СКМ в сравнении с традиционными керамическими или стеклянными аналогами.

Исследования проведены в рамках актуального направления, связанного с разработкой эффективных способов получения пористых композиционных материалов на стеклокристаллических матрицах, вырабатываемых из природного сырья на основе доступных разновидностей кремнистых микропористых горных пород [1, 2].

**Материалы и методы исследования.** Материал изготавливали по технологии, состоящей из подготовительного и двух основных этапов.

Подготовительный этап заключался в измельчении до 5000–6000 см<sup>2</sup>/г предварительно высушенного природного компонента – кремневидной опоки. Состав природной опоки, мас. %:

– химический: SiO<sub>2</sub> – 86,90; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,00; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,90; CaO – 1,29; MgO – 0,63; потери при прокаливании – около 6;

– минералогический: кварц – 15–20, монтмориллонит – 10–15, опаловидный кремнезем – 55–65.

Основные этапы изготовления состояли в получении гранулированной стекломассы определенного химического состава и ее последующей переработки в СКМ.

Модифицирующими добавками являлись стеклообразующие (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) и стабилизирующие вещества (CaO,

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , вводимые в состав сырьевой смеси в количестве 20–35 %. Перед обжигом сырьевую шихту уплотняли ( $P_{\text{пресс}} = 0,6\text{--}0,8 \text{ МПа}$ ), а затем выдерживали в течение 1 ч при температуре 820 °C.

Обжиг материала обеспечивал активацию процессов спекания и формирование фазового состава [3, 4]. По данным рентгенофазового анализа (рис. 1) он представлен стеклом и кристаллической фазой в виде остаточного кварца (Q) и его температурных модификаций – тридимита (T) и кристобалита (K).

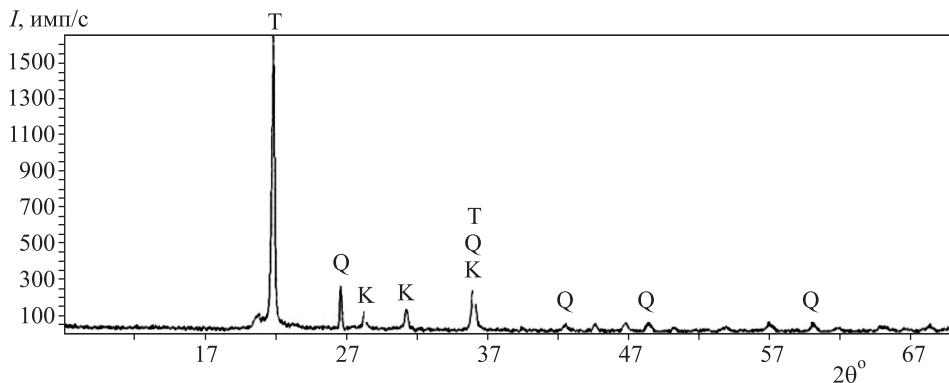


Рис. 1. Рентгенограмма стеклокристаллической матрицы из опочного вещества, модифицированного добавками  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Управление процессами структурообразования осуществлялось варьированием вида и количества вводимого модификатора. Базовые сырьевые смеси содержат все необходимые для формирования кристаллической и стекловидной фаз матричного материала оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{R}_2\text{O}$ ). Источником  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  является природная опока, а оксидов  $\text{R}_2\text{O}$  – химические модификаторы. На рис. 2 приведена модель структурообразующих процессов, происходящих при обжиге опочной шихты при температуре 900–950 °C.

Для определения параметров плавления модифицированной опочной смеси сложный состав формируемого расплава был заменен на отдельные

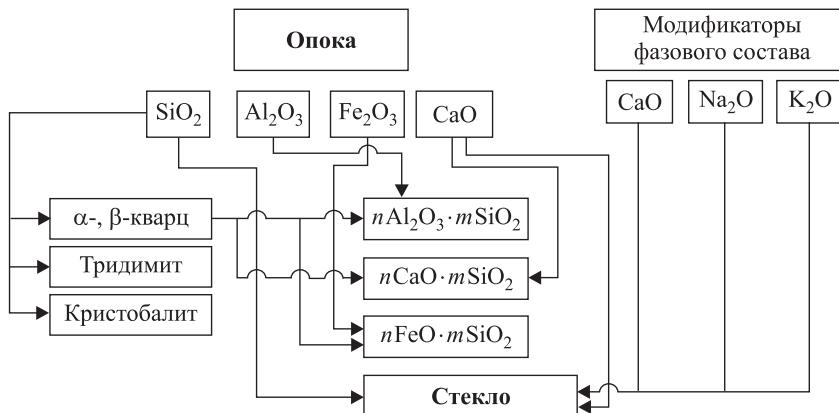


Рис. 2. Модель структурообразующих процессов в системе опока – модификатор фазового состава

эвтектики  $\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  ( $N_2$ ) и  $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  ( $K_2$ ) [5]. Расчет минимальной температуры производили по формуле:

$$T_{(N_2+K_2)} = \frac{N_2 T_{N_2}}{N_2 + K_2} + \frac{K_2 T_{K_2}}{N_2 + K_2}, \quad (1)$$

где  $T_{N_2}$  и  $T_{K_2}$  – температуры соответственно образования расплава состава  $N_2$  и  $K_2$ ;

$N_2 + K_2$  – общее содержание расплавов, %.

Результаты петрохимических расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Количество и температура расплава многокомпонентных систем (эвтектика  $\text{CaO}-\text{Me}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ )

Расплав		Химический состав сырьевой смеси, %				Температура расплава, °C
Вид	Кол-во, %	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	
$N_1$	36,15	76,1	6,2	7,7	10,0	725
$K_1$	39,84	73,5	5,2	21,3		720
$\Sigma N_1 + K_1$	76,0	73,0	1,9		25,1	7230

На заключительном этапе из стеклогранулята синтезировали пористый стеклокомпозит. Для этого стеклогранулят перемалывали в пресс-порошок, из него формировали сырцовую массу, которую вспенивали при обжиге.

**Обсуждение.** Для подбора компонентного состава сырьевой смеси по заданным теплопроводящим и прочностным показателям был использован экспериментально-расчетный, а также теоретический метод исследования взаимозависимостей в системе состав–структура–свойство.

Первый метод основан на статистической обработке экспериментальных данных и позволяет установить совместное влияние нескольких рецептурных факторов (A, B, C). Например, для исследования составов пористых СКМ с газообразователем на основе молотого угля в качестве варьируемых факторов были приняты [6]:

фактор A – содержание измельченной шихты, полученной обжигом при температуре 820 °C смеси, состоящей из природной опоки и модификаторов, % от массы опоки:  $\text{KNO}_3$  – 3–5;  $\text{CaO}$  – 5–6;  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 18–20;

фактор B – содержание флюсующей добавки ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$ );

фактор C – содержание в смеси газообразующей добавки.

Процесс вспенивания образцов проводили по двум режимам. Режим № 1 – медленное поднятие температуры со скоростью ~4 °C/мин и выдержка при достижении максимальной температуры в течение 30 мин (рис. 3).

Режим № 2 – сверхбыстрый нагрев до температуры вспенивания (способ термоудара). Термоудар позволил снизить величину средней плотности материала аналогичного состава на 30–35 %.

Второй метод проектирования предусматривает следующий порядок расчета компонентного состава сырьевой смеси [7]:

1. Оценка максимально допустимой теплопроводности материала матрицы  $\lambda_{matrix}^{3D}$  по заранее заданной теплопроводности пористого СКМ ( $\lambda_{CKM}^{tp}$ ):

$$\lambda_{CKM}^{tp} = \frac{\lambda_{возд} \lambda_{matrix}^{3D} (1 - \sqrt[3]{V_{возд}} + V_{возд}) + \lambda_{matrix}^{3D}^2 (\sqrt[3]{V_{возд}} - V_{возд})}{\lambda_{возд} (1 - \sqrt[3]{V_{возд}}) + \lambda_{matrix}^{3D} \sqrt[3]{V_{возд}}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\text{возд}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot {^\circ}\text{C})$ ;

$V_{\text{возд}}$  – пористость СКМ, рассчитываемая по уравнению

$$V_{\text{возд}} = \left( 1 - \frac{R_{\text{СКМ}}^{\text{тр}} m \left( \frac{B}{T} \right)^n}{0,7 R_{\text{matrix}}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{matrix}}$  – прочность матрицы на сжатие, МПа;

$R_{\text{СКМ}}^{\text{тр}}$  – заданная прочность СКМ, назначаемая не менее показателя прочности конкурирующего аналога (например,  $R_{\text{СКМ}}^{\text{тр}} = R_{\text{пеностекло}} = 1,5-2,0$  МПа);

$B/T$  – соотношение по массе вода–опочное вещество;  $n, m$  – коэффициенты, равные соответственно 3,63 и 26,3.

2. Проверка выполнения условия:

$$\lambda_{\text{matrix}} \leq \lambda_{\text{matrix}}^{\max}, \quad (4)$$

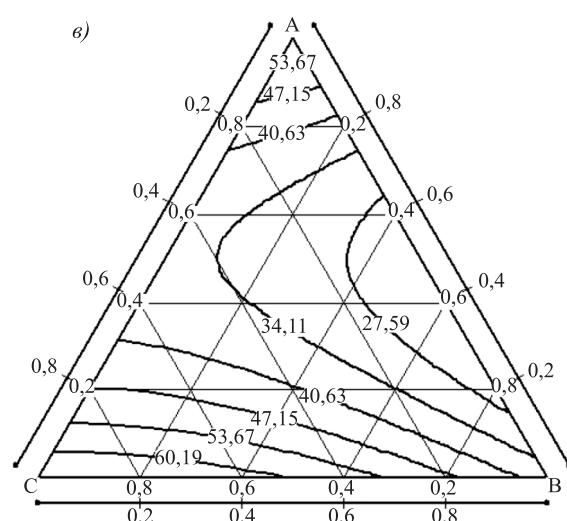
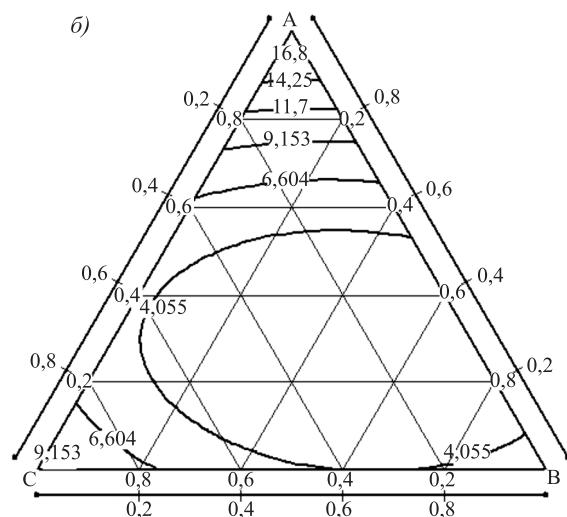
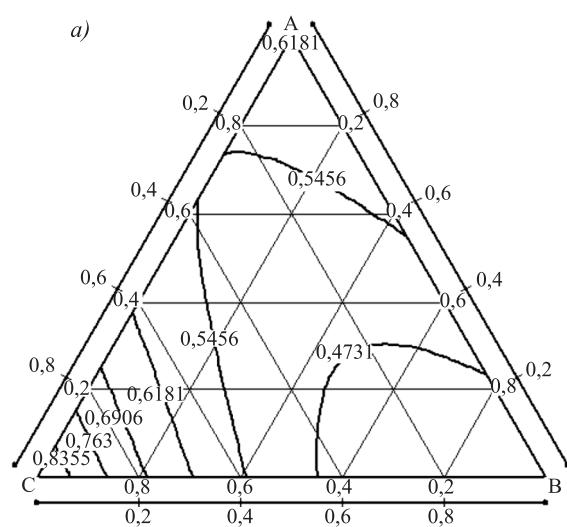
где  $\lambda_{\text{matrix}}$  – экспериментально установленная теплопроводность матрицы базового состава.

3. Выбор альтернатив:

– условие (4) выполняется, анализируемый вариант состава матрицы относится к оптимальным, и процесс проектирования завершается;

– условие (4) не выполняется, процесс оптимизации фазового состава матрицы по теплофизическим и прочностным свойствам продолжается (п. 4).

Рис. 3. Влияние компонентного состава на свойства пористых СКМ  
а – плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ ; б – водопоглощение, %; в – прочность,  $\text{кгс}/\text{см}^2$



4. Корректировка фазового состава СКМ производится по зависимости теплопроводности матрицы от объемного содержания кристаллической и стекловидной составляющих:

$$\lambda_{matrix} = \frac{\lambda_k \lambda_{ct} (1 - \sqrt[3]{V_k} + V_k) + \lambda_{ct}^2 (\sqrt[3]{V_k} - V_k)}{\lambda_k (1 - \sqrt[3]{V_k}) + \lambda_{ct} \sqrt[3]{V_k}}, \quad (5)$$

где  $V_k$  – относительный объем кристаллической фазы, отн. ед.;  $\lambda_k$  и  $\lambda_{ct}$  – теплопроводность соответственно кристаллической и стекловидной фазы, Вт/(м · °C).

5. Проверка возможности повышения теплоизолирующих свойств матричного вещества за счет увеличения содержания стекловидной фазы без изменения компонентного состава сырьевой смеси (путем изменения параметров обжига):

$$\lambda_{ct} \ll \lambda_{matrix}^{3dn} < \lambda_k. \quad (6)$$

6. Корректировка химического состава стекловидной фазы, если условие (6) не выполняется.

7. Выбор химических модификаторов с учетом влияния их оксидного состава на теплопроводящие и прочностные свойства стекловидной фазы [8].

Анализ экспериментальных данных, а также результатов петрохимических расчетов показал, что для улучшения свойств материала по теплоизолирующим и прочностным показателям целесообразно введение в состав следующих добавок:

– боратов, карбонатов, сульфатов, фосфатов и фторидов натрия (калия, магния или кальция), которые сокращают среднее расстояние свободного перемещения тепловых волн за счет большей обособленности кремнекислородных групп;

– свинецсодержащих и иных соединений, в состав которых входят элементы с высокой атомной массой и значительной тепловой инерцией, способствующих диссипации тепловой волны.

Важной рецептурной задачей, возникающей при получении ячеистой керамики из водных суспензий минеральных частиц (шликеров), является снижение показателя водопотребности сырьевой смеси. Это необходимо для формирования в структуре материала малоусадочных межпоровых перегородок повышенной прочности и уменьшения продолжительности и энергоемкости процесса термообработки. Улучшение реотехнологических показателей опочных шликеров было реализовано введением разжижающих добавок, отобранных из перечня модификаторов состава ячеистой керамики. В этом качестве были выбраны неорганические соли натрия, калия и лития, применение которых активирует механизм понижения вязкости, основанный на процессах ионного обмена, а также на изменении электрохимического потенциала частиц твердой фазы.

Экспериментальные зависимости показателя подвижности опочного шликера от содержания разжижающей добавки показаны на рис. 4 и 5.

Данные на рис. 4 показывают, что увеличение содержания большинства добавок до 1 % сопровождается ростом показателя подвижности опочной суспензии в 2,5–3,5 раза. Эффект разжижения обусловлен дефлокуляцией скоплений опочных частиц в результате замещения катионов кальция, распо-



Рис. 4. Влияние Na-содержащей добавки на подвижность шликара

1 –  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ; 2 –  $\text{NaOH}$ ; 3 –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 4 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 5 –  $\text{NaF}$ ; 6 –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ;  
7 –  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ; 8 –  $\text{NaCl}$

ложенных в сольватной оболочке, на одновалентные катионы ( $\text{Na}^+$ ) [5]. Этот процесс приводит к росту величины электрокинетического потенциала и вы-свобождению части связанной воды. Отсутствие разжижающего эффекта при добавлении  $\text{NaCl}$  указывает на важное влияние анионной части разжиже-теля, которое заключается в образовании малорастворимых солей на основе замещаемых двухвалентных катионов.

При превышении порога оптимального содержания добавок происходит возрастание вязкости сырьевой суспензии. Таким образом, область действия механизма разжижения ограничена содержанием в природной опоке примесей, способных гидратироваться с образованием специфических много-зарядных катионов.

Влияние катиона разжижителя на подвижность опочной суспензии пока-зано на графиках, приведенных на рис. 5.

Анализ зависимостей показал, что разжижающий эффект согласуется с размером гидратной оболочки катиона вводимой добавки. Минимальный размер обеспечивает катиону ( $\text{K}^+$ ) повышенную концентрацию в слое Штер-

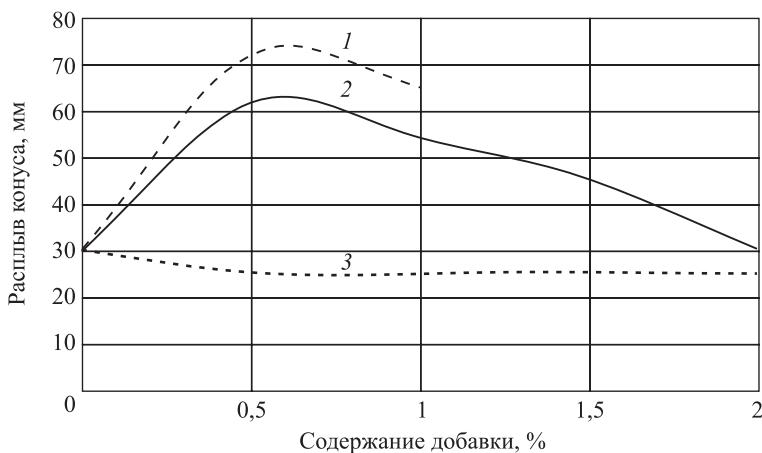


Рис. 5. Влияние катиона добавки на подвижность шликара

1 –  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ; 2 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 3 –  $\text{K}_2\text{CO}_3$

Таблица 2. Эффективность разжижающих добавок

Добавка	Водоредуцирующий эффект	Уменьшение водопотребности, %
Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	1,29	22,6
NaOH	1,25	20,0
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1,1	13,0
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1,05	5,0
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,047	4,55
NaF	1,04	4,0

на, увеличивая тем самым степень экранирования потенциал определяющих ионов на поверхности опоки.

Эффективность добавок оценивали с использованием равноподвижных шликеров, характеризующихся различным водотвердым отношением в непластифицированном и пластифицированном состояниях (табл. 2).

**Выводы.** Метод проектирования пористого композиционного материала был использован при разработке технологии получения пористых стеклокристаллических материалов,рабатываемых из химически модифицированного опочного сырья (табл. 3).

Таблица 3. Свойства материалов

Показатель	Матричный материал	Вид	
		легкий	особо легкий
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	1500–1600	400–970	250–300
Прочность на сжатие, МПа	55–60	2,0–17,0	1,5–1,8
Водопоглощение, мас. %	0,15–0,20	Не более 5	3,0–3,5
Теплопроводность, Вт/(м · °C)	–	0,050–0,065	0,065–0,070

Применение предлагаемых методов проектирования позволило существенно улучшить важнейшие показатели материала при существенном уменьшении объема экспериментальных работ.

Результаты исследований показали, что опочные горные породы являются перспективной минеральной базой для получения обжиговых ячеистых материалов на стеклокристаллических матрицах,рабатываемых на основе кремнистого сырья.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2415817 РФ. Шихта для изготовления стеклогранулята для пеностеклокристаллических материалов / О.В. Казьмина, А.Н. Абияка, В.И. Верещагин, С.Н. Соколова; опубл. 10.04.2011; Бюл. № 10.
2. Пат. 2349563. РФ. Способ получения пенокерамических изделий / М.Г. Габидуллин, А.Г. Хузагарипов; опубл. 20.03.2009; Бюл. № 8.
3. Береговой В.А., Костин Д.С., Береговой А.М. Теплоизоляционная газостеклокерамика на основе кремнистых горных пород // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 43–50.
4. Береговой В.А., Прошина Н.А., Королев Е.В. Жаростойкие пенобетоны. Пенза: ПГУАС, 2007. 111 с.
5. Масленникова Г.Н., Харитонов Ф.Я., Дубов И.В. Расчеты в технологии керамики. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
6. Сорокин Д.С., Береговой В.А. Искусственные пористые заполнители на основе гранулированного пеностекла // Региональная архитектура. 2015. № 2. С. 78–83.

7. Beregovoi V.A., Eremkin A.I., Beregovoi A.M. Heat-resisting foam concrete based on aluminum silicate // Proceedings of the international congress «Concrete: constructions sustainable option», 2008 – UK. Scotland: University of Dandy. 2008. Vol. Concrete for fire Engineering. P. 263–272.
8. Стекло: справ. /под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1973. 487 с.

**Береговой Виталий Александрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: vabereg@rambler.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 10.03.16

**Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich**, DSc, Professor; E-mail: vabereg@rambler.ru  
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **MODELING OF STRUCTURE AND PROPERTY PREDICTION OF POROUS COMPOSITE MATERIALS ON GLASS-CERAMIC MATRIX**

The developed compositions of porous composite materials on glass-ceramic matrices, obtained from the basis of natural siliceous raw materials. Modeled the processes of formation of structural-dependent properties of the material. Scheme design of porous composite according to specified physical and mechanical characteristics.

**К e y w o r d s:** porous composite materials, modeling of structures, design of structures.

### **REFERENCES**

1. Pat. 2415817 RU. Shikhta dlya izgotovleniya steklogranulyata dlya penosteklokristallicheskikh materialov [Mixture for preparing quenched cullet for producing foamed glass-ceramic materials]. O.V. Kazmina, A.N. Abiyaka, V.I. Vereshchagin. Publ. 10.04.2011. Bull. No. 10. (in Russia)
2. Pat. 2349563. RU. Sposob polucheniya penokeramicheskikh izdeliy [The way of the reception foamed ceramic product]. M.G. Gabidullin, A.G. Huzagaripov. Publ. 20.03.2009. Bull. No. 8. (in Russia)
3. Beregovoy V.A., Kostin D.S., Beregovoy A.M. Teploizolyatsionnaya gazosteklokeramika na osnove kremnistykh gornykh porod [Heat-insulating porous glass ceramic on basis of silica clay mountain sorts]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 10. Pp. 43–50. (in Russia)
4. Beregovoy V.A., Proshina N.A., Korolev E.V. Zharostoykie penobetony [Heat-resistant foam concretes]. Penza, 2007. 111 p. (in Russia)
5. Maslenikova G.N., Haritonov F.Ya., Dubov I.V. Raschety v tekhnologii keramiki [The Calculations in technologies of the ceramics]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 320 p. (in Russia)
6. Sorokin D.S., Beregovoy V.A. Iskusstvennye poristye zapolniteli na osnove graniylirovannogo penostekla [Artificial porous fillers on the basis of the granulated foamglass]. Regional'naya arkhitektura [Regional architecture and engineering]. 2015. No. 2. Pp. 78–83. (in Russia)
7. Beregovoy V.A., Eremkin A.I., Beregovoy A.M. Heat-resisting foam concrete based on aluminum silicate. Proceedings of the international congress «Concrete: constructions sustainable option», 2008 – UK. Scotland: University of Dandy. 2008. Vol. Concrete for fire Engineering. Pp. 263–272.
8. Steklo [Glass]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 487 p. (in Russia)

УДК 691.322

В.И. КАЛАШНИКОВ, В.Т. ЕРОФЕЕВ, О.В. ТАРАКАНОВ

## СУСПЕНЗИОННО-НАПОЛНЕННЫЕ БЕТОННЫЕ СМЕСИ ДЛЯ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В статье рассматриваются порошково-активированные бетоны нового поколения. Бетонные смеси для изготовления таких бетонов содержат повышенное количество суспензионной составляющей из цемента, порошкообразных дисперсных добавок из молотых горных пород и тонкого песка для улучшения разжижаемости их суперпластификаторами. Приводятся показатели лучших карбонатных самоуплотняющихся песчаных бетонов с прочностью 140–160 МПа, изготовленных без реакционно-активного микрокремнезема (МК), и сравнение их с лучшими зарубежными бетонами без МК.

**Ключевые слова:** бетоны нового поколения, прочность, порошковая активация, суспензионная составляющая, суперпластификаторы, удельный расход цемента на единицу прочности.

Бетонные пластифицированные смеси старого поколения с составом сухих компонентов «цемент–песок–щебень» и с расходами цемента от 200 до 300 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона практически не разжижаются или плохо разжижаются под действием даже эффективных супер- и гиперпластификаторов, а особенно, если используются средние и крупные пески. С такими смесями невозможно получить саморастекаемость, самоуплотняемость и высокую пластичность их с осадкой конуса (OK), равной 20–25 см без расслоения.

Массовое соотношение песчано-щебеночной составляющей и цемента в бетонах с расходом цемента 200 кг/м<sup>3</sup> составляет (9–10):1, а в бетонах с содержанием цемента 300 кг/м<sup>3</sup> – (6,5–7,0):1. В бетонах с расходом цемента 170 кг/м<sup>3</sup> это соотношение по объему будет (10–12):1. О каком разжижении «тоящих» бетонных смесей, предельно наполненных песчано-щебеночной смесью, неспособных реализовать вязкопластичное течение через тончайшие прослойки цементной суспензии, можно говорить? Суперпластификаторы (СП) практически расходуются впустую.

С позиции реологии причина заключается в недостаточном количестве суспензионной составляющей «цемент–вода–суперпластификатор», ответственной за реологию и разжижение бетонных смесей. Бетон разжижает не суперпластификатор-разжижитель, как таковой, а диспергированная (разжиженная СП) агрегативно-устойчивая суспензия. Песок и щебень не разжижаются суперпластификатором. Он лишь отделяет и диспергирует загрязненные пылью частицы песка и щебня, если они используются немытыми.

Коллектив кафедры технологии строительных материалов и деревообработки (ТСМиД) Пензенского государственного университета архитектуры и строительства в течение 15 лет занимается разработкой, исследованием

и посильным внедрением пластифицированных суспензионно-наполненных порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонных смесей с повышенным содержанием суспензионной составляющей. В «жирных» пластифицированных бетонных смесях старого поколения с расходами цемента 400–500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона также содержится недостаточное количество суспензионной составляющей (цемент–вода–суперпластификатор), ответственной за разжижение бетонных смесей и превращение их в самоуплотняющиеся с ОК = 25–28 см и расплывом из конуса 60–80 см. В порошково-активированных бетонах нового поколения кроме порошкового цемента, как показано нами в многочисленных работах [1–3], образующего суспензионную составляющую, должно содержаться дополнительное количество дисперсного микрометрического минерального наполнителя и тонкого песка фракции 0,1–0,6 мм, образующих суспензию, стабилизированную суперпластификаторами-диспергаторами до состояния агрегативной устойчивости с предельно высокой концентрацией твердой фазы. Состав компонентов бетонов нового поколения строго регулируется в соответствии с нашими разработками и методами расчета. Объемное содержание суспензионной составляющей в щебеночных бетонных смесях должно доходить до 45–50 %, а в песчаных бетонах – до 70–80 %. Как это не удивительно, бетоны до 1960–1970 гг. выпускались по неизменному составу сухих компонентов (цемент–песок–щебень–вода), т.е. в течение 150 лет. Лишь с 1960–1970 гг. в бетоны начали вводить эффективные суперпластификаторы (СП).

Россия существенно отстает от передовых зарубежных стран в производстве самоуплотняющихся, саморастекающихся, самонивелирующихся бетонных смесей и эффективных обычных, не говоря уже об высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов нового поколения.

Коллектив кафедры ТСМиД, можно сказать, единственный в России занимается с 2003 г. разработкой порошково-активированных, суспензионно-наполненных бетонов и фибробетонов нового поколения, которые и по прочностным показателям (от 100 до 200 МПа), и другим физико-техническим свойствам находятся на уровне зарубежных, а порошково-активированные песчаные (мелко-зернистые) бетоны, без добавления реакционно-активных микрокремнеземов, кремнегелей, дегидратированных каолинов и т.п., имеют показатели выше, чем у зарубежных. Необходимо отметить, что пластифицированные высокопрочные и сверхпрочные бетоны начали выпускаться с использованием микрокремнезема с большим расходом цемента (800–900 кг/м<sup>3</sup>). Такой бетон получил название реакционно-порошковый бетон (RPC). Содержание микрокремнезема (МК) в нем было 25 % от массы цемента [4].

Первое использование сверхвысокопрочного порошково-активированного фибробетона с высоким содержанием МК осуществлено в Канаде при строительстве пешеходного моста в Шербруке [5–6]. Высокопрочный и высокоплотный бетон использовался для захоронения ядерных отходов [7]. Добавление к МК порошкообразного кварца, который рекомендовался для пропариваемых и запариваемых (под давлением пара) конструкций [4], превращает суспензионную составляющую в микронанометрическую с диапазоном размеров частиц МК от 100 до 1000 нм, а микрокварца и цемента – от 1 до 100 мкм. Впоследствии многие ученые выдвигали основные требования к микро- и на-

нометрическим наполнителям для получения высокопрочных бетонов, такие как создание плотного зернистого скелета с обеспечением высокоплотной упаковки частиц, в частности, в работе [8].

Однако все эти требования были подробно изложены у основоположников сверхвысокопрочного бетона [4]. Они, в частности, указывали на устранение грубых агрегатов для повышения однородности; использование пущдолановых свойств МК; оптимизацию гранулометрического состава для увеличения плотности смесей; оптимальное применение суперпластификатора для снижения В/Ц и повышения пластичности и текучести; использование термовлажностной обработки для улучшения микроструктуры и существенного повышения прочности; введение тонких стальных волокон для увеличения дуктильности бетонов. Все эти высокие ранее достигнутые и поздние результаты в исследованиях зарубежных ученых касались бетонов с использованием МК.

Наиболее значимые и уникальные результаты в последние годы в достижении высокой прочности и долговечности бетонов без добавок МК получены немецкой компанией Dyckerhoff [9]. Компания выпускает различные виды вяжущих со сверхтонким цементом и со сверхтонкими компонентами уже более 20 лет под наименованиями Mikrodur, Veridur, Velodur, Variodur и Nanodur. Цемент используется класса СЕМ 52,5. Реакционными компонентами являются сверхтонкие частицы гранулированного шлака, золы-уноса ТЭЦ, кварцевой пыли и тонкого кварцевого песка с частицами не более 0,125 мм с добавлением песка с частицами менее 0,5 мм. В результате использования таких вяжущих с расходами цемента 280–340 кг получены бетоны с прочностью 80–90 МПа. С помощью вяжущего Nanodur с расходом цемента 832 кг/м<sup>3</sup> достигнута прочность песчаного бетона через 28 сут нормального твердения 160 МПа, а при расходе цемента 609 кг/м<sup>3</sup> – прочность щебеночного бетона 155 МПа. Для сравнения, в наших исследованиях песчаный бетон с расходом цемента класса СЕМ 52,5–680 кг/м<sup>3</sup>, при использовании в качестве дисперсного наполнителя известняковой муки с невысокой удельной поверхностью 3800 см<sup>2</sup>/г, тонкого дробленого песка фракции от 0 до 0,63 мм и песка-заполнителя (фр. 0,63–2,5 мм) из плотного известняка, имел прочность 152 МПа.

Надо принять во внимание, что известняк был рядового помола, а не сверхтонкие частицы известняка. Самоуплотняющийся щебеночный бетон на рядовом цементе ПЦ500Д0 с расходом его 350 кг/м<sup>3</sup>, с 7 % МК, на молотом кварцевом песке с удельной поверхностью 4600 см<sup>2</sup>/г, тонком и крупном песке-заполнителе и гранитном щебне имел прочность на сжатие 150 МПа. Мы считаем, что наши результаты по снижению цементоемкости в высокопрочном бетоне выше зарубежных, благодаря оптимизации содержания суспензионной составляющей в бетонной смеси. Нами разработаны принципиально новые суспензионно-наполненные порошково-активированные бетоны от марок М200 до марок М1500 (классы по прочности В15–В120) как для вибрационного уплотнения, так и для самоуплотнения. Особенность рецептуры состоит в том, что их бетонные смеси с малыми расходами цемента 250–350 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона – самоуплотняющиеся и не расслаивающиеся при заливке в формы, в опалубку.

Бетон нового поколения является наукоемким и получение его связано с использованием положений фундаментальных наук химии, физико-химии

поверхностных явлений и с положениями физико-химической механики агрегативно-устойчивых дисперсных систем (суспензии). Производство бетона в мире достигло в настоящее время 18–20 млрд т в год. Бетон – основной конструкционный материал в строительстве. С развитием высокопрочного и сверхвысокопрочного бетона связана глобальная экономика любой мировой державы, выпускающей большие объемы бетона. И эта глобальная экономика определяется не столь высокой экономикой в строительстве, по сравнению с экономикой в отраслях, сопутствующих производству бетонов, т.е. с производством цемента, заполнителей и наполнителей для бетонов, с транспортными расходами, с ремонтными работами транспортного парка, с эксплуатацией автомобильных и железных дорог, с производством энергии и горюче-смазочных материалов и др. И все это в целом – существенное оздоровление экологической обстановки в регионах. Кроме того, в бетонах нового поколения используются отсевы камнедробления плотных горных пород, образующиеся как отходы щебня фракции 0–5 мм при получении его на карьерах. В них овеществлен затраченный труд и энергетические затраты, которые могут быть возвращены при потреблении огромных объемов накопившегося сырья.

Повышение прочности в 3–4 раза снижает объем строительных конструкций, цемента и заполнителей в 2–3 раза, а это – уменьшение объема бетона, всех его компонентов и снижение затрат в перечисленных отраслях, сопутствующих производству бетона. В отличие от предлагаемых рекламными проспектами бетонов, произведенных по нанотехнологиям с введением малых нанодобавок (одномерных нанотрубок, фуллеренов, фуллероидов, наносиликатов, нанокальцитов, наноглин, наногелей кремнеземов и т.п.), разработанные нами бетоны изготавливаются по микромиллитехнологиям с теми компонентами, которые «лежат на земле», дисперсными и тонкозернистыми молотыми и дроблеными горными породами плотного известняка, доломита, гранита, диорита, диабаза, базальта, обсидиана, в частности, из отходов камнедробления горных пород фракции 0–5 мм. Могут быть использованы дисперсные вулканические пеплы, молотые трассы, обсидианы.

На рис. 1, 2 приведена киносъемка разрушения бетона старого поколения класса В25 и порошково-активированного суспензионно-наполненного бетона нового поколения с прочностью 142 МПа после 1000 циклов морозостойкости.

Имеются отдельные внедрения в производстве и промышленное апробирование [2]. Для производства суспензионно-наполненных порошково-активированных бетонов нового поколения требуется соответствующая инфра-

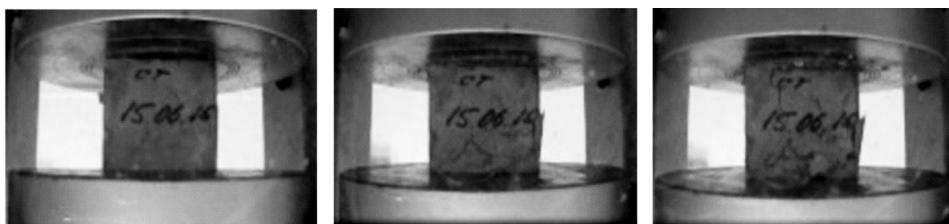
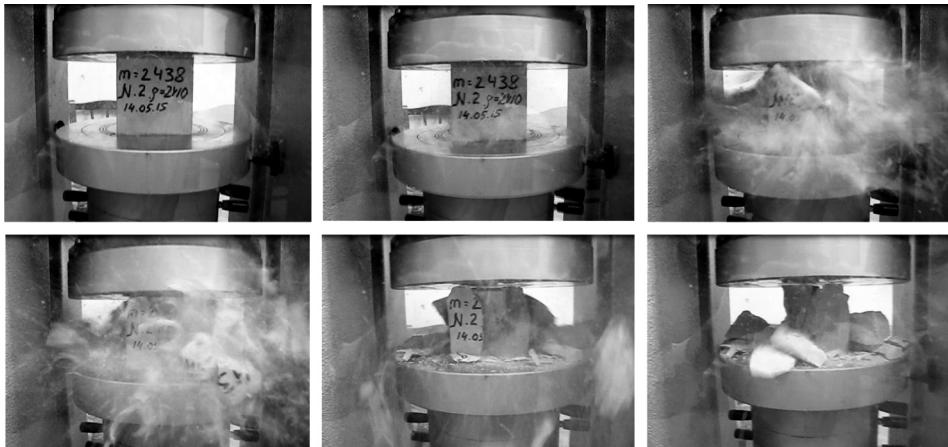


Рис. 1. Разрушение образца-куба 100×100×100 мм из щебеночного бетона старого поколения В25 при разрушающей нагрузке 32 т



*Рис. 2. Разрушение образца-куба 100×100×100 мм из самоуплотняющегося порошко-активированного мелкозернистого карбонатного бетона при давлении 142 МПа после 1000 циклов морозостойкости*

структура, включающая пневмосепарацию отсевов камнедробления и помол горной породы до тонкости помола цемента. Новые энерго- и ресурсосберегающие бетоны имеют высокую плотность, водонепроницаемость, морозостойкость, низкое водо- и массопоглощение и высокую коррозионную стойкость. Их всеобъемлющим техническим, экономическим и экологическим критерием является низкий расход цемента на единицу прочности бетона при сжатии [1–3, 10–11]. У бетонов нового поколения удельный расход цемента на единицу прочности равен 2,5–5 кг/МПа, у выпускаемых в России лучших бетонов с МК в количестве 10–25 % от массы цемента удельный расход цемента на единицу прочности бетона 5–10 кг/МПа, а практически, на большинстве заводов железобетонных изделий – от 10 до 20 кг/МПа.

Приведем технические характеристики для одного вида самоуплотняющегося сверхпрочного мелкозернистого бетона без МК из бетонной смеси с ОК 27 см с расплывом 70 см, в которой наполнителями и заполнителями является молотый и дробленый известняк с дробимостью Д1000:

Прочность при сжатии, МПа .....	162
Прочность на растяжение при изгибе, МПа .....	19,5
Водопоглощение по массе, % .....	0,8–1,5
Морозостойкость, циклы .....	> 1000
Деформации усадки, мм/м .....	0,32–0,35
Деформации набухания, мм/м .....	0,14–0,16

Бетоны нового поколения наиболее эффективны и для железобетона с обычным стержневым армированием, с фиброармированием и с комбинированным армированием. Без технологии бетонов нового поколения Россия надолго отстанет от передовых зарубежных стран, и будет по-прежнему изготавливать бетоны из цемента–песка–щебня–воды, немного облагораживая их суперпластификаторами или добавляя микрокремнезем для повышения прочности.

На основании изложенного можно констатировать, XXI в. должен в технологии бетона быть, прежде всего, веком микротехнологий с возможным добавлением нанометрических добавок для повышения прочности, которое

улучшает оптимальную гранулометрию сухих компонентов микрометрической суспензионной составляющей. Кроме дисперсных нанометрических добавок, повышающих прочность и долговечность бетона, развитие наноиндустрии обеспечит технологию бетона новыми нанометрическими добавками, такими, как появившиеся в последние годы нанометрические гидросиликаты кальция (X-Seed), нанодиоксиды титана, диоксиды кремния (кремнегелями) и т.п. Такие технологии бетона будут микронанотехнологиями.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. «Технология бетонов». Ч. 1: Виды реологических матриц в бетонной смеси, стратегия повышения прочности бетона и экономия его в конструкциях. 2007. № 5. С. 8–10.  
Ч. 2: Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения. 2007. № 6. С. 8–11.  
Ч. 3: От высокопрочных и особо высокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего. 2008. № 1. С. 22–26.
2. Калашников В.И., Гуляева Е.В., Валиев Д.М., Володин В.М., Хвастунов А.В. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов // Стройт. материалы. 2011. № 11. С. 44–47.
3. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // Стройт. материалы. 2012. № 10. С. 70–71.
4. Richard P., Cheuguey M. Composition of reactive powder concrete // Cement and concrete research. 1995. Vol. 25, No. 7. P. 1501–1511.
5. Aitcin P.C. Cements of yesterday and today concrete of tomorrow // Cement and concrete research. 2000. Vol. 30. P. 1349–1359.
6. Blais P.Y. and Couture M. Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure // PCI Journal. 1999. Vol. 44. P. 60–71.
7. Dauriac C. Special concrete may give steel stiff competition, building with concrete // The seattle daily journal of commerce. 1997. May 9.
8. Goltermann P., Johansen V., Palbool L. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix // ACI Materials Journal. 1997. Sept.-Oct. P. 435–443.
9. Дэйз Томас, Хорнунг Оттмар, Мёльман Мартин. Переход с технологий Mikrodur к технологии Nanodur. Применение стандартных цементов в практике производства бетона со сверхвысокими эксплуатационными свойствами. ВFT // Бетон. з-д. 2009. № 3. С. 4–10.
10. Калашников В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // Бетон и железобетон. 2012. № 1. С. 82.
11. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернистопорошковых смесей // Инж.-стройт. журн. 2012. № 8 (34). С. 47–53.

**Калашников Владимир Иванович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: kalashnikov\_v@yandex.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

**Тараканов Олег Вячеславович**, д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**Kalashnikov Vladimir Ivanovich**, DSc, Professor;

E-mail: [kalashnikov\\_v@yandex.ru](mailto:kalashnikov_v@yandex.ru)

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Erofeev Vladimir Trofimovich**, DSc, Professor

Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

**Tarakanov Oleg Vyacheslavovich**, DSc, Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **THE SUSPENSION-FILLED CONCRETE MIXTURES FOR POWDER-ACTIVATED CONCRETES OF NEW GENERATION**

The article deals with powder-activated concretes of new generation. Concrete mixes for making such concretes contain high amount of suspension of component of cement, powdery particulate additives of ground of rocks and fine sand to improve flowing their superplasticizers. Are the best indicators of carbonate sand self-compacting concretes with a strength of 140–160 MPa, manufactured without the reactive microsilica and their comparison with the best foreign concrete without microsilica.

**К e y w o r d s:** concretes of new generation, strength, powder activation, suspension component, superplasticizers, specific consumption of cement per unit of strength.

### **REFERENCES**

1. Kalashnikov V.I. Cherez ratsional'nyu reologiyu v budushchey betonov [Using rational rheology of concrete in the future]. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka «Tekhnologiya betonov». [Building materials, equipment, technologies of XXI century. «Technology of concrete»].  
Chast' 1. Vidy reologicheskikh matrits v betonnoy smesi, strategiya povysheniya prochnosti betona i ekonomiya ego v konstruktsiyakh [Part 1. Types of rheological matrices in the concrete mixes, the strategy of increasing the strength of the concrete and saving it in the construction]. 2007. No. 5. Pp. 8–10.  
Chast' 2. Tonkodispersnye reologicheskie matritsy i poroshkovye betony novogo pokoleniya [Part 2. Fine rheology of the matrix and powder concretes of new generation]. 2007. No. 6. Pp. 8–11.  
Chast' 3. Ot vysokoprochnykh i osobovysokoprochnykh betonov budushchego k superplastifirovannym betonam obshchego naznacheniya nastoyashchego [Part 3. From high-strength concretes and ultra-high-strength concretes of the future to superplasticising concrete general purpose of the present]. 2008. No. 1. Pp. 22–26. (in Russia)
2. Kalashnikov V.I., Gulyaeva E.V., Valiev D.M., Volodin V.M., Khvastunov A.V. Vysokoeffektivnye poroshkovovo-aktivirovannye betony razlichnogo funktsional'nogo naznacheniya s ispol'zovaniem superplastifikatorov [High effective powder-activated concretes of different functional purpose with the use of superplasticizers]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2011. No. 11. Pp. 44–47. (in Russia)
3. Kalashnikov V.I. Chto takoe poroshkovovo-aktivirovanny beton novogo pokoleniya [What is a powder-activated concretes of new generation]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2012. No. 10. Pp. 70–71. (in Russia)
4. Richard P., Cheyrezy M. Composition of reactive powder concrete. Cement and concrete research. 1995. Vol. 25, No. 7. Pp. 1501–1511.
5. Aitcin P.C. Cements of yesterday and today concrete of tomorrow. Cement and concrete research. 2000. Vol. 30. Pp. 1349–1359.
6. Blais P.Y. and Couture M. Precast, Prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure. PCI Journal. 1999. Vol. 44. Pp. 60–71.

7. Dauriac C. Special concrete may give steel stiff competition, building with concrete. The seattle daily Journal of commerce. 1997. May 9.
8. Goltermann P., Johansen V., Palbo L. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. ACI Materials Journal. 1997. Sept.–Oct. Pp. 435–443.
9. Daise Thomas, Hornung Ottmar, Melmann Martin. Perekhod s tekhnologii Mikrodur k tekhnologii Nanodur. Primenenie standartnykh tsementov v praktike proizvodstva betona so sverkhvysokimi ehkspluatatsionnymi svoystvami [The transition from technology to technology Mikrodur Nanodur BFT. The use of standard cements in practice, the production of concrete with ultra-high performance properties]. Betonnyy zavod [Concrete plant]. 2009. No. 3. Pp. 4–10. (in Russia)
10. Kalashnikov V.I. Kak prevarit' betony starogo pokoleniya v vysokoefektivnye betony novogo pokoleniya [How to turn the concretes of the old generation in high-performance concretes new generation]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2012. No. 1. P. 82. (in Russia)
11. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. Betony novogo pokoleniya na osnove sukhikh tonkozernisto-poroshkovykh smesey [Concretes of new generation on the basis of dry fine-grained powder mixtures]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of civil Engineering]. 2012. No. 8 (34). Pp. 47–53. (in Russia)

УДК 691.42 : 536.21

Е.С. АБДРАХИМОВА, В.З. АБДРАХИМОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
СОДЕРЖАНИЯ НЕФТИНОГО ШЛАМА  
НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЛЕГКОВЕСНОГО КИРПИЧА\***

Установлено, что использование в качестве отощителя и выгорающей добавки нефтяного шлама с повышенными содержаниями углерода ( $C \geq 16\%$ ) и теплоты сгорания ( $>12\,000\text{ кДж/кг}$ ) позволяет получать легковесный керамический материал с низкой теплопроводностью. Для изготовления керамических материалов в качестве связующего использовалась межсланцевая глина, которая является отходом горелых пород. Получение керамических материалов из отходов производств без применения природных традиционных материалов способствует утилизации промышленных отходов и охране окружающей среды.

**Ключевые слова:** нефтяной шлам, межсланцевая глина, легковесный кирпич, теплопроводность, теплота сгорания, отходы производств.

**Введение.** Вступление России в ВТО обязывает повысить стоимость газа для промышленных предприятий до уровня европейских стран. При выпуске теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью предприятие будет работать эффективно только при расходе газа на 1000 шт. условного кирпича не более  $40\text{--}60\text{ м}^3$ . Исходя из экономической целесообразности, для экономии газа в составы керамических масс необходимо вводить выгорающие добавки с теплотой сгорания более  $8000\text{ кДж/кг}$ . К таким выгорающим добавкам относится нефтяной шлам, теплота сгорания которого превышает  $12\,000\text{ кДж/кг}$ .

Изменение нормативов по теплотехническим параметрам к ограждающим конструкциям способствует повышенному спросу на теплоизоляционные материалы. Применение легковесного кирпича позволяет снизить толщину, массу стен и других ограждающих конструкций, что влечет за собой соответственно снижение общей стоимости строительства. Кроме того, сокращение потерь тепла в отапливаемых зданиях значительно уменьшает расход топлива, что особенно актуально в настоящее время. Производство в России легковесного кирпича высокой эффективности с теплопроводностью менее  $20\text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  гораздо меньше, чем в Европе и Северной Америке, несмотря на то что во многих странах климат мягче. Для изготовления легковесного кирпича целесообразно использовать в качестве отощителя и выгорающей добавки отходы с повышенным содержанием углерода и теплоты сгорания, что позволит получить изделия с низкой теплопроводностью [1–6].

\* 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 программы «Фундаментальные научные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства».

**Сыревые материалы.** В качестве основного глинистого сырья для производства теплоизоляционных изделий использовалась межсланцевая глина<sup>1,2</sup> – отход горючих сланцев. По числу пластичности она относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. Химический оксидный состав межсланцевой глины представлен в табл. 1, поэлементный – в табл. 2, гранулометрический (фракционный) – в табл. 3, а технологические свойства – в табл. 4.

Таблица 1. Оксидный химический состав компонентов, мас. %

Компонент	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
Нефтяной шлам Самарской области	21–22	8–10	8–10	24–27	1–2	1–2	30–32

Таблица 2. Поэлементный химический состав компонентов, %

Компонент	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
Нефтяной шлам Самарской области	16,02	41,93	0,83	0,87	5,14	5,49	2,10	0,89	22,58	4,15

Таблица 3. Фракционный состав компонентов, %

Компонент	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
Нефтяной шлам Самарской области	13,5	14,3	14,8	20,1	37,4

Таблица 4. Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплота сгорания, кДж/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	4700	1260	1290	1320
Нефтяной шлам Самарской области	13 500	1850	1280	1290

Рентгенофазовый состав исследуемой межсланцевой глины проводился на дифрактометре ДРОН-6 с использованием СоK<sub>α</sub>-излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град/мин. На рис. 1 представлена рентгеноGRAMМА межсланцевой глины.

Микроструктура межсланцевой глины, выявленная с помощью электронного растрового сканирующего микроскопа Phillips 525M, представлена на рис. 2.

На дифрактограмме порошка межсланцевой глины отмечаются характерные интенсивные линии  $d/n = 0,130; 0,304$  и  $0,350$  нм кальцита, присутствие линии  $d/n = 0,227$  нм обусловлено гематитом,  $d/n = 0,181; 0,212; 0,223$ ;

<sup>1</sup> Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Исследование фазовых превращений на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой глины // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 34–42.

<sup>2</sup> Пат. 2440312 Российская Федерация, МПК C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Е.С. Абдрахимова, И.Ю. Рощупкина, В.З. Абдрахимов, В.А. Куликов; опубл. 20.01.2012; Бюл. № 2.

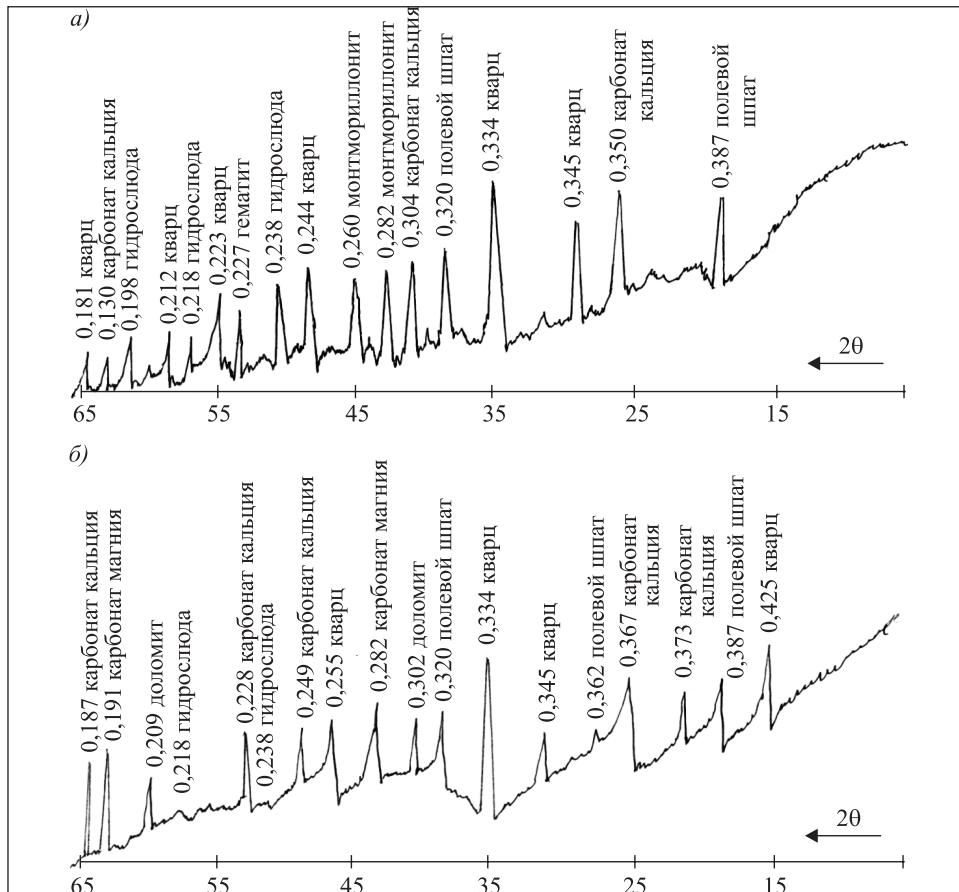


Рис. 1. Рентгенограммы межсланцевой глины (а) и нефтяного шлама межсланцевой глины (б)

0,244; 0,334 и 0,345 нм – кварцем,  $d/n = 0,198$ ; 0,218 и 0,238 нм – гидрослюдой,  $d/n = 0,260$ ; 0,282 нм – монтмориллонитом, а линии  $d/n = 0,320$  и 0,387 нм – полевым шпатом. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюды, поэтому она вполне может заменить монтмориллонитовую глину при производстве пористого заполнителя, например, керамзита.

В данной работе был использован нефтяной шлам (kek), образующийся на нефтедобывающем предприятии в г. Нефтегорске и представляющий собой мелкодисперсный порошок темно-коричневого цвета. Нефтяной шлам (kek) – это твердый нефтесодержащий отход сепарации нефтешлама<sup>3–11</sup> (табл. 1–4, рис. 1, б; 2, в–г).

<sup>3</sup> Абдрахимов В.З., Куликов В.А., Абдрахимова Е.С. Влияние нефтяного кека на структуру пористости теплоизоляционного материала // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 4. С. 246–253.

<sup>4</sup> Михеев В.А., Абдрахимов В.З. Влияние нефтяных отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 7–8. С. 51–59.

<sup>5</sup> Пат. 2433972 Российская Федерация, МПК C1 C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, В.А. Куликов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 27.04.2010; опубл. 20.11.2011; Бюл. № 32.

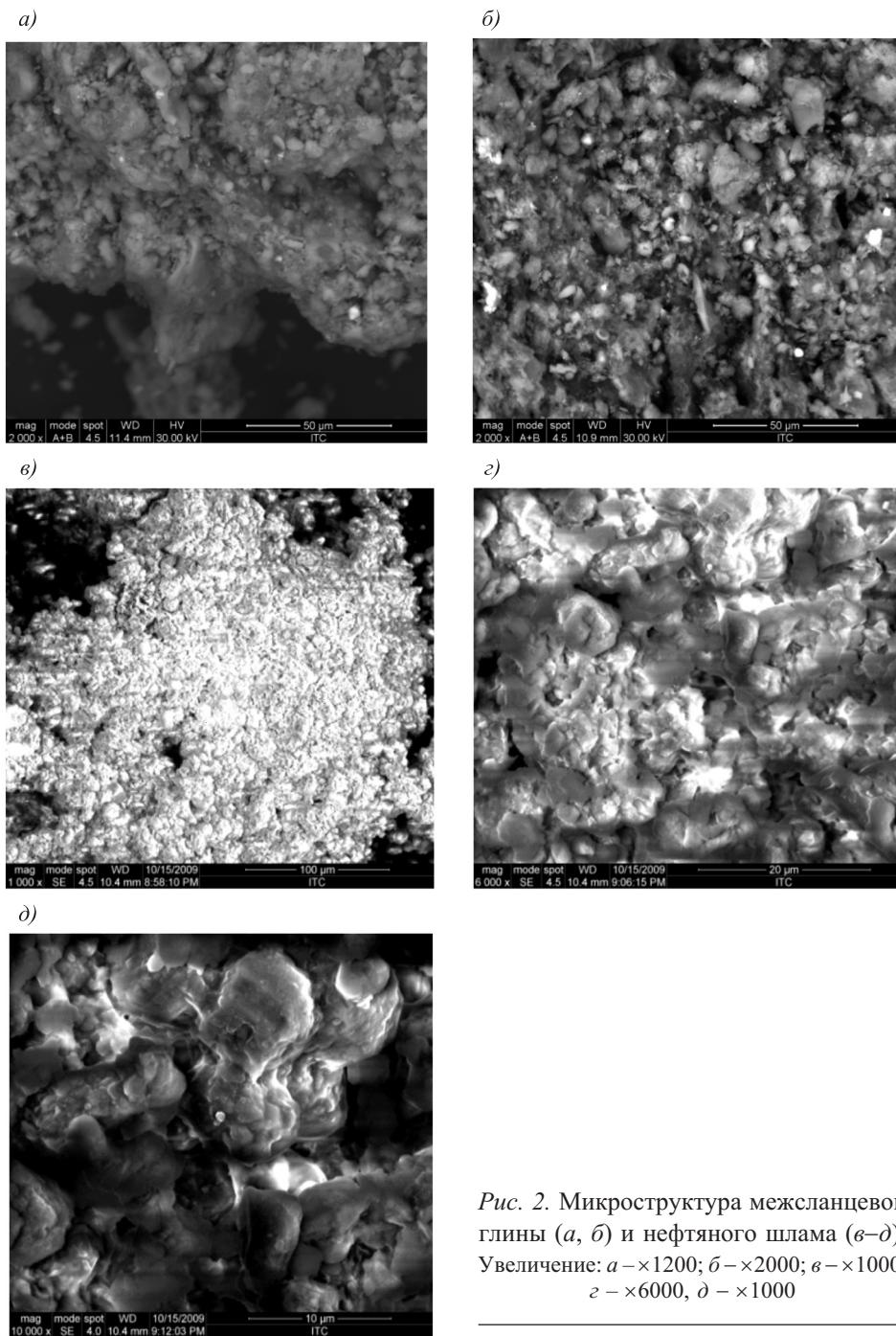


Рис. 2. Микроструктура межсланцевой глины (а, б) и нефтяного шлама (в–д). Увеличение: а – ×1200; б – ×2000; в – ×1000, г – ×6000, д – ×1000

<sup>6</sup> Пат. 2455248 Российская Федерация, МПК C2 C04B 14/12. Композиция для производства пористого заполнителя / И.В. Ковков, Л.В. Журавель, В.А. Куликов, В.З. Абдрахимов; заявл. 22.03.2010; опубл. 10.07.2012; Бюл. № 19.

<sup>7</sup> Колпаков А.В., Абдрахимов В.З. Фазовый состав и структура пористости теплоизоляционного материала из отходов производств межсланцевой глины и нефтяного кека // Новые огнеупоры. 2012. № 9. С. 53–61.

Таблица 5. Составы керамических масс, %

Компонент	Состав керамических масс			
	1	2	3	4
Межсланцевая глина	100	80	70	60
Нефтяной шлам		20	30	40

Таблица 6. Физико-механические показатели кирпича

Показатель	Состав			
	1	2	3	4
Предел прочности при сжатии, МПа	15,8	11,3	10,4	7,6
Предел прочности при изгибе, МПа	3,8	2,5	2,3	1,8
Морозостойкость, циклы	85	32	22	18
Усадка, %	8,2	7,7	7,1	6,9
Термостойкость, теплосмены	1	2	4	3
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	1780	1350	1060	980
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)	0,34	0,22	0,18	0,15
Группа изделий по теплотехническим характеристикам, согласно требованиям ГОСТ 530-2007	Эффективный	Повышенной эффективности	Высокой эффективности	Высокой эффективности

На дифрактограмме порошка отмечаются характерные интенсивные линии  $d/n = 0,187; 0,228; 0,249; 0,367$  и  $0,373$  нм карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), линии  $d/n = 0,191$  и  $0,282$  нм обусловлены карбонатом магния ( $\text{MgCO}_3$ ),  $d/n = 0,255; 0,334; 0,345$  и  $0,425$  нм – кварцем ( $\text{SiO}_2$ ),  $d/n = 0,209$  и  $0,302$  нм – доломитом ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ),  $d/n = 0,218$  и  $0,238$  нм – гидрослюдой и линии  $d/n = 0,320; 0,362$  и  $0,387$  нм – полевым шпатом.

**Экспериментальная часть.** Керамическую массу готовили в лабораторных условиях пластическим способом при влажности 18–22 %, из которой формовали кирпичи размером  $250 \times 120 \times 65$  мм. Высушенные кирпичи до остаточной влажности не более 5 % обжигались при температуре  $1000$  °C (на Кротовском кирпичном заводе). В табл. 5 приведены составы керамических масс, а в табл. 6 – физико-механические и химические свойства клинкерных кирпичей при конечной температуре обжига.

Как видно из табл. 6, при наличии теплоты сгорания в нефтяном шламе более 12000 кДж/кг положительный эффект (марка кирпича более 100) достигается добавкой в шихту не более 30 % шламов. В этих случаях нефтя-

<sup>8</sup> Абдрахимов В.З. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге легковесного кирпича на основе межсланцевой глины и нефтяного кека // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 11–12. С. 24–28.

<sup>9</sup> Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование нефтяного кека в производстве теплоизоляционных материалов на основе жидкостекольных композиций // Пром. сервис. 2012. № 2. С. 36–49.

<sup>10</sup> Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Исследование фазового состава и структуры пористости теплоизоляционного материала на основе монтмориллонитовой глины и нефтяного кека // Материаловедение. 2011. № 9. С. 48–54.

<sup>11</sup> Абдрахимова Е.С. Инновационные направления по использованию нефтяного кека в производстве теплоизоляционных материалов на основе горелых пород // Экология и промышленность России. 2014. № 7 (июль). С. 16–17.

ной шлам способен заменить вводимый в шихту уголь, создать восстановительную среду в толще обжигаемого материала, при достаточном количестве в сырье оксидов железа (более 3–5 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) перевести их в закисные соединения и интенсифицировать процесс обжига.

Согласно ГОСТ 530–2007 «Кирпич и камень керамические. Общие условия», теплотехнические характеристики изделий оцениваются по коэффициенту теплопроводности в сухом состоянии  $\lambda$  Вт/(м · °C): до 0,20 – группа высокой эффективности; от 0,20 до 0,24 – повышенной эффективности; от 0,24 до 0,36 – эффективные; от 0,36 до 0,46 – условно эффективные; выше 0,46 – группа малоэффективные (обычные). Как видно из табл. 6, кирпичи различных составов по теплотехническим характеристикам относятся к группам эффективные, повышенной и высокой эффективности.

Теплопроводность в расчетных условиях эксплуатации определяется по специальной методике, подробно изложенной в СП 23-101–2004<sup>12</sup>. Определение коэффициента теплопроводности четырех проб (из различных составов, табл. 5) проводилось измерителем теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»<sup>13</sup>.

Связь коэффициента теплопроводности  $K$  с удельной электрической проводимостью  $\sigma$  в металлах устанавливает закон Видемана – Франца:

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 T, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$e$  — заряд электрона.

Постоянная Больцмана ( $k$  или  $k_B$ ) — физическая постоянная, определяющая связь между температурой вещества и энергией теплового движения частиц этого вещества. Ее экспериментальное значение в системе СИ равно

$$k = 1,380\,650\,4(24) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Прибор определяет коэффициент теплопроводности в диапазоне значений  $\lambda = 0,02\text{--}1,5$  Вт/(м · К). Погрешность определения составляет не более  $\pm 5\%$ .

Принцип работы прибора заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к его лицевым граням, измерении толщины образца, плотности теплового потока и температуры противоположных лицевых граней. Общий вид прибора представлен на рис. 3.

Образцы для испытаний подготавливают в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие (лицевые) грани которого имеют форму квадрата со стороной 250×250 мм. Температура обжига образцов – 1000 °C. Длину и ширину образца измеряют линейкой с погрешностью не более 0,5 мм. Толщину испытываемого образца должна составлять от 5 до 50 мм. Толщину образца  $H$  в метрах и разницу температур между нагревателем и холодильником  $\Delta T$  в градусах Цельсия необходимо выбирать в соответствии с рекомендациями,

<sup>12</sup> СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты здания. М.: Госстрой России, 2004. 140 с.

<sup>13</sup> Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»: руководство по эксплуатации. Челябинск: ООО «СКБ Стройприбор», 2008. 29 с.



*Рис. 3. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»*

приведенными в зависимости от прогнозируемой теплопроводности материала<sup>12</sup>.

Границы образца, контактирующие с рабочими поверхностями плит прибора, должны быть плоскими и параллельными. Отклонение лицевых граней жесткого образца от параллельности не должно быть более 0,5 мм. Толщину образца измеряют штангенциркулем с погрешностью не более 0,1 мм в четырех углах на расстоянии 50 мм от вершины угла и в середине каждой стороны. За толщину образца принимают среднеарифметическое значение результатов всех измерений.

Вычисление коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · °C), и термического сопротивления  $R$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, производится вычислительным устройством прибора по формулам:

$$\lambda = \frac{Hq}{T_h - T_x}; \quad (2)$$

$$R = \frac{T_h - T_x}{q} - 2R_k, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м · °C);

$R$  – термическое сопротивление испытуемого образца, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт;

$R_k$  – термическое сопротивление между лицевой гранью образца и рабочей поверхностью плиты прибора, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, учитывается при калибровке прибора по эталонным образцам;

$H$  – толщина образца, м;

$T_h$  – температура горячей лицевой грани испытуемого образца, °C;

$T_x$  – температура холодной лицевой грани испытуемого образца, °C.

Исследования показали, что из отходов производств без применения природных традиционных материалов можно изготовить легковесный кирпич, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  менее 0,2 Вт/(м · °C).

Полученный из отходов производств без использования природных традиционных материалов теплоизоляционный легковесный кирпич, согласно требованиям ГОСТ 530–2007, имеет улучшенные теплотехнические характеристики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахимов В.З., Петрова Т.М., Колпаков А.В. Исследование теплопроводности теплоизоляционных изделий из отходов производств без применения традиционных природных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2012. № 1–2. С. 49–52.
2. Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З. Определение коэффициента теплопроводности керамического кирпича на основе техногенного сырья // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 11. С. 76–77.
3. Абдрахимов В.З., Михеев В.А., Абдрахимова Е.С. Исследование теплопроводности теплоизоляционных изделий на основе бейделлитовой глины и золошлакового материала // Новые огнеупоры. 2011. № 7. С. 50–52.
4. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Семенчев В.К. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге теплоизоляционных изделий на основе горелых пород и бейделлитовой глины // Новые огнеупоры. 2011. № 4. С. 31–34.
5. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние отходов углеобогащения на тепломассообменные процессы при обжиге легковесного кирпича // Кокс и химия. 2011. № 2. С. 41–44.
6. Абдрахимов В.З., Белякова Е.А., Денисов Д.Ю. Процессы тепломассообменных процессов при обжиге легковесного кирпича // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 1–2. С. 49–53.

**Абдрахимова Елена Сергеевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный национальный аэрокосмический университет  
**Абдрахимов Владимир Закирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный экономический университет

Получено после доработки 18.03.16

**Abdrakhimova Elena Sergeevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: 3375892@mail.ru  
Samara National Research State University, Russia  
**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, DSc, Professor; E-mail: 3375892@mail.ru  
Samara State University of Economics, Russia

#### **STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CONTENT OF OIL SLUDGE ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF LIGHTWEIGHT BRICKS**

It is established that the use of burnable additives and additive oil sludge with elevated contents of carbon ( $\geq 16\%$ ) and heat of combustion (12 000 kJ/kg) allows to obtain lightweight ceramic material with low thermal conductivity. For obtaining ceramic materials, the binder, was used mislava clay, which is a waste of burnt rocks. Obtaining of ceramic materials from waste products without the use of traditional natural materials promotes recycling of industrial waste and protection of the environment.

**К e y w o r d s:** oil sludge, mislava clay, lightweight brick, thermal conductivity, heat of combustion, waste.

REFERENCES

1. Abdrahimov V.Z., Petrov T.M., Kolpakov A.V. Issledovanie teploprovodnosti teploizolyatsionnykh izdeliy iz otkhodov proizvodstv bez primeneniya traditsionnykh prirodnykh materialov [Study of thermal conductivity of insulation products from waste products without the use of traditional natural materials]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika [Refractories and technical ceramics]. 2012. No. 1–2. Pp. 49–52. (in Russia)
  2. Denisov D.Yu., Abdrahimov V.Z. Opredelenie koeffitsienta teploprovodnosti keramicheskogo kirpicha na osnove tehnogenного syr'ya [Determination of the thermal conductivity of ceramic bricks on the basis of technogenic raw materials]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2011. No. 11. Pp. 76–77. (in Russia)
  3. Abdrahimov V.Z., Mikhеev V.A., Abdrahimova E.S. Issledovanie teploprovodnosti teploizolyatsionnykh izdeliy na osnove beydellitovoy gliny i zoloshlakovogo materiala [Study of thermal conductivity of insulation products on the basis of beidellite clay and ash material]. Novye ogneupory [New refractories]. 2011. No. 7. Pp. 50–52. (in Russia)
  4. Abdrahimov V.Z., Abdrahimova E.S., Semyonovich V.K. Issledovanie teplomassoobmennykh protsessov pri obzhige teploizolyatsionnykh izdeliy na osnove gorelykh porod i beidellitovoy gliny [The study of heat and mass transfer processes during firing of insulation products on the basis of burnt rocks and beidellite clay]. Novye ogneupory [New refractories]. 2011. No. 4. Pp. 31–34. (in Russia)
  5. Abdrahimov V.Z., Abdrahimova E.S. Vliyanie otkhodov ugleobogashcheniya na teplomassoobmennye protsessy pri obzhige legkovesnogo kirpicha [The Influence of coal waste on the heat and mass transfer processes during firing of lightweight bricks]. Koks i khimiya [Coke and chemistry]. 2011. No. 2. Pp. 41–44. (in Russia)
  6. Abdrahimov V.Z., Belyakova E.A., Denisov D.Yu. Protsessy teplo-massoobmennykh protsessov pri obzhige legkovesnogo kirpicha [The Processes of heat and mass transfer processes during firing of lightweight bricks]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika [Refractories and technical ceramics]. 2011. No. 1–2. Pp. 49–53. (in Russia)
-

УДК 691.55 : 666.92

В.И. ЛОГАНИНА, М.В. ФРОЛОВ

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СТЕКЛЯННЫМИ ПОЛЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

Предложено использовать для отделки газобетона теплоизоляционные известковые составы, наполненные стеклянными полыми микросферами. Представлены результаты исследований микроструктуры микросфер. Выполнен анализ гранулометрического состава и рассчитан средний диаметр микросфер. Разработана модель теплоизоляционного композита оптимальной структуры, позволяющая минимизировать расход вяжущего вещества за счет достижения максимально плотной упаковки микросфер. Установлено, что максимальная удельная прочность композита достигается при наполнении его стеклянными полыми микросферами в количестве 40 % от массы извести. Приведен состав теплоизоляционной сухой строительной смеси. Покрытия на основе разработанного состава характеризуются низкой теплопроводностью, достаточной прочностью и высокой водоудерживающей способностью.

**Ключевые слова:** известь, силикаты кальция, стеклянные полые микросфераы, упаковка, газобетон, удельная прочность.

В настоящее время для отделки газобетонных блоков марок D400–D600 преимущественно применяют цементные сухие строительные смеси (ССС), наполненные вспученным перлитовым и вермикулитовым песками. Высокая открытая микропористость данных наполнителей увеличивает водопотребность отделочных составов, следствием чего является их расслаивание, уменьшение прочности и водостойкости композитов. К снижению прочности композитов приводит неравномерное распределение концентраций напряжений вокруг частиц наполнителей из-за их сложной неизометрической формы.

Использование в качестве наполнителя для ССС полых стеклянных микросфер позволяет повысить прочность и водостойкость растворных композитов за счет уменьшения водопотребности таких отделочных составов. Повышению прочности способствует отсутствие неравномерного распределения концентраций напряжений вокруг частиц микросфер. Полые стеклянные микросфераы применяют при разработке тампонажных и кладочных цементных растворов [1, 2].

Газобетонные блоки марок D400–D600 обладают низкой теплопроводностью, составляющей  $\lambda = 0,1\text{--}0,14 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , что дает возможность эффективно использовать их в строительстве. Из разработанного состава ССС можно получить покрытия, близкие по теплопроводности и паропроницаемости к газобетону. Использование предлагаемой ССС для отделки газобетона позволит избежать конденсации влаги в толще ограждения и, как следствие, ухудшения его теплозащитных и эксплуатационных свойств.

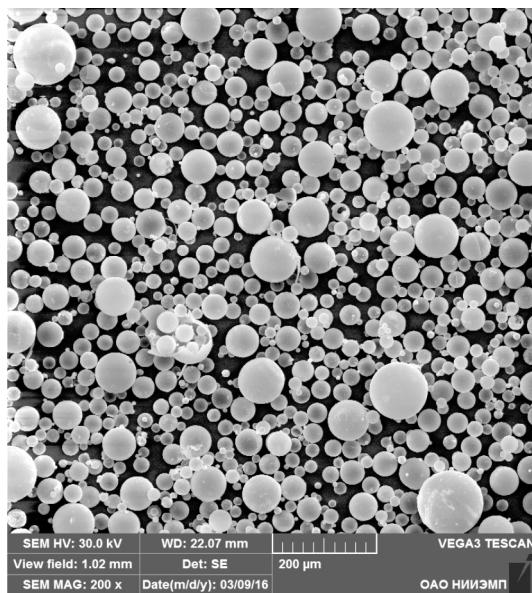


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок стеклянных полых микросфер

сфер и большой диапазон диаметров обеспечивают наилучшую укладку за счет минимального отношения площади поверхности к занимаемому объему.

С помощью данного наполнителя можно получить оптимальную структуру композита. Для материалов теплоизоляционного типа оптимальна структура, при которой достигается наибольшее наполнение композита легкими с аморфным строением частицами твердой фазы. При этом размер ячеек защемленного воздуха должен быть значимо менее 2 мм, что исключит конвективную составляющую теплопроводности. Доля микросфер в объеме будет максимальной, а известковый состав, выполняя роль связующего компонента, создаст материал конгломератного строения.

Для определения оптимального содержания стеклянных полых микросфер необходимо решить геометрическую задачу о максимальном заполнении пространства шарами микросфер. В работах [5, 6] предложено два решения, позволяющих добиться максимального процента занятого пространства. Для решеток гексагонального и гранецентрированного кубического типа плотность упаковки равна  $\eta_1 = 0,7415$ .

Рассмотрим модель композита, состоящего из связующей смеси, воды и полых стеклянных микросфер, построенную на основе следующего положения: микросферы имеют одинаковые размеры и разделены между собой прослойкой связующей смеси постоянной толщины (рис. 2).

Из уравнения абсолютного объема получим для 1 м<sup>3</sup> композита:

$$V_{\text{п}} + V_{\text{мк}} + V_{\text{см}} = 1 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем пустот, м<sup>3</sup>;

<sup>1</sup> ТУ 6-48-91-92. Микросферы стеклянные полые марок МС-ВП, МС-ВП-А9, МС-В. Технические условия. М., 1995. 6 с.

Состав ССС включает известь-пушонку 2-го сорта, модифицирующую добавку на основе смеси силикатов кальция [3, 4], белый цемент, молотый газобетон, пластифицирующую добавку Melflux 2651F, редиспергируемый порошок VINNAPAS 8031Н, гидрофобизатор олеат натрия, стеклянные полые микросферы. Микросферы представляют собой сыпучий белый порошок, состоящий из тонкостенных замкнутых газонаполненных оболочек. На рис. 1 представлен электронно-микроскопический снимок микросфер.

В работе применялись стеклянные полые микросферы МС-В, соответствующие ТУ 6-48-91-92<sup>1</sup>. Форма микросфер и большой диапазон диаметров обеспечивают наилучшую укладку за счет минимального отношения площади поверхности к занимаемому объему.

С помощью данного наполнителя можно получить оптимальную структуру композита. Для материалов теплоизоляционного типа оптимальна структура, при которой достигается наибольшее наполнение композита легкими с аморфным строением частицами твердой фазы. При этом размер ячеек защемленного воздуха должен быть значимо менее 2 мм, что исключит конвективную составляющую теплопроводности. Доля микросфер в объеме будет максимальной, а известковый состав, выполняя роль связующего компонента, создаст материал конгломератного строения.

Для определения оптимального содержания стеклянных полых микросфер необходимо решить геометрическую задачу о максимальном заполнении пространства шарами микросфер. В работах [5, 6] предложено два решения, позволяющих добиться максимального процента занятого пространства. Для решеток гексагонального и гранецентрированного кубического типа плотность упаковки равна  $\eta_1 = 0,7415$ .

Рассмотрим модель композита, состоящего из связующей смеси, воды и полых стеклянных микросфер, построенную на основе следующего положения: микросферы имеют одинаковые размеры и разделены между собой прослойкой связующей смеси постоянной толщины (рис. 2).

Из уравнения абсолютного объема получим для 1 м<sup>3</sup> композита:

$$V_{\text{п}} + V_{\text{мк}} + V_{\text{см}} = 1 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем пустот, м<sup>3</sup>;

<sup>1</sup> ТУ 6-48-91-92. Микросферы стеклянные полые марок МС-ВП, МС-ВП-А9, МС-В. Технические условия. М., 1995. 6 с.

$V_{\text{мк}}$  – объем полых стеклянных микросфер, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{см}}$  – объем прослойки связующей смеси, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{мк}} = N_{\text{м}} V_{\text{м}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{м}}$  – количество микросфер в 1 м<sup>3</sup>;  $V_{\text{м}}$  – объем микросферы, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{см}} = V_{\text{cc}} + V_{\text{cp}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{cc}}$  – объем связующей смеси, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{cp}}$  – объем пустот в прослойке связующей смеси, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{cc}} = N_{\text{c}} V_{\text{c}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{c}}$  – количество частиц связующей смеси в 1 м<sup>3</sup>;

$V_{\text{c}}$  – объем частицы связующей смеси, м<sup>3</sup>.

Для определения среднего диаметра микросфер  $d_{\text{m}}$  исследовалась навеска использованных в работе микросфер. Был выполнен гранулометрический анализ (рис. 3).

По результатам гранулометрического анализа был рассчитан средний диаметр микросфер, составляющий  $d_{\text{m}} = 25$  мкм.

Связующая смесь характеризуется истинной плотностью 2380 кг/м<sup>3</sup> и удельной поверхностью, равной 970 м<sup>2</sup>/кг. Средний диаметр частицы связующей смеси  $d_{\text{c}} = 2,6$  мкм.

Для одной микросферы с прослойкой связующей смеси справедливо следующее равенство:

$$V_{\text{k}} = \frac{\pi d_{\text{k}}^3}{6} = V_{\text{cm1}} + V_{\text{m}} = V_{\text{m}} \frac{d_{\text{k}}^3 - d_{\text{m}}^3}{d_{\text{m}}^3} + V_{\text{m}}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{k}}$  – объем микросферы с прослойкой связующей смеси, мкм<sup>3</sup>;

$V_{\text{cm1}}$  – объем прослойки связующей смеси вокруг одной микросферы, мкм<sup>3</sup>;

$V_{\text{m}}$  – объем микросферы, мкм<sup>3</sup>;

$d_{\text{k}}$  – диаметр микросферы с прослойкой связующей смеси, мкм;

$d_{\text{m}}$  – диаметр микросферы, мкм.

По формуле (4) получим:  $V_{\text{k}} = 14,414$  мкм<sup>3</sup>,  $V_{\text{cm1}} = 6237$  мкм<sup>3</sup>,  $V_{\text{m}} = 8177$  мкм<sup>3</sup>.

Определим объем частиц связующей смеси  $V_{\text{cl}}$ , расположенных вокруг микросферы. Для этого воспользуемся уравнением

$$V_{\text{cl}} = V_{\text{cm1}} \eta_2. \quad (6)$$



Рис. 2. Схема модели композита

$d_{\text{k}}$  – диаметр стеклянной полой микросферы;  $d_{\text{c}}$  – диаметр частицы связующей смеси;  $d_{\text{k}}$  – диаметр стеклянной полой микросферы с прослойкой связующей смеси;  $V_{\text{m}}$  – объем микросферы;  $V_{\text{c}}$  – объем частицы связующей смеси;  $V_{\text{n}}$  – объем пустот

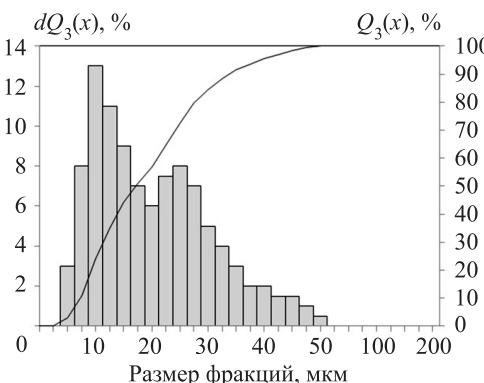


Рис. 3. Гранулометрический состав стеклянных полых микросфер

$Q_3(x)$  – распределение вероятности размера фракций

Предположим, что частицы связующей смеси образуют на поверхности микросферы плотную упаковку в один слой. Максимальная плотность упаковки  $\eta_2 = 0,6043$  достигается при укладке шаров по гексагональному типу (рис. 4).

Объем связующей смеси  $V_{\text{с1}}$  вокруг одной микросферы составляет  $3769 \text{ мкм}^3$ . Для решеток гексагонального и гранецентрированного кубического типа справедливо для  $1 \text{ м}^3$  композита:

$$V_{\text{см}} + V_{\text{мк}} = 0,7405 \text{ м}^3. \quad (7)$$

Используя формулы (1), (2), (3) и (6), для  $1 \text{ м}^3$  композита получим  $V_{\text{н}} = 0,260 \text{ м}^3$ ,  $V_{\text{мк}} = 0,420 \text{ м}^3$ ,  $V_{\text{см}} = 0,320 \text{ м}^3$  (в том числе  $V_{\text{cc}} = 0,193 \text{ м}^3$  и  $V_{\text{ен}} = 0,127 \text{ м}^3$ ).

Определим оптимальное содержание микросфер  $M\%$  от массы извести по формуле

$$M\% = \frac{V_{\text{мк}} \rho_{\text{мк}}}{V_{\text{cc}} \rho_{\text{cc}} I\%} = 41,0 \%, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{cc}}$  – истинная плотность связующей смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_{\text{мк}}$  – истинная плотность микросфер,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$I\%$  – содержание извести от массы связующей смеси, %.

Для проверки теоретических расчетов был проведен следующий эксперимент. Изготавливались образцы композита размером  $2 \times 2 \times 2$  см. Стеклянные полые микросфера брались в количестве 10, 20, 30, 40, 50, 60 % от массы извести. Пластическая прочность всех составов в начальный момент времени была одинакова. Измерялась прочность при сжатии и средняя плотность спустя 28 сут твердения в воздушно-сухих условиях при температуре 18–20 °C и относительной влажности 50–60 %. Определялась удельная прочность растворных композитов. Результаты исследований приведены на рис. 5.

При увеличении содержания полых стеклянных микросфер от 0 до 40 % от массы извести наблюдается рост удельной прочности растворных композитов. Дальнейшее увеличение содержания полых стеклянных микросфер в композите вызывает резкий сброс удельной прочности. Это связано с тем, что количества связующей смеси недостаточно для скрепления микросфер и создания устойчивой матрицы. Экспериментальные данные подтверждают верность разработанной модели.

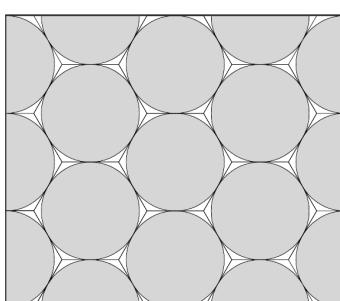


Рис. 4. Гексагональная схема укладки шаров в один слой

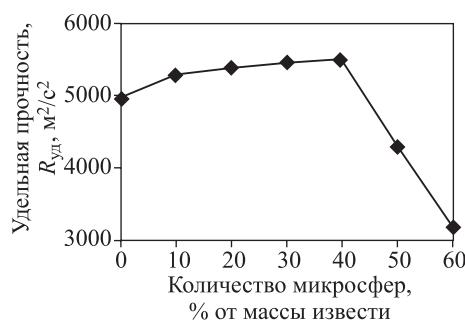


Рис. 5. Зависимость удельной прочности растворных композитов от содержания стеклянных полых микросфер

В дальнейшем исследовалась ССС, наполненная стеклянными полыми микросферами в количестве 40 % от массы извести. Разрабатываемый состав обладает хорошей удобонаосимостью и высокой водоудерживающей способностью, более 98 %. Покрытие на основе разрабатываемой ССС характеризуется средней плотностью  $\rho_{cp} = 580\text{--}620 \text{ кг}/\text{м}^3$ , прочностью при сжатии спустя 28 сут твердения в воздушно-сухих условиях  $R_{cж} = 3,2\text{--}3,3 \text{ МПа}$ , теплопроводностью  $\lambda = 0,115\text{--}0,120 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , классом  $Y$  в соответствии с ГОСТ 9.032-74, что соответствует требованиям нормативной документации<sup>2</sup>. Теплоизоляционные известковые составы, наполненные стеклянными полыми микросферами, можно рекомендовать для отделки газобетонных блоков марок D400–D600.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орешкин Д.В., Первушин Г.Н. Изменение влажности и теплопроводности цементного тампонажного камня с полыми стеклянными микросферами во времени // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2003. № 2. С. 41–43.
2. Кириллов К.И., Пашкевич А.А., Первушин Е.Г., Орешкин Д.В. Облегченный кладочный раствор // Сб. докл. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Строительная физика в XXI веке». М.: НИИСФ, 2006. С. 134–139.
3. Логанина В.И., Фролов М.В. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей // Вестн. граждан. инженеров. 2015. № 5. С. 144–147.
4. Логанина В.И., Кислицина С.Н., Фролов М.В., Рябов М.А. Разработка добавки на основе смеси синтезированных гидросиликатов кальция и алюмосиликатов для сухих строительных смесей // Академ. вестн. УралНИИпроект РААСН. 2015. № 2. С. 93–95.
5. Бобрышев А.Н., Зубарев П.А., Кувшинов П.И., Лахно А.В. Анализ распределения наполнителя в структуре композитов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. 2012. № 1 (20).
6. Макаренкова Ю.В., Беляев К.В. Цементные растворы с различной объемной долей цементной матрицы // Научные чтения, посвященные памяти профессора Г.И. Горчакова и 75-летию с момента основания кафедры «Строительные материалы» МГСУ. М., 2009. С. 153–155.

**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 29.02.16

**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

<sup>2</sup> Руководство по наружной отделке стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения. 1-я ред. Белгород: Нац. ассоциация производителей автоклавного газобетона, 2010. 5 с.

## **INSULATION LIME COMPOSITIONS FILLED WITH GLASS HOLLOW MICROSPHERES**

It is proposed to use for finishing lime aerated concrete insulating compositions filled with glass hollow microspheres. The results of studies of the microstructure of the microspheres. The analysis of the particle size distribution and calculated the average diameter of the microspheres. A model optimal structure of the thermal insulation composites, which allows to minimize the consumption of binder by achieving maximum dense packing of the microspheres. It is found that the maximum specific strength of the composite is achieved when filled with hollow glass microspheres in an amount of 40 % by weight of lime. An insulating composition shows of the dry mortar. Coatings based on the developed composition characterized by low thermal conductivity, sufficient strength and high water-holding capacity.

**K e y w o r d s:** lime, calcium silicate, glass hollow microspheres, packaging, concrete, specific strength.

### **REFERENCES**

1. Oreshkin D.V., Pervushin G.N. Izmenenie vlazhnosti i teploprovodnosti tsementnogo tamponazhnogo kamnya s polymi steklyannymi mikrosferami vo vremeni [Changing the humidity and heat conductivity of oil-well cement stone with hollow glass microspheres in time]. Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more [Construction of oil and gas wells on land and at sea]. 2003. No. 2. Pp. 41–43. (in Russia)
2. Kirillov K.I., Pashkevich A.A., Pervushin E.G., Oreshkin D.V. Oblegchennyj kladochnyy rastvor [Lightweight masonry mortar]. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Stroitel'naya fizika v XXI veke» [Coll. rep. Scientific and Technical. Conf. with int. participation «Building Physics in the XXI century»]. Moscow, NIISF, 2006. Pp. 134–139. (in Russia)
3. Loganova V.I., Frollov 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. Loganova V.I., Kislytsina S.N., Frollov M.V., Ryabov M.A. Razrabotka dobavki na osnove smesi sintezirovannykh gidrosilikatov kal'tsiya i alyumosilikatov dlya sukhikh stroitel'nykh smesey [Development of additives on the basis of a mixture of synthetic calcium silicate and aluminum silicates for dry construction mixtures]. Akademicheskiy vestnik UralNIIproekt RAASN [Academic Gazette UralNIIproekt RAASN]. 2015. No. 2. Pp. 93–95. (in Russia)
5. Bobryshev A.N., Zubarev P.A., Kuvshinov P.I., Lakhno A.V. Analiz raspredeleniya napolnitelya v strukture kompozitov [Analysis of the distribution of the filler in the composite structure]. Internet-vestnik VolgGASU. Seriya Politekniceskaya [Internet messenger VolgGASU. Ser. Polythematic]. 2012. No. 1 (20). (in Russia)
6. Makarenko Yu.V., Belyaev K.V. Tsementnye rastvory s razlichnoy ob'emnoy doley tsementnoy matritsy [Cement slurries with different volume fraction of the cement matrix]. Nauchnye chteniya, posvyashchennye pamyati professora G.I. Gorchakova i 75-letiyu s momenta osnovaniya kafedry «Stroitel'nye materialy» MGSU [Scientific Readings dedicated to the memory G.I. Gorchakov and the 75th anniversary since the founding chair of «Building Materialy» MSUCE]. Moscow, 2009. Pp. 153–155. (in Russia)

УДК 691.311 : 666.914.41

А.Т. ПИМЕНОВ, О.А. ИГНАТОВА, П.А. ЧИКМАРЕВ

## ЗАВИСИМОСТЬ АДГЕЗИИ ЗАЩИТНОГО (ОТДЕЛОЧНОГО) ПОКРЫТИЯ ОТ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СЛОЯ И ОСНОВАНИЯ

Рассмотрена возможность оценки монолитности растворного слоя и бетонного основания. Определение необходимых параметров не растрескивающихся и не отслаивающихся растворных слоев для конкретных эксплуатационных условий представлено в виде номограммы. Метод позволяет прогнозировать трещиностойкость слоя и указывает пути предупреждения нарушения монолитности.

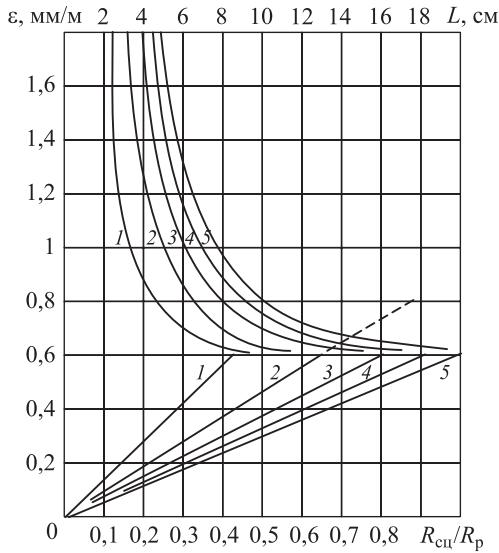
**Ключевые слова:** слоистая система, монолитность слоев, трещиностойкость, отслоение.

Одной из основных задач строительного материаловедения является увеличение объемов работ, связанных с нанесением защитных, отделочных, декоративных и других покрытий на поверхность строительных изделий, конструкций, состоящих из различных материалов. Слой покрытий повышают прочность и долговечность конструкций, выполненных из различных материалов, что достигается путем применения цементных строительных растворов, полимерцементных или полимерных составов, где собственно полимер служит основным связующим компонентом.

Требуемая монолитность, чему способствует адгезия, необходима при заделке швов, стыков, трещин, раковин, отколов и других повреждений строительных конструкций. Ремонт с использованием неправильно подобранных материалов ведет не только к удорожанию его стоимости, но и к дальнейшему разрушению строительной конструкции. К примеру, ремонт железобетонных конструкций предполагает нанесение тонкого растворного слоя.

Одной из главных причин снижения долговечности отремонтированной конструкции является образование усадочных трещин в ремонтном растворном слое и отслоение его от бетонного основания. Теоретические основы метода прогноза монолитности слоистой системы и соответствующие аналитические зависимости были опубликованы ранее [1]. Известно, что степень адгезии характеризуется прочностью сцепления слоя с основанием. В то же время доказано [2], что для ее увеличения необходимо добиваться сближения усадочных деформаций материала слоя и его предельной растяжимости. Для снижения вероятности отслоения следует достигать сближения показателя прочности сцепления слоя с основанием с показателем прочности на растяжение материала слоя.

С целью визуализации разработанных положений предложена номограмма (рисунок) [3].



Номограмма для решения задачи о монолитности слоистой системы

1 –  $h = 0,5 \text{ см}$ ; 2 –  $h = 1 \text{ см}$ ; 3 –  $h = 1,5 \text{ см}$ ;  
4 –  $h = 2 \text{ см}$ ; 5 –  $h = 2,4 \text{ см}$

плуатационных условий. Порядок пользования методом следующий. Аналитически определяется разность деформаций усадок ( $\varepsilon$ ) основания ( $\varepsilon_1$ ) и растворного слоя ( $\varepsilon_2$ ).

Величина усадки вычисляется по упрощенной формуле, предложенной в работе [3]:

$$\varepsilon_y = \beta (u_{kp} - \alpha \varphi), \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент усадки  $\beta = 0,003 \frac{\text{мм}/\text{мм}}{\text{г}/\text{г}}$ ;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности между равновесной влажностью материала и относительной влажностью воздуха  $\alpha = 21 \cdot 10^{-5} \frac{\text{г}/\text{г}}{\%}$ ;

$u_{kp}$  – критическая влажность раствора, при достижении которой начинается усадка, определяемая по формуле

$$u_{kp} = 0,015 + 0,01K, \quad (2)$$

причем  $K = 0,7 + 0,15 \left( \frac{\Pi - 225}{25} + \frac{(B/\Pi) - 0,4}{0,1} \right)$ . (3)

По рассчитанному значению  $\varepsilon$  (см. рисунок) определяется характер взаимодействия растворного слоя и основания. С ростом разницы деформаций ( $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ) возможны следующие виды нарушения монолитности: при  $\varepsilon < \varepsilon_{\text{пред}}$  произойдет отслоение слоя; при  $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$  наступит растрескивание слоя. Однако трещин может не быть и при  $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$ , если размер изделия меньше расстояния между трещинами.

На основании расчетов С.В. Александровского [4] и экспериментальных испытаний, проведенных по методике [2], величина предельной растяжимости  $\varepsilon_{\text{пред}}$  цементно-песчаных растворов с учетом ползучести и сцепления с основанием принята равной 0,6 мм/м.

Кривые 1–5 определяют шаг растрескивания ремонтных слоев различной толщины, а прямые 1–5 характеризуют вероятность отслоения материала слоя от основания.

Для оценки адгезии защитного покрытия необходимы следующие данные: толщина слоя  $h$ , см, водоцементное отношение  $B/\Pi$ ; расход цемента  $\Pi$ , кг на 1 м<sup>3</sup> раствора (бетона); отношение прочности сцепления слоя с основанием к прочности раствора на растяжение  $R_{\text{сцеп}}/R_p$ , средняя относительная влажность самого жаркого месяца в году  $\varphi$ .

Возможно решение и обратной задачи, т. е. определение необходимых параметров не растрескивающихся и не отслаивающихся покрытий, для конкретных экспериментальных условий. Порядок пользования методом следующий. Аналитически определяется разность деформаций усадок ( $\varepsilon$ ) основания ( $\varepsilon_1$ ) и растворного слоя ( $\varepsilon_2$ ).

Величина усадки вычисляется по упрощенной формуле, предложенной в работе [3]:

$$\varepsilon_y = \beta (u_{kp} - \alpha \varphi), \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент усадки  $\beta = 0,003 \frac{\text{мм}/\text{мм}}{\text{г}/\text{г}}$ ;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности между равновесной влажностью материала и относительной влажностью воздуха  $\alpha = 21 \cdot 10^{-5} \frac{\text{г}/\text{г}}{\%}$ ;

$u_{kp}$  – критическая влажность раствора, при достижении которой начинается усадка, определяемая по формуле

$$u_{kp} = 0,015 + 0,01K, \quad (2)$$

причем  $K = 0,7 + 0,15 \left( \frac{\Pi - 225}{25} + \frac{(B/\Pi) - 0,4}{0,1} \right)$ . (3)

По рассчитанному значению  $\varepsilon$  (см. рисунок) определяется характер взаимодействия растворного слоя и основания. С ростом разницы деформаций ( $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ) возможны следующие виды нарушения монолитности: при  $\varepsilon < \varepsilon_{\text{пред}}$  произойдет отслоение слоя; при  $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$  наступит растрескивание слоя. Однако трещин может не быть и при  $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$ , если размер изделия меньше расстояния между трещинами.

На основании расчетов С.В. Александровского [4] и экспериментальных испытаний, проведенных по методике [2], величина предельной растяжимости  $\varepsilon_{\text{пред}}$  цементно-песчаных растворов с учетом ползучести и сцепления с основанием принята равной 0,6 мм/м.

Принимая во внимание, что высыхание, а следовательно, и усадка более толстого основания, находящегося под ремонтным растворным слоем, происходит в несколько раз медленнее, и учитывая, что она уменьшает величину  $\varepsilon$ , можно в предварительных расчетах в запас трещиностойкости предполагать  $\varepsilon_1 = 0$ .

Предлагаемый метод применим и тогда, когда разность деформаций основания и покрытия обусловливается различными коэффициентами температурного расширения.

Рассмотрим два характерных случая оценки монолитности растворного ремонтного слоя при усадке.

В первом случае требуется провести оценку монолитности ремонтного растворного слоя толщиной 1 см, изготовленного на растворе с В/Ц = 0,6 и расходом цемента 450 кг/м<sup>3</sup>, при условии, что  $R_{\text{сц}}/R_p = 0,8$ , а средняя относительная влажность воздуха самого жаркого месяца составляет 70 %.

Используя зависимости (1)–(3), вычисляем  $K$ ,  $u_{\text{кр}}$  и усадку раствора при заданной относительной влажности, где  $K = 2,35$ ;  $u_{\text{кр}} = 0,0385 \text{ г/г}$ ;  $\varepsilon_2 = 0,714 \text{ мм/м}$ . Далее по рисунку (кривая 2) определяем, что растворный слой будет растрескиваться с шагом трещин 7,5 см, отслоение при уменьшении усадки до 0,6 мм/м не произойдет (прямая 2). Для предупреждения растрескивания нужно снизить усадку отделочного раствора до менее 0,6 мм/м либо повысить предельную растяжимость материала растворного слоя до более 0,714 мм/м.

Во втором случае требуется оценить монолитный отделочный слой толщиной 2 см, изготовленный на растворе с В/Ц = 0,55 и расходом цемента 400 кг/м<sup>3</sup>, при условии, что  $R_{\text{сц}}/R_p = 0,5$ , а средняя относительная влажность воздуха самого жаркого месяца равна 60 %.

Используя зависимости (1)–(3), вычисляем  $K$ ,  $u_{\text{кр}}$  и усадку раствора:  $K = 1,975$ ;  $u_{\text{кр}} = 0,0347 \text{ г/г}$ ;  $\varepsilon_2 = 0,663 \text{ мм/м}$ .

Пользуясь рисунком (прямая 4) при  $R_{\text{сц}}/R_p = 0,5$ , находим величину разности деформаций, которая вызовет отслоение слоя толщиной 2 см, равную 0,33 мм/м. Так как усадка растворного слоя значительно превышает величину разности деформаций, вызывающей отслоение, то в данном случае отслоение слоя неизбежно. Для предупреждения нарушения монолитности основания и ремонтного растворного слоя следует уменьшить его толщину до 0,5 см либо повысить прочность сцепления до прочности раствора на растяжение с одновременным увеличением предельной растяжимости слоя в системе до более 0,663 мм/м.

Предложен комплексный подход к получению трещиностойких ремонтных составов – совместное введение модификаторов направленного действия: редиспергируемых полимерных порошков, гидравлически активной добавки (микрокремнезем) и микроволокон (полипропиленовой фибры), компенсирующих деформации бетонов. Оценка монолитности ремонтного растворного слоя показала повышение трещиностойкости при усадочных деформациях. При значительном варьировании состава растворной смеси может происходить изменение его предельной растяжимости, что требует внесения соответствующих поправок в nomограмму с помощью современных компьютерных технологий.

**Вывод.** Таким образом, установленная зависимость адгезии защитного (отделочного) покрытия от свойств материалов слоя и основания носит универсальный характер, определяет прочность и долговечность слоистых систем, образованных конструкционным и защитным слоем, а потому имеет большие перспективы для практического использования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков Г.И., Михайловский В.П. О расчете трещиностойкости отделочного слоя панелей и блоков // Бетон и железобетон. 1972. № 5.
2. А.с. 670887, СССР. Способ определения предельной растяжимости строительного материала / А.Т. Пименов, В.П. Михайловский; опубл.1979, Бюл. № 24. 3 с.
3. Горчаков Г.И., Михайловский В.П., Пименов А.Т. Прогноз монолитности отделочного слоя // Бетон и железобетон. 1977. № 1. С. 12–13.
4. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.

**Пименов Александр Трофимович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Игнатова Ольга Арнольдовна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: oa\_ignatova@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Чикмарев Павел Александрович**, магистр; E-mail: dred-pavel@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 29.03.16

**Pimenov Alexander Trofimovich**, DSc, Professor

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

**Ignatova Olga Arnol'dovna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: oa\_ignatova@mail.ru

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

**Chikmarev Pavel Alexandrovich**, MSc; E-mail: dred-pavel@yandex.ru

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

#### **DEPENDENCE OF ADHESION OF A PROTECTIVE (FINISHING) COVERING ON PROPERTIES OF MATERIALS OF A LAYER AND BASIS**

The possibility of evaluation of the solidity of the mortar layer and the concrete base. Determination of the necessary parameters are not cracked and flaking of mortar layers for concrete operating conditions are presented in the form of nomograms. The method allows to predict the crack resistance of the layer and indicates ways to prevent violation of integrity.

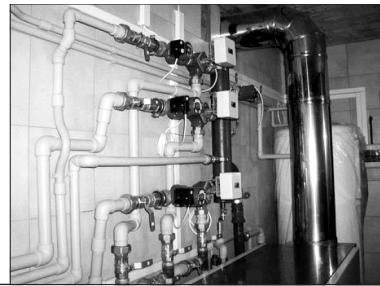
**К e y w o r d s:** layered system, the integrity of layers, crack resistance, delamination.

#### REFERENCES

1. Gorchakov G.I., Mikhaylovskiy V.P. O raschete treshchinostoykosti otodelochnogo sloya paneley i blokov [About the calculation of crack resistance of finishing layers of panels and blocks]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1972. No. 5. (in Russia)

2. A. s. 670887, USSR. Sposob opredeleniya predel'noy rastyazhimosti stroitel'nogo materiala [Method of determining ultimate elongation construction material]. A.T. Pimenov, V.P. Mikhailovskiy, publ. 1979. Bull. No. 24. 3 p. (in Russia)
  3. G o r c h a k o v G.I., M i k h a y l o v s k i y V.P., P i m e n o v A.T. Prognoz monolitnosti otdelochnogo sloya [Prediction of the solidity of finishing layer]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1977. No. 1. Pp. 12–13. (in Russia)
  4. A l e k s a n d r o v s k i y S.V. Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy na izmeneniya temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti [Calculation of concrete and ferroconcrete structures to changes in temperature and moisture with account of creep]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 432 p. (in Russia)
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА



УДК 697:921.001.24

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

### РАСЧЕТ ОТРЫВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОКА ПРИ ВХОДЕ В КРУГЛЫЙ ВСАСЫВАЮЩИЙ КАНАЛ<sup>\*</sup>

Произведен расчет течения на входе в круглый всасывающий канал при наличии набегающего встречного и попутного воздушного потока. Для моделирования используется разработанная вычислительная итерационная процедура с дискретными круглыми вихревыми кольцами. Определены следующие величины: радиус эффективного всасывания, коэффициент сжатия струи, точка присоединения критической линии тока на стенки патрубка, циркуляция свободного вихревого слоя в зависимости от величины скорости набегающего потока.

**Ключевые слова:** местная вытяжная вентиляция, воздушные течения вблизи всасывающих каналов, метод дискретных вихрей, отрывные течения.

**Введение.** Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы осуществляют для определения формы отрывной поверхности тока, профилирование по которой позволит создать местные вентиляционные отсосы с улучшенными аэродинамическими и акустическими свойствами [1–3]. Учет набегающего потока при расчете течения в спектре действия круглого и щелевидного тонкостенных патрубков произведен в работах [4–8]. В статье [7] рассчитаны параметры отрывной области течения на входе в круглый патрубок при низкоскоростном набегающем потоке. После модернизации метода моделирования отрыва потока в работе [8] рассмотрены и случаи высокоскоростного потока, произведено масштабное сравнение расчетов различными методами [4–6] с расчетом, разработанным в статье [8] методом, установлена его адекватность и достоверность.

Целью настоящей работы является расчет параметров отрывной области (рис. 1) на входе в круглый тонкостенный патрубок в зависимости от скорости набегающего потока.

**1. Основные расчетные соотношения и построение вычислительного алгоритма.** Дискретная математическая модель (рис. 2) строится следующим образом. По границе течения размещены присоединенные бесконечно тонкие вихревые кольца (черные кружочки) и контрольные

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 16-08-00074\_a).

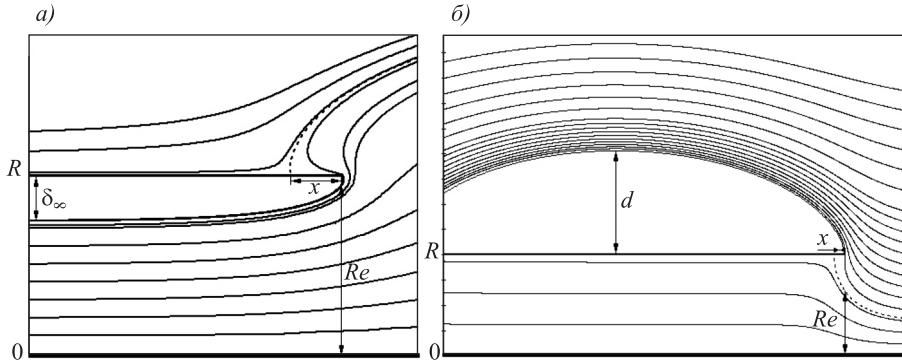


Рис. 1. Параметры отрывной области течения при скорости набегающего потока ниже скорости всасывания (а) и выше скорости всасывания (б)

точки (крестики на рис. 2) – произвольные точки на окружности, охватывающей патрубок, либо лежащие во всасывающем сечении. Заметим, что во всасывающем сечении на оси симметрии размещена вихревь нулевого радиуса, поэтому он не учитывается. Число дискретных вихревых колец равно числу контрольных точек. В контрольных точках, лежащих на стенках патрубка, выполняется условие непроницаемости – скорость вдоль направления нормали равна нулю. Во всасывающем сечении скорость в направлении внешней нормали одинакова и равна  $v_0$ . Разбиение на дискретные вихревые кольца и контрольные точки равномерно, контрольные точки находятся по центру между вихревыми кольцами. Расстояние между двумя соседними вихревыми кольцами равно шагу дискретности  $r_h$ . Свободная поверхность тока состоит из свободных вихревых колец (полые кружочки на рис. 2) и образуется на острой кромке  $A$  патрубка. Она определяется итерационным путем, описанным ниже. Параллельно оси патрубка набегает поток со скоростью  $v_\infty$ .

Обозначим через  $N$  – количество присоединенных вихревых колец;  $N_s$  – количество свободных вихревых колец;  $x^p$  – контрольная точка,  $p = 1, 2, \dots, N$ .

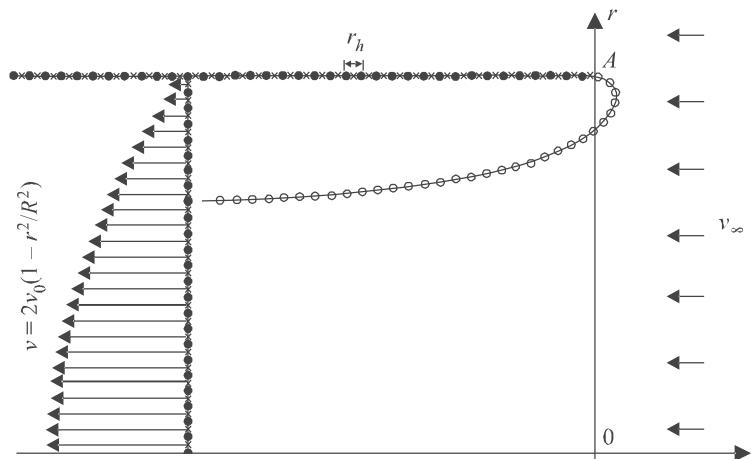


Рис. 2. Дискретная математическая модель отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал (патрубок) в меридиональной плоскости

Скорость в произвольной точке  $x$  вдоль направления  $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ , если известны циркуляции всех вихрей, вычисляется с помощью формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_S} G(x, \zeta^q) + n_1 v_\infty, \quad (1)$$

где  $\xi^q$  – точка расположения  $q$ -го присоединенного вихревого кольца с циркуляцией  $\Gamma(\xi^q)$ ;

$\gamma = \text{const}$  – циркуляция свободного вихревого кольца;

$\zeta^q$  – точка расположения  $q$ -го свободного вихревого кольца.

Функция  $G(x, \xi)$  выражает собой влияние на точку  $x(x_1, x_2)$  вихревого кольца с единичной циркуляцией, расположенного в точке  $\xi(\xi_1, \xi_2)$ .

$$G(x, \xi) = \frac{4(A_1 b + A_2 a)E(t)}{b(a-b)\sqrt{a+b}} - \frac{4A_2 F(t)}{b\sqrt{a+b}} \text{ при } b \neq 0; \quad G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 n_1}{2a\sqrt{a}} \text{ при } b=0;$$

$$2x_2 \xi_2 = b > 0; \quad a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0;$$

$$A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}; \quad A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1];$$

$$F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}; \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta; \quad t = 2b/(a+b);$$

$$F(t) = \sum_{i=0}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=0}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t}; \quad E(t) = 1 + \sum_{i=1}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=1}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t};$$

$c_i, d_i$  взяты из таблиц [8].

Если расстояние от точки  $x$  до точки  $\xi$  меньше шага дискретности  $r_h$ , то данная функция вычисляется по формуле:

$$G(x, \xi) = ((x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1)/(2\pi r_h^2).$$

В случае  $x = \xi$  функция  $G(x, \xi) = 0$ .

Вычислительный алгоритм строится следующим образом. После задания точек расположения присоединенных вихрей и контрольных точек формируется двумерный массив  $G^{pq} = G(x^p, \xi^q)$ ;  $p = 1, 2, \dots, N$ ;  $q = 1, 2, \dots, N$ . Запоминаются коэффициенты при первой неизвестной циркуляции вихря, лежащей на острой кромке  $A$ :  $G(x^p, \xi^1)$ ,  $p = \overline{1, N}$ . Нумерация вихрей, лежащих на поверхности трубы, ведется с этой точки. Далее начинается итерационная процедура.

1. Формируется одномерный массив свободных членов

$$b^p = -n_1 v_\infty + v_n(x_0^p), \quad p = 1, 2, \dots, N,$$

где  $v_n(x_0^p)$  – скорость вдоль направления внешней нормали в граничной контрольной точке  $x_0^p$ .

2. Решается относительно неизвестных  $\Gamma(\xi^q)$  система линейных алгебраических уравнений:

$$\Gamma(\xi^1) \left( G(x^p, \xi^1) + \sum_{k=1}^{N_S} G(x^p, \zeta^k) \right) + \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x^p, \xi^q) = b^p, \quad p = 1, 2, 3, \dots, N.$$

На первой итерации  $N_s = 0$ . Запоминается циркуляция вихревого кольца, лежащего на острой кромке:  $\gamma = \Gamma^1$ . Циркуляция всех свободных вихрей одинакова и равна  $\gamma$ .

3. Начиная с острой кромки  $A$  строится свободная поверхность тока. С помощью формулы (1) при  $\bar{n} = \{1,0\}$  вычисляется составляющая скорости  $v_x$ , при  $\bar{n} = \{0,1\}$  – составляющая скорости  $v_r$ . Последующая точка  $(x', r')$  определяется из предыдущей  $(x, r)$  с использованием формул:

$$x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_r^2}; \quad r' = r + \Delta t v_r / \sqrt{v_x^2 + v_r^2},$$

где  $\Delta t$  – шаг, который выбирается достаточно малым.

Свободная поверхность тока будет состоять из свободных вихревых колец, удаленных друг от друга на расстояние шага дискретности  $r_h$ , т.е. в процессе вычислений на каждом этапе проверяется расстояние до предыдущего свободного вихревого кольца. Как только в некоторой точке это расстояние становится равным, с точностью до малой погрешности, шагу дискретности, в эту точку помещается следующее вихревое кольцо. Построение продолжается до вытяжного сечения. Величина  $N_s$  получает свое значение, равное количеству свободных вихревых колец (без лежащего на острой кромке вихревого кольца, которое также свободное). После чего итерационная процедура начинается с пункта 1 и продолжается до тех пор, пока абсолютная величина разности между старым значением циркуляции  $\gamma$  на свободной поверхности тока и новым значением будет больше заданной точности  $\epsilon$ .

**2. Результаты расчета и их обсуждение.** Во всасывающем сечении задавалось параболическое распределение скорости, которое соответствует вязкому течению в круглом канале со средней скоростью  $v_0$ :  $v = 2v_0(1 - r^2/R^2)$ , шаг дискретности  $r_h = 0,0003125$  м;  $R = 0,1$  м;  $v_0 = 1$  м/с.

Полученные результаты представлены в безразмерном виде:

$$\bar{v} = v_\infty / v_0; \quad R_e = R_e / R; \quad \bar{d} = d / R; \quad \bar{\delta}_\infty = \delta_\infty / R; \quad \bar{x} = x / R; \quad \bar{\gamma} = \gamma / (Rv_0).$$

При уменьшении скорости набегающего потока циркуляция на свободной поверхности тока, являясь положительной величиной, снижается (рис. 3). При скорости набегающего потока, равной скорости всасывания, наблюдается точка перегиба, циркуляция принимает нулевое значение, затем продолжает убывать и получает отрицательное значение.

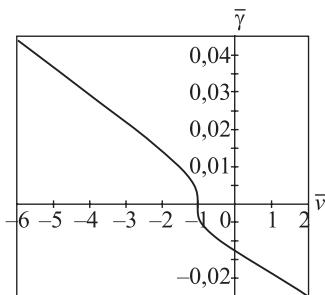


Рис. 3. Изменение величины циркуляции свободного вихревого слоя

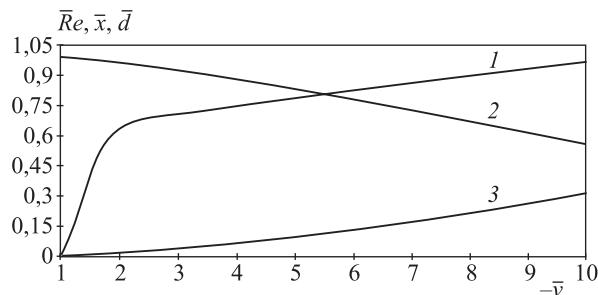


Рис. 4. Изменение параметров отрывной области при скорости набегающего потока больше скорости всасывания  
1 – зависимость  $\bar{d}$  от  $\bar{v}$ ; 2 – зависимость  $\bar{R}_e$  от  $\bar{v}$ ; 3 – зависимость  $\bar{x}$  от  $\bar{v}$

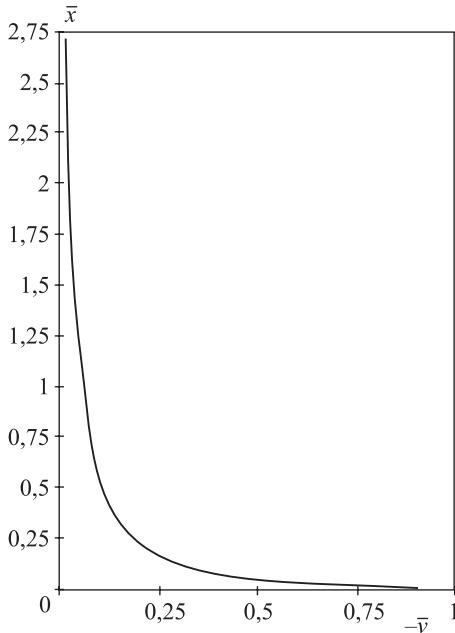


Рис. 5. Изменение параметра  $\bar{x}$  при скорости набегающего потока меньше скорости всасывания

При скорости набегающего потока больше скорости всасывания и совпадающей с направлением скорости всасывания изменение параметров отрывной области представлено на рис. 4. Безразмерные величины расстояние  $\bar{x}$  от острой кромки до точки присоединения критической линии тока и максимальная величина расстояния  $\bar{d}$  свободной поверхности тока до всасывающего патрубка возрастают, а радиус эффективного всасывания  $\bar{R}_e$  убывает при росте абсолютной величины скорости набегающего потока.

В случае, когда скорость набегающего потока меньше скорости всасывания, но по-прежнему совпадает с направлением скорости всасывания, величина  $\bar{x}$  резко убывает от  $\infty$  до 0 (рис. 5).

При отрыве потока внутрь всасывающего круглого патрубка изменения параметров отрывной области строились в зависимости от скорости потока набегающего как по направлению всасывания, так и в противоположном направлении (рис. 6).

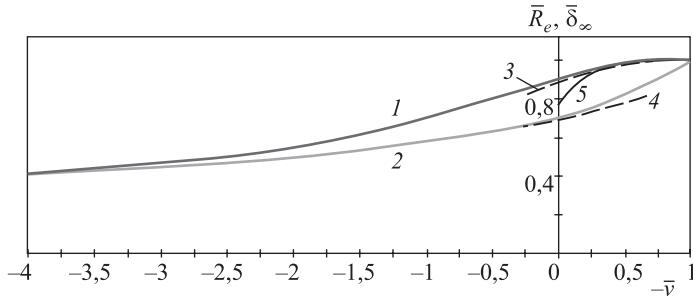


Рис. 6. Изменение параметров отрывной области при наличии свободной поверхности тока внутри патрубка

Здесь кривая 1 демонстрирует график изменения величины  $R_e$ , а кривая 2 –  $\delta_\infty$ . Они смыкаются при равенстве векторов скорости всасывания и набегающего потока, а также при значительном росте скорости потока набегающего против направления скорости всасывания (рис. 7). Кривые 3 и 4 – это также зависимости  $R_e$  и  $\delta_\infty$ , построенные в работе [7], в рамках модели, когда задавалась циркуляция на свободной поверхности тока, после чего определялась скорость всасывания. Кривая 5, демонстрирующая изменение величины  $\bar{\delta}_\infty$  для щелевидного всасывающего канала, построена методами теории функций комплексного переменного [6].

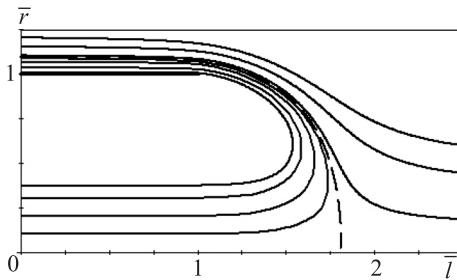


Рис. 7. Линии тока при скорости набегающего потока  $\bar{v}_\infty = 5 \text{ м/с}$

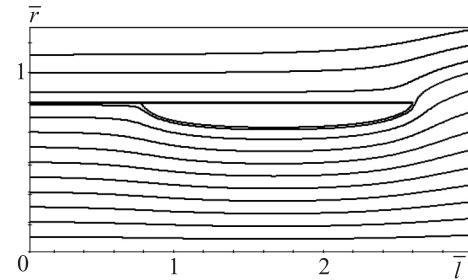


Рис. 8. Линии тока при скорости набегающего потока  $\bar{v}_\infty = -0,5 \text{ м/с}$

Приближенная формула для расчета кривой 1 в диапазоне  $-2 < -\bar{v} < 1$ :

$$\begin{aligned}\bar{R}_e = & 0,0010187\bar{v}^8 - 0,0097301\bar{v}^7 + 0,0284889\bar{v}^6 - 0,0204664\bar{v}^5 - 0,0480592\bar{v}^4 + \\ & + 0,0997709\bar{v}^3 - 0,0337484\bar{v}^2 - 0,2166366\bar{v} + 0,9050001.\end{aligned}$$

Для кривой 2 в том же диапазоне:

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_\infty = & -0,0014444\bar{v}^8 + 0,0117944\bar{v}^7 - 0,0236783\bar{v}^6 - 0,0028135\bar{v}^5 + 0,0405085\bar{v}^4 - \\ & - 0,0397074\bar{v}^3 + 0,0701657\bar{v}^2 - 0,1806756\bar{v} + 0,7040562.\end{aligned}$$

Заметим, что в рамках разработанной математической модели представляется возможным получить картину течения, когда отрывная поверхность тока замыкается на поверхность трубы (рис. 8). В этом случае расчет выполнялся при шаге дискретности  $r_h = 0,000625 \text{ м}$ ;  $R = 0,1 \text{ м}$ ;  $v_0 = 1 \text{ м/с}$ ; точности расчета (разности между предыдущим и последующим значением циркуляции на свободной поверхности тока)  $\epsilon = 10^{-7}$ . Здесь ставилось условие: как только точка свободной поверхности тока приближается к поверхности трубы на расстояние меньше шага дискретности и проходит внутрь трубы на расстояние больше  $0,1R$ , то происходит выход из цикла построения свободной поверхности тока.

**Выводы.** С помощью разработанного метода математического моделирования отрывного течения на входе во всасывающий патрубок, при наличии набегающего потока, произведен расчет параметров отрывной области в зависимости от скорости и направления набегающего потока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев К.И., Постохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 1. С. 29–32.
2. Ходаков И.В. Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 6–12.
3. Ходаков И.В. Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 11–15.
4. Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х. Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники. Казань: Казан. ун-т, 2012. 120 с.
5. Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Маклаков Д.В. Расчет концентраций частиц в задаче аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 6. С. 89–99.

6. Варсегова Е.В., Пosoхин В.Н. О форме отрывных зон на входе в щелевой всасывающий патрубок // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2015. № 3. С. 98–102.
7. Аверкова О.А., Горлов А.С., Логачев А.К., Толмачева Е.И. Математическое моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал при наличии набегающего потока // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 7.
8. Логачев К.И., Аверкова О.А., Логачев А.К., Толмачева Е.И., Горлов А.С. О методе численного моделирования отрыва потока на входе в круглый тонкостенный патрубок // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2016. Т. 17. С. 189–196.
9. Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

**Логачев Константин Иванович**, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: kilogachev@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**Аверкова Ольга Александровна**, д-р техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**Логачев Артур Константинович**, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
**Толмачева Елена Игоревна**, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 18.03.16

**Logachev Konstantin Ivanovich**, DSc, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Averkova Olga Aleksandrovna**, DSc, Ass. Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Logachev Artur Konstantinovich**, Post-graduate Student

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Tolmacheva Elena Igorevna**, Post-graduate Student

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **CALCULATION OF THE DETACHABLE SURFACE OF THE STREAM AT THE ENTRANCE TO THE ROUND SUCTION FLUE**

Calculation of flow at an entrance to the round suction flue in the presence of the running counter and cocurrent airstream is made. For modeling the developed computing iterative procedures with using of discrete round rings whirl are used. Depending on the size of speed of the running stream are defined: radius of effective inflow, coefficient of jet contraction, a point of accession of the stagnation streamline on branch of branching pipe, circulation of a free vortex plane.

**К e y w o r d s:** local ventilation exhaust, flows near suction inlets, discrete vortex method, separation flows.

## **REFERENCES**

1. Logachev K.I., Posokhin V.N. Raschet techeniya vblizi kruglogo vsasyvayushchego patrubka [Calculation of a flow in the vicinity of a round suction pipe]. Izvestiya vuzov. Aviationskaya tekhnika [News of Higher Educational Institutions. Aeronautics]. 2004. No. 1. Pp. 29–32. (in Russia)

2. K h o d a k o v I.V. Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie otryva potoka na vkhode vo vsasyvayushchie kanaly s mekhanicheskimi ekranami [Numerical and experimental research of detached flow at the inlet in the suction duct with mechanical screens]. Vestnik BGTU [Bulletin of BSTU]. 2016. No. 3, Pp. 6–12. (in Russia)
  3. K h o d a k o v I.V. Modelirovanie otryvnogo techeniya na vkhode v mnogougol'noe vsasyvayushchee otverstie [Modeling of detached flow at the entry polygonal suction hole]. Vestnik BGTU [Bulletin of BSTU]. 2016. No. 2. Pp. 11–15. (in Russia)
  4. G i l' f a n o v A.K., Z a r i p o v Sh.Kh. Matematicheskie modeli aspiratsii aerozoley v tonkostennye probrobniki [Mathematical models of aerosols aspiration to thin-walled sample catchers]. Kazan: Kazan University, 2012. 120 p. (in Russia)
  5. G i l' f a n o v A.K., Z a r i p o v Sh.Kh., M a k l a k o v D.V. Raschet kontsentratsiy chastits v zadache aspiratsii aerozolya v tonkostennuyu trubku [Calculation of particle concentration in the problem of aerosol aspiration into a thin-walled tube]. Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza [A journal of Russian academy of sciences. Fluid dynamics]. 2009. No. 6. Pp. 89–99. (in Russia)
  6. V a r s e g o v a E.V., P o s o k h i n V.N. O forme otryvnykh zon na vkhode v shchelevoy vsasyvayushchii patrubok [A form of separated flow on an entrance to suction slot-hole branch pipe]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2015. No 3. Pp. 98–102. (in Russia)
  7. A v e r k o v a O.A., G o r l o v A.S., L o g a c h e v A.K., T o l m a c h e v a E.I. Matematicheskoe modelirovanie otryvnogo techeniya na vkhode v kruglyy vsasyvayushchiy kanal pri nalichii nabegayushchego potoka [The mathematical modeling of separation flow at the entrance to a round suction duct at the presence of approach flow]. Vestnik BGTU [Bulletin of BSTU]. 2016. No. 7. (in Russia)
  8. L o g a c h e v K.I., A v e r k o v a O.A., L o g a c h e v A.K., T o l m a c h e v a E.I., G o r l o v A.S. O metode chislennogo modelirovaniya otryva potoka na vkhode v kruglyy tonkostenny patrubok [About the numerical simulation method of flow separation at the entrance to a round thin-walled pipe]. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii [Numerical methods and programming]. 2016. Vol. 17. Pp. 189–196. (in Russia)
  9. A b r a m o v i c s M., S t i g a n I. Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam [Special functions reference book]. Moscow, Nauka, 1979. 832 p. (in Russia)
-

УДК 697.922.22

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

## К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

### Сообщение 1

Обсуждается методика численного расчета сопротивления возмущающих элементов трубопроводных систем. Определяются коэффициенты местного сопротивления (КМС) на вход в щелевое отверстие, расположеннное 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»  $k-\epsilon$  модель замыкания системы уравнений двумерного турбулентного движения.

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

При расчете воздуховодов часто возникают трудности с определением местных потерь давления из-за отсутствия сведений о значениях коэффициентов местных сопротивлений (КМС) различных элементов сети.

Аналитическое определение значений КМС весьма затруднительно и исчерпывается небольшим набором ситуаций (внезапное расширение и сужение, вход в трубу). Попытки получить решения для более сложных случаев (повороты, тройники [1–8]) нельзя признать вполне успешными. Поэтому значения КМС определяются, как правило, экспериментально. Большой объем данных о КМС содержится в известном Справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика, вышедшего уже тремя изданиями в 1960, 1975 и 1992 гг. Но и этот фундаментальный труд далеко не исчерпывает всего многообразия, встречающихся на практике конструктивных ситуаций.

Современные методы расчета течений с помощью CFD программ дают возможность численного определения КМС.

Рассмотрим трубку тока, расход вдоль которой  $L = \text{const}$ , площадь сечения  $F$  может изменяться, средние по площади скорость  $u_F$  и статическое давление  $P_{cF}$  равны:

$$u_F = \frac{\int u df}{F} \rightarrow \bar{u}_F = \int_0^1 \bar{u} d\bar{f} = l;$$

$$P_{cF} = \frac{\int P_c df}{F} \rightarrow \bar{P}_{cF} = \int_0^1 \bar{P}_c d\bar{f}.$$

Здесь  $u$  и  $P_c$  – локальная скорость и статическое давление в произвольной точке сечения трубы,

$$\bar{u} = u/u_F, \quad \bar{P}_c = P_c/P_{dF}, \quad \bar{f} = f/F;$$

$P_{dF} = \rho u_F^2 / 2$  – среднее по площади трубы динамическое давление;

$\rho$  – плотность воздуха.

Полная энергия потока в произвольном сечении трубы –

$$E = LP_{cL} + LP_{dL}.$$

Здесь индекс  $L$  означает осреднение значений статического и динамического давлений по расходу:

$$P_{cL} = \frac{\int P_c u df}{L} = \frac{\int P_c u df}{u_F F} = P_{dF} \int_0^1 \bar{P}_c \bar{u} d\bar{f} = P_{dF} \gamma_L \rightarrow \gamma_L = \int_0^1 \bar{P}_c \bar{u} d\bar{f};$$

$$P_{dL} = \frac{\frac{\rho}{2} \int u^2 u df}{L} = \frac{\frac{\rho}{2} \int u^3 df}{u_F F} = P_{dF} \int_0^1 \bar{u}^3 d\bar{f} = P_{dF} \alpha_L \rightarrow \alpha_L = \int_0^1 \bar{u}^3 d\bar{f}.$$

Таким образом:

$$E/L = P_L = P_{cL} + P_{dL} = P_{dF}(\gamma_L + \alpha_L),$$

где  $P_L$  – полное давление в сечении.

Для двух сечений трубы I-I и II-II, включающих возмущающий элемент (ВЭ), имеем:

$$\Delta E/L = \Delta P_L = P_{dF}(\gamma_{L1} + \alpha_{L1} - \gamma_{LII} - \alpha_{LII}).$$

Положение сечений необходимо назначать так, чтобы выделенный объем трубы тока включал в себя и прямые участки до и после ВЭ, где начинается и заканчивается перестройка полей скорости и давления (зоны влияния возмущающего элемента). В этом случае найденное значение  $\Delta P_L = \zeta \Delta P_{dF}$  будет включать в себя и собственно местные потери, связанные с перестройкой течения, и потери на трение между сечениями. Тогда:

$$\zeta = \Delta P_L / \Delta P_{dF} = \gamma_{L1} + \alpha_{L1} - \gamma_{LII} - \alpha_{LII}.$$

Если поля скорости и статического давления определены численным методом, то можно установить значения  $\gamma_L$ ,  $\alpha_L$  в сечениях I-I, II-II и далее  $\zeta$ .

Остановимся еще на одном важном моменте. Зачастую при экспериментальном определении  $\zeta$  осреднение  $P_c$  и  $P_d$  по расходу заменяют осреднением по площади. Оценим допускаемую при этом ошибку.

Пусть в некоторой точке сечения локальная скорость и статическое давление равны:

$$u = u_F + \Delta u \rightarrow \bar{u} = 1 + \Delta \bar{u},$$

$$P_c = P_{dF} + \Delta P \rightarrow \bar{P}_c = 1 + \Delta \bar{P}.$$

Ранее было найдено, что:

$$P_c = P_{dF} \int_0^1 \bar{P}_c d\bar{f} \rightarrow \gamma_F = \int_0^1 \bar{P}_c d\bar{f}.$$

Кроме того,

$$P_{\text{дF}} = \frac{\rho}{2} \int_F \frac{u^2 df}{F} = P_{\text{дF}} \int_0^1 \bar{u}^2 d\bar{f} \rightarrow \alpha_F = \int_0^1 \bar{u}^2 d\bar{f} = 1.$$

Учитывая эти соотношения, найдем

$$\gamma_L - \gamma_F = \int_0^1 \bar{P}_c \bar{u} d\bar{f} - \int_0^1 \bar{P}_c d\bar{f} = \int_0^1 \Delta \bar{u} d\bar{f} + \int_0^1 \Delta \bar{P} \Delta \bar{u} d\bar{f}.$$

Первый интеграл равен нулю, так как

$$\int_0^1 \Delta \bar{u} d\bar{f} = \int_0^1 (\bar{u} - 1) d\bar{f} = \int_0^1 \bar{u} d\bar{f} - \int_0^1 d\bar{f} = 1 - 1 = 0.$$

Таким образом,

$$\gamma_L - \gamma_F = \int_0^1 \Delta \bar{P} \Delta \bar{u} d\bar{f}.$$

Поскольку

$$\Delta \bar{P} \approx \frac{\rho}{2} \Delta \bar{u}^2, \quad \int_0^1 \Delta \bar{P} \Delta \bar{u} d\bar{f} \approx \frac{\rho}{2} \int_0^1 \Delta \bar{u}^3 d\bar{f}.$$

Аналогичные вычисления дают

$$\alpha_L - \alpha_F = \int_0^1 \Delta \bar{u}^3 d\bar{f}.$$

Так как  $\Delta \bar{u}^3$  может иметь и положительные, и отрицательные значения, то  $\gamma_L$  и  $\alpha_L$  могут быть и больше, и меньше  $\gamma_F$  и  $\alpha_F$ . Различие будет тем больше, чем больше неравномерность поля скорости.

Проиллюстрируем изложенное выше на примере расчета КМС для входа в воздуховод через щелевое отверстие. Рассматривается плоская задача. Геометрия области и картина течения, рассчитанная при помощи пакета программ Fluent, приведены на рис. 1.

Высота воздуховода  $H = 0,1$  м, ширина щелевого отверстия  $h = 0,015$  м. Удельные расходы воздуха: входящего в отверстие  $L_o = 0,15 \text{ м}^2/\text{с}$ ; в транзитном потоке, проходящем мимо отверстия,  $L_t = 1,35 \text{ м}^2/\text{с}$ ; суммарный поток  $L_c = 1,5 \text{ м}^2/\text{с}$ ; отношение расходов  $\bar{L}_o = L_o / L_c = 0,1$ . Среднее по площади динамическое давление на входе в щель

$$P_{\text{до}} = (\rho / 2) u_{F0}^2 = (\rho / 2)(L_o / h)^2 = 61,3 \text{ Па},$$

в начале транзитного потока

$$P_{\text{дт}} = (\rho / 2) u_{Ft}^2 = (\rho / 2)(L_t / H)^2 = 111,6 \text{ Па},$$

на выходе суммарного потока из канала

$$P_{\text{дс}} = (\rho / 2) u_{Fc}^2 = \rho / 2((L_o + L_t) / H)^2 = 137,8 \text{ Па}.$$

Здесь и далее индекс «о» относится к потоку, входящему в отверстие, индекс «т» – к транзитному потоку, проходящему мимо отверстия.

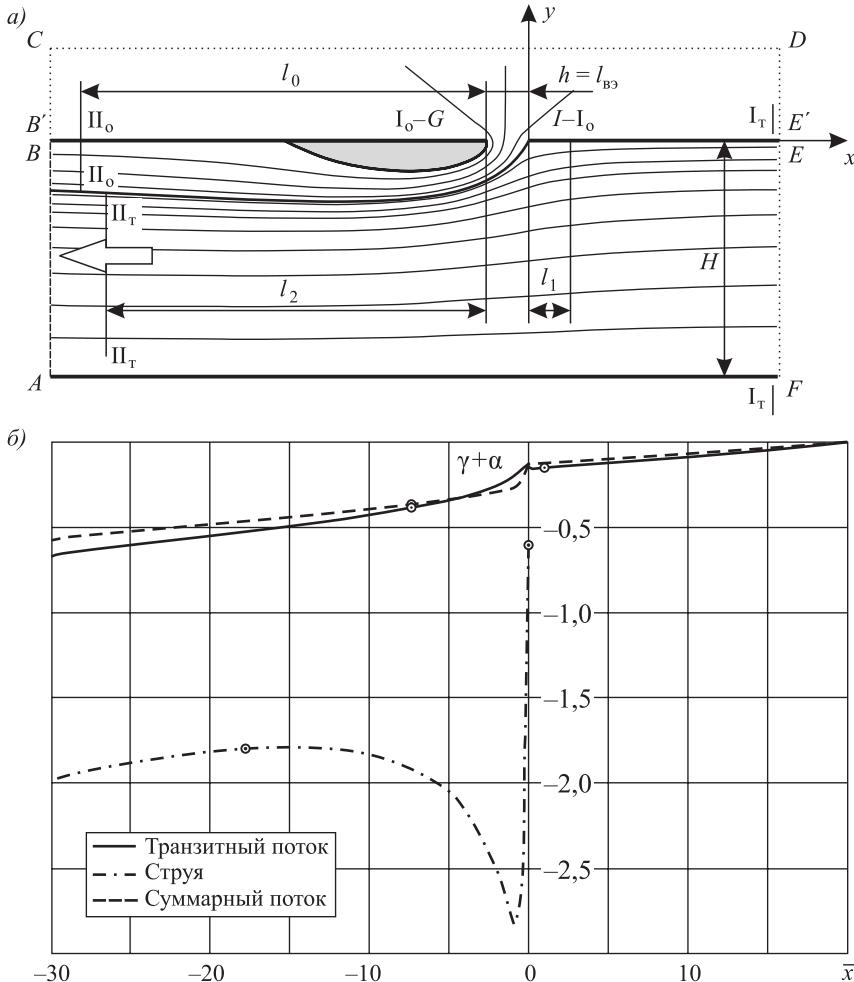


Рис. 1. Течение при входе в воздуховод при наличии транзитного потока  
а – картина течения; б – изменение относительного полного давления  $\bar{P} = \gamma + \alpha$  по  
длине канала

На рис. 1, а нанесены характерные длины:  $l_{вэ} = h$  – возмущающего элемента,  $l_0$  – зоны влияния по потоку, входящему в отверстие,  $l_1 - l_2$  – зон влияния по транзитному потоку. Жирными линиями показана трубка тока, образованная воздухом, втекающим через отверстие, остальная часть воздуховода занята транзитным потоком. Темным выделена вихревая зона, образующаяся при срыве потока с острой кромки отверстия. Будем вычислять КМС на вход  $\zeta_0$  и на проход  $\zeta_t$  мимо отверстия. Индекс  $L$  везде опустим.

При решении численным методом основная система уравнений плоского турбулентного движения жидкости замыкалась уравнениями «стандартной»  $k-\epsilon$  модели с использованием «стандартных» пристеночных функций при моделировании течения в пограничном слое.

Приняты следующие граничные условия (ГУ) задачи: проницаемая граница  $AB - u_x = \text{const} = 15 \text{ м/с}$  (число Рейнольдса  $Re = 9,9 \cdot 10^4$ ), проницаемая удаленная от входной щели граница  $B' CDE'$  – избыточное давление ( $\Delta P_c = 0$ ), проницаемая граница  $EF$ , через которую воздух входит в канал,

изменением избыточного давления  $\Delta P_c$  моделируется желаемое отношение  $\bar{L}_o; BG, B'G, IE, IE', AF$  – твердые непроницаемые границы (ГУ – «стенка»). Длина канала до щелевого отверстия 2 м ( $2H$ ) достаточна, чтобы исключить влияние ГУ на течение вблизи щелевого отверстия. Длина канала после щелевого отверстия 3 м ( $3H$ ) достаточна, чтобы проследить деформации потока, происходящие из-за возмущающего элемента.

Для устранения влияния размеров ячеек расчетной сетки проводилось ее последовательное сгущение как во всей области, так и вблизи твердых границ и щелевого отверстия. Конечная сетка имела следующие параметры: размер минимальной ячейки (вблизи твердых границ и в области щелевого отверстия) около 0,1 мм, максимальной – 7,5 мм (на удаленных границах); количество расчетных ячеек – 5,9 млн.

На рис. 1, б приведены эпюры изменения относительного осредненного полного давления  $\bar{P} = P/P_{dF} = \gamma + \alpha$  по длине потоков транзитного, входящего через отверстие, и суммарного, не включающего вихревую зону. Кружками отмечены границы зон, где изменение  $(\gamma + \alpha)$  нелинейно, или иначе – границы зон влияния возмущающего элемента.

При построении эпюр принято:

- для струи  $P_{dF}$  – динамическое давление среднее по площади щели – граница **GI**;
- для транзитного потока  $P_{dF}$  – динамическое давление среднее по площади канала – граница **EF**;
- для суммарного потока  $P_{dF}$  – динамическое давление среднее по площади канала – граница **AB**.

До отверстия  $\bar{P}$  транзитного потока меняется линейно, т. е. местные потери здесь отсутствуют,  $R_{уд1} = 8,4$  Па/м. После отверстия имеется очень короткий участок ( $0 < \bar{x} = x/H < -0,3$ ), где давление несколько возрастает, что связано, по-видимому, с турбулентным переносом энергии через разделяющую линию тока. Затем следует относительно короткий участок ( $-0,3 < \bar{x} < -8$ ), где  $\bar{P}$  изменяется нелинейно. Потери давления, опять же, связаны в основном с турбулентным переносом энергии, но уже в противоположном направлении. После сечения  $\bar{x} > -8$   $\bar{P}_{nL}$  изменяется практически линейно,  $R_{уд2} = 14,1$  Па/м. И это означает, что процесс смешения параллельно движущихся потоков завершен.

Резкое падение  $\bar{P}$  по длине струйки на участке ( $-0,15 < \bar{x} < -0,9$ ) – это местные потери, связанные с кардинальной перестройкой поля скорости и упомянутой выше передачей части энергии транзитному потоку. Затем ситуация меняется. Уже транзитный поток передает энергию струе, в результате чего  $\bar{P}$  возрастает на участке ( $-0,9 < \bar{x} < 18,9$ ). После этого изменение  $\bar{P}$  приобретает линейный характер,  $R_{уд0} = 9,2$  Па/м, процесс смешения завершился.

Штриховой линией показано изменение  $\bar{P}$ , осредненное по всей ширине канала, исключая вихревую зону. Здесь выделяется нелинейная зона ( $1 < \bar{x} < -7,4$ ) и зона, где обмен энергией между параллельно движущимися потоками стабилизируется, и можно говорить, что далее имеют место только потери на трение.

На рис. 2 показаны результаты численного моделирования течения при соотношении  $\bar{L}_o = 0,82$  и тех же размерах  $h, H$ . В этом случае  $P_{do} = 4141$  Па;

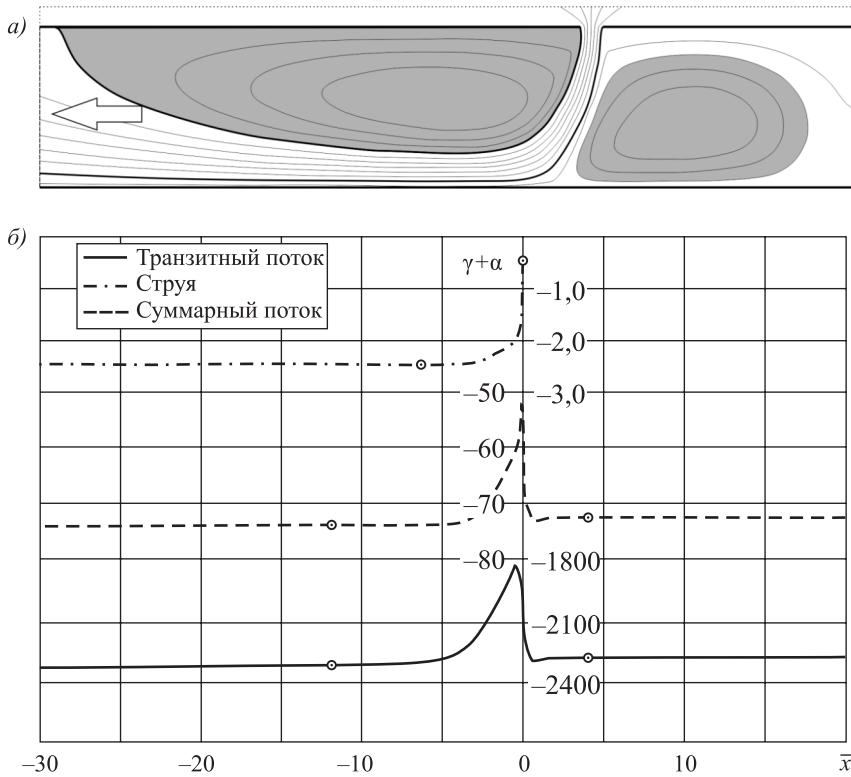


Рис. 2. Течение при  $\bar{L}_o = 0,82$

*a* – картина течения; *б* – изменение полного давления  $\bar{P} = \gamma + \alpha$  по длине канала

$P_{\text{дт}} = 4,384$  Па. Видно, что изменение параметра  $\bar{L}_o$  приводит к коренному изменению кинематики течения. При больших значениях  $\bar{L}_o$  появляются обширные вихревые зоны, превалирует уже не транзитный поток, а струя, образованная потоком, втекающим через отверстие.

Если мы хотим, чтобы КМС включали в себя только местные потери, т.е. не учитывали потери на трение, то тогда

$$\zeta = \gamma_1 + \alpha_1 - \gamma_{II} - \alpha_{II} \overline{\Delta P}_{\text{тр}} = \Delta(\gamma + \alpha) - \overline{\Delta P}_{\text{тр}},$$

где  $\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{тр}} / P_{\text{дт}}$  – относительные потери давления на трение между сечениями, включающими в себя зоны влияния.

Из рис. 1, б следует:

– для транзитного потока  $-l_1 = 0,08$  м,  $l_2 = 0,76$  м,  $\Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{дт}} = 0,241$ ,  $\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = (l_1 R_{y_{d1}} + l_2 R_{y_{d2}}) / P_{\text{дт}} = 0,102$ ;

– для струи  $-l_0 = 1,89$  м,  $\Delta(\gamma + \alpha) = \Delta P / P_{\text{до}} = 1,207$ ,  $\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = l_0 R_{y_{d0}} / P_{\text{до}} = 0,284$ .

КМС на вход потока в отверстие и на проход мимо него составили  $\zeta_o = 0,9$ ;  $\zeta_t = 0,139$ .

Если  $\bar{L}_o = 0,82$ , из рис. 2, б следует:

– для транзитного потока  $-l_1 = 0,5$  м,  $l_2 = 1,2$  м,  $\Delta(\gamma + \alpha) = 41,22$ ,  $R_{y_{d1}} = 0,73$  Па/м,  $R_{y_{d2}} = 25,3$  Па/м,  $\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = 7,01$ ;

– для струи  $-l_0 = 0,64$  м,  $\Delta(\gamma + \alpha) = 2,01$ ,  $R_{y_{d0}} = 10,6$  Па/м,  $\overline{\Delta P}_{\text{тр}} = 0,0016$ .

КМС на вход потока в отверстие и на проход мимо него составили  $\zeta_0 = 2,01$ ;  $\zeta_t = 34,2$ .

Напомним, что при определении  $\zeta_t$  потери давления отнесены к динамическому давлению потока до слияния, при определении  $\zeta_0$  – к динамическому давлению в отверстии.

Влияние параметра  $\bar{L}_o$  на значение КМС весьма существенно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1954. 288 с.
2. Трофимович В.В. Об изменении количества движения турбулентного потока на изгибе // Теплогазоснабжение и вентиляция. Киев: Будівельник, 1966. С. 109–112.
3. Трофимович В.В. Определение оптимальной кривизны отводов  $\psi = 90^\circ$  и их сопротивления в сетях промышленной вентиляции // Теплогазоснабжение и вентиляция. Киев: Будівельник, 1966. С. 113–119.
4. Трофимович В.В. О влиянии угла поворота на сопротивление отводов // Теплогазоснабжение и вентиляция. Киев: Будівельник, 1967. С. 95–98.
5. Левин С.Р. Сопротивление тройников вытяжных воздуховодов // Отопление и вентиляция. 1940. № 10–11. С. 5–10.
6. Левин С.Р. Аналитическое определение величины потерь напоров в тройниках вытяжных вентиляционных сетей воздуховодов // Отопление и вентиляция. 1935. № 7. С. 20–28.
7. Абрамович Г.Н. Аэродинамика местных сопротивлений // Промышленная аэrodinамика. 1935. Вып. 211. С. 65–150.
8. Каменев П.Н. Динамика потоков промышленной вентиляции. М.: Госстройиздат, 1938. 360 с.

**Порохин 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 10.03.16

**Posohin 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 1

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. Tali e v V.N. Aerodinamika ventilyatsii [Aerodynamics of ventilation]. Moscow, Stroyizdat, 1954. 288 p. (in Russia)
2. Trofimovich V.V. Ob izmenenii kolichestva dvizheniya turbulentnogo potoka na izgibe [To change the amount of movement of the turbulent flow in a bend]. Teplogazosnabzhenie i ventilyatsiya [Heat and ventilation]. Kiev, Budivel'nik, 1966. Pp. 109–112. (in Russia)
3. Trofimovich V.V. Opredelenie optimal'noy krivizny otvodov  $\psi = 90^\circ$  i ikh sопrotivleniya v setyakh promyshlennoy ventilyatsii [Determination of optimum curvature of bends  $\psi = 90^\circ$  and ventilation resistance in industrial networks]. Teplogazosnabzhenie i ventilyatsiya [Heat and ventilation]. Kiev, Budivel'nik, 1966. Pp. 113–119. (in Russia)
4. Trofimovich V.V. O vliyanii ugla poverota na sопrotivlenie otvodov [The effect of the angle of rotation of the resistance taps]. Teplogazosnabzhenie i ventilyatsiya [Heat and ventilation]. Kiev, Budivel'nik, 1967. Pp. 95–98. (in Russia)
5. Levin S.R. Soprotivlenie troynikov vytyazhnykh vozdukhovodov [Resistance of exhaust duct tees]. Otoplenie i ventilyatsiya [Heating and ventilation]. 1940. No. 10–11. Pp. 5–10. (in Russia)
6. Levin S.R. Analiticheskoe opredelenie velichiny poter' naporov v troynikakh vytyazhnykh ventilyatsionnykh setey vozdukhovodov [The analytical determination of the head loss in exhaust ventilation duct networks tees]. Otoplenie i ventilyatsiya [Heating and ventilation]. 1935. No. 7. Pp. 20–28. (in Russia)
7. Abramovich G.N. Aerodinamika mestnykh sопrotivleniy [Aerodynamics of local resistance]. Promyshlennaya aerodinamika [Industrial aerodynamics]. 1935. No. 211. Pp. 65–150. (in Russia)
8. Kamenev P.N. Dinamika potokov promyshlennoy ventilyatsii [Dynamics of industrial ventilation flows]. Moscow, Gosstroyizdat, 1938. 360 p. (in Russia)

УДК 697.92 : 726.54

А.Г. КОЧЕВ, М.М. СОКОЛОВ, А.С. СЕРГИЕНКО, А.С. МОСКАЕВА,  
Е.А. КОЧЕВА

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

Рассматриваются различные аспекты создания требуемых параметров микроклимата в православных храмах: тепловая защита зданий, отопление храмов, естественная вентиляция. Затрагивается вопрос обеспечения параметров микроклимата подклетов храмов. Изучается вопрос выбора конструкции отопительной системы, наиболее оптимальной для создания и поддержания требуемого микроклимата. Приводятся рекомендации по достижению требуемых теплотехнических характеристик ограждающих конструкций храма, а также по установке систем аэрации и результаты лабораторных и натурных исследований в данной области.

Ключевые слова: православные храмы, аэродинамика, микроклимат, тепловая защита помещений, системы отопления, аэрация.

Особенности обрядов и служб в православных храмах, наличие художественной росписи конструкций (стен, колонн, откосов и сводов), фресок, икон (станковой живописи), предметов культовых обрядов, конструктивное оформление алтаря имеют историческую, архитектурную и художественную ценность. Поэтому для сохранности и продления срока их службы основной задачей при создании и поддержании требуемых параметров микроклимата в помещениях православных храмов является ассилияция избыточной теплоты, водяных паров и углекислого газа, выделяемых людьми, зажженными свечами и лампадами.

Согласно данным нормативных источников<sup>1, 2</sup> в холодный период года при температуре в молельном зале 14–16 °С каждый человек выделяет до 40 г/ч, а в теплый период при температуре 23–25 °С – до 50 г/ч водяного пара. По результатам экспериментальных исследований установлено: количество водяного пара, выделяемого при сжигании свечей, составляет 1,3 кг/кг парафина, а теплота (по низшей теплоте сгорания) от зажженных свечей равна 46 810 кДж/кг парафина. Количество углекислого газа, выделяемого одним человеком, составляет 23 л/ч, а при сжигании свечей – 1650 л/кг парафина. Тепловыделения от людей по полной теплоте равны 100 Вт в теплый и 140 Вт – в холодный период года.

Отличия эксплуатации православных храмов от храмов других конфессий заключаются в присутствии большого количества людей, молящихся стоя; наличии большого количества зажженных свечей во время службы и большого количества престольных праздников в течение года.

<sup>1</sup> АВОК Стандарт 2–2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Введ. 2004-06-09. М.: АВОК, 2004. 14 с.: ил.

<sup>2</sup> МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т. 2. Православные храмы и комплексы. Введ. 2003. М.: Арххрам, 2003. 182 с.: ил.

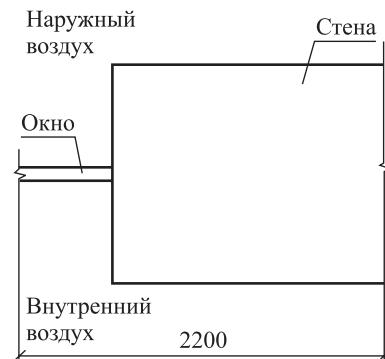
**Тепловая защита помещений.** За последние годы в России наблюдается интенсивное восстановление разрушенных, реконструкция существующих и строительство новых православных храмов. Часто летние храмы стали переводить в круглогодичный режим эксплуатации. Массивные стены православных храмов толщиной 1,04–1,56 м имеют большую инерционность  $D \geq 7$ , отвечающую современным требованиям по сопротивлению теплопередаче. Следует помнить, что элементы наружных ограждающих конструкций летних храмов не имеют требуемых теплотехнических характеристик и сопротивления паропроницанию. Поэтому летние храмы необходимо сначала реконструировать, повысив сопротивление теплопередаче окон храма, арок, шатров и закомарных перекрытий, стен и заполнений оконных проемов центрального и малых барабанов, арок куполов и их сопротивление паропроницанию, до нормативных значений. При конструировании завершений куполов (луковиц, шатров) следует предусматривать щелевые зазоры для просушки утеплителя.

На основании экспериментальных и расчетных данных установлено, что коробка оконного переплета в массивных стенах (при сравнимых размерах ширины окна и толщины стены) должна располагаться в строго определенном месте по отношению к продольной оси стены. Это расположение находится расчетным способом с помощью разработанного нами программного продукта «Откос» (рис. 1, 2).

При остекленности ограждений храмов в пределах 10–30 % достигается уменьшение теплопотерь в процессе оптимизации расположения оконных переплетов по отношению к продольной оси стены порядка 11 %, считая от общих теплопотерь зданием храма. Прежде чем конструировать инженерные системы в храмах, следует обеспечить герметичность здания с теплотехнической точки зрения.

В настоящее время известны случаи установки в храмах оконных переплетов из ПВХ и современных уплотненных деревянных оконных переплетов с одно- и двухкамерными стеклопакетами. Эти конструкции исключают поступление наружного воздуха через неплотности открывящихся частей заполнения оконных проемов и создают условия для образования сосредоточенных (компактных) воздушных потоков, врывающихся в храм при открывании наружных дверей. Компактные струи вызывают интенсивное колебание одежды на прихожанах и священнослужителях, задувание свечей и раскачивание лампад. В храмах, где установлены данные элементы остекления, следует конструировать в оконных переплетах специальные устройства для обеспечения регулируемого воздухообмена для холодного, переходного и теплого периодов года.

**Отопление храмов.** В Нижегородском архитектурно-строительном университете выполняются исследования по разработке рекомендаций конструирования тех или иных видов систем отопления с естественной вентиляцией в храмах средней полосы и северных регионов России.



*Рис. 1. Область работы программы «Откос»*

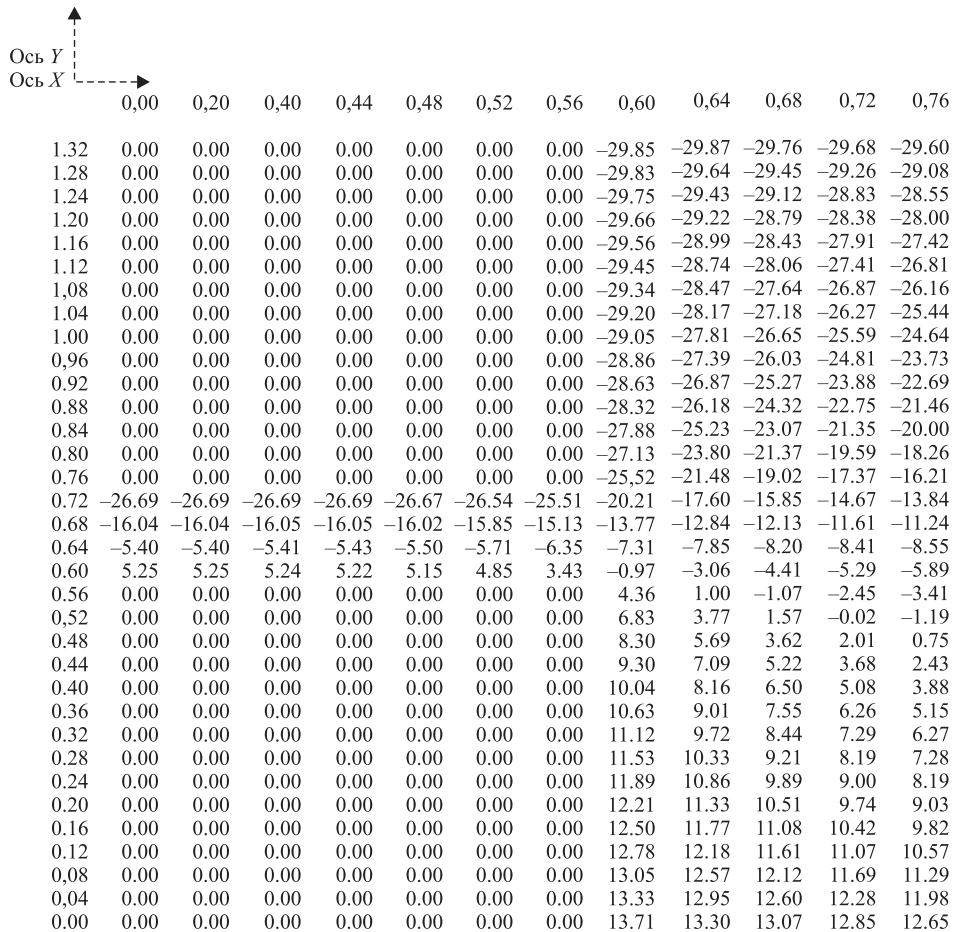


Рис. 2. Пример результата, получаемого в программе «Откос»

Полностью исключить выделение сажи при сгорании свечей невозможно, поэтому для снижения темпа осаждения поляризованной сажи на ограждающих конструкциях над отопительными приборами рекомендуется устанавливать для отопления храмов радиаторы (имеющие теплопередачу порядка 50 % конвекцией и порядка 50 % излучением) или регистры из гладких труб с аналогичным перераспределением видов теплопередачи. Устанавливать в храмах для отопления конвекторы, которые имеют около 75 % теплопередачи конвекцией и порядка 25 % излучением, следует после проведения теплотехнических и аэродинамических исследований. Над конвекторами создаются мощные восходящие конвективные потоки, которые приводят к интенсивному осаждению сажи на ограждающих поверхностях над отопительными приборами. Для храмов в регионах с расчетной температурой наружного воздуха  $t_n \leq -20^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от их объемно-планировочных и конструктивных решений, нужно конструировать либо радиаторные, либо комбинированные с панельно-лучистым или воздушным отоплением, либо только воздушные системы отопления.

Конструировать системы отопления с «теплыми полами» в храмах, расположенных в регионах с расчетной температурой  $t_n \leq -20^{\circ}\text{C}$ , рекомендуется только после проведения специальных теплофизических и аэродинамиче-

ских исследований. Образующиеся конвективные потоки над «теплым полом» ухудшают микроклиматические параметры в зоне дыхания человека. В большинстве архитектурных форм одно-, пятикупольных (двух-, четырех-, шестистолпных) храмов и храмах типа корабля с доминирующей вертикальной планировкой в молельном зале следует конструировать «теплые полы» только для регулировки тепловой мощности в переходные периоды года. Конвективные потоки, образующиеся над нагретой поверхностью пола в храме, отрицательно влияют на параметры микроклимата, людей и на устойчивость горения свечей в холодный период года [1–5].

**Естественная вентиляция помещений.** Процесс сжигания свечей сопровождается и выделением сажи из-за неполного сгорания парафина. При отсутствии требуемого воздухообмена в холодный период года в православных храмах сажа осаждается на людях, станковой живописи, фресках и ограждающих конструкциях, на которых имеется роспись. Для обеспечения воздухообмена в помещениях храма следует устанавливать двойное или тройное остекление в раздельных деревянных переплетах с конструктивными зазорами (щелями) в притворах открывающихся частей окон от 0,5 до 1 мм. Перераспределение ветрового давления на поверхностях ограждающих конструкций обеспечивает рассредоточенные потоки приточного воздуха (инфилтрацию) через неплотности оконных рам и наружных дверей.

Для асимиляции теплоты, влаги (водяного пара) и углекислого газа, выделяющихся в храме во время службы, необходимо конструировать вытяжные фрамуги или системы вентиляции, иначе все эти компоненты начинают переноситься в храме рециркуляционными конвективными потоками. Сажа обладает свойством поляризации, поэтому при движении воздуха образуется статический потенциал, на вертикальных ограждающих конструкциях и над отопительными приборами в храме видны следы осевшей сажи (копоти). При отсутствии вытяжной вентиляции это приводит к потемнению стен и свода купола (рис. 3). В переходный и теплый периоды года воздухообмен следует обеспечивать через форточки и аэрационные фрамуги.



*Рис. 3. Оседание сажи над отопительными приборами*

Подвижность воздуха особенно влияет на параметры микроклимата во время престольных праздников, когда в помещениях храмов собирается большое количество прихожан. Люди зажигают свечи, что приводит к значительным выделениям теплоты, влаги и углекислого газа. Во время службы люди постоянно входят и выходят, поэтому наружные двери храма значи-

тельное время (20–30 мин в час) открыты. Это вызывает постоянный приток холодного наружного воздуха в молельный зал и приделы. Для подогрева и погашения скорости приточного воздуха следует в первом приделе конструктировать воздушно-тепловые завесы, а также приточным воздухом из фрамуг (с определенным углом раскрытия), расположенных на отметках выше 2,5 м от уровня пола молельного зала, погашать динамический напор воздушного потока, поступающего через двери. Для предотвращения конденсации водяных паров в холодный период года на внутренних поверхностях куполов, оконных откосов и стен храма необходимо с помощью организованного воздухообмена удалять из помещения влагу, выделяемую людьми и зажженными свечами  $G_w$ .

Воздухообмен в храмах следует регулировать до службы, во время службы и после ее завершения. После завершения службы свечи догорают на столешницах и производится влажная уборка пола помещения. В результате на пол выливается от 3 до 10 ведер воды, в зависимости от площади пола в храме. Всю эту высыхающую воду нужно удалять из помещений храма вытяжными системами вентиляции (аэрацией). В противном случае она будет проникать в массивные ограждающие конструкции, снижая их прочность и теплоустойчивость, портить художественную роспись, станковую живопись, фрески и предметы культовых обрядов [1, 2].

Естественная вентиляция обладает свойством саморегулирования из-за изменения разности удельных весов приточного и удаляемого из помещения храма воздуха по периодам года и во время службы. Конструировать системы естественной вентиляции необходимо с учетом исключения образования компактных приточных струй, поступающих в зону дыхания человека, и наиболее эффективного удаления загрязненного воздуха из объема помещения с помощью элементов конструкций вытяжных систем, не портящих интерьер и фасады здания храма [2–5]. Саморегулируемость расходов естественной системы вентиляции позволяет сэкономить 20–50 % теплоты относительно аналогичных по максимальным расходам воздуха механических систем вентиляции.

Стоит отметить, что для расчета аэрации православных храмов необходимо знание внешних аэродинамических характеристик церквей, учитывающихся при расчете ветровых нагрузок на сооружение. Исследование внешней аэродинамики зданий, в том числе православных храмов, производится в аэродинамических трубах, представляющих собой установки, создающие поток воздуха или газа для проведения экспериментов с целью изучения явлений, сопровождающих обтекание тел [2–6].

Масштабные модели православных храмов изготавливаются в соответствии с критериями подобия из плотной бумаги, внутренняя полость которых для обеспечения жесткости и прочности заполняется быстротвердеющим пенным материалом. В местах расположения оконных проемов (характерных точках модели) размещаются 5 мм трубки. Для измерения статического давления на поверхности модели здания в этих точках используют микроманометр, присоединяющийся к медным трубкам с помощью резиновых полых жгутов, которыми дренирована испытуемая модель здания. Измерения для каждой точки производятся для восьми направлений воздушного потока: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ [2–6].

По результатам исследований строится аэродинамическая характеристика здания в виде диаграммы распределения давлений ветра на поверхности

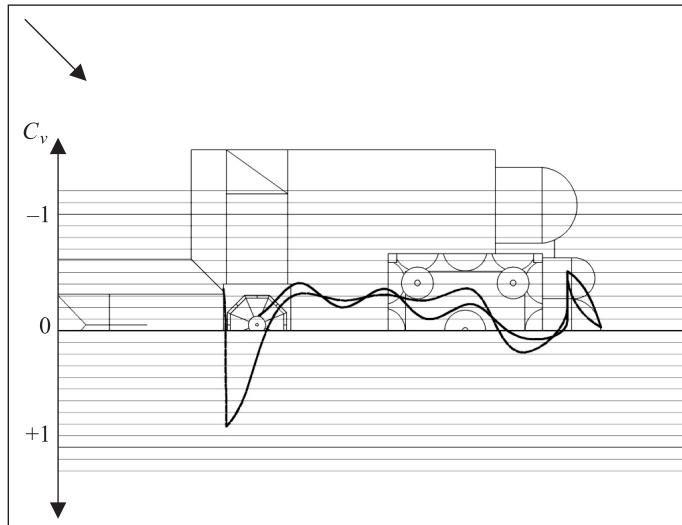


Рис. 4. Диаграмма изменения аэродинамических коэффициентов при северо-западном направлении ветра для церкви Жен-Мироносиц с наветренной стороны

изучаемого сооружения при различных направлениях ветрового потока (рис. 4).

Полученные аэродинамические коэффициенты могут быть использованы для расчета систем естественной вентиляции как исследованных храмов, так и схожих с ними по размеру и стилю. Расчет площадей приточных и вытяжных фрамуг выполняется для преобладающих ветров летнего и зимнего периодов. Поскольку храмы были испытаны по восьми направлениям, результаты могут быть использованы для любых климатических зон. Получившиеся данные по внешней аэродинамике должны быть увязаны со значениями температурных и скоростных полей в помещениях православных храмов.

Нами были проведены исследования скоростных и температурных полей для четырех вариантов расположения оконных проемов и отопительных приборов на наружной стене (рис. 5, 6).

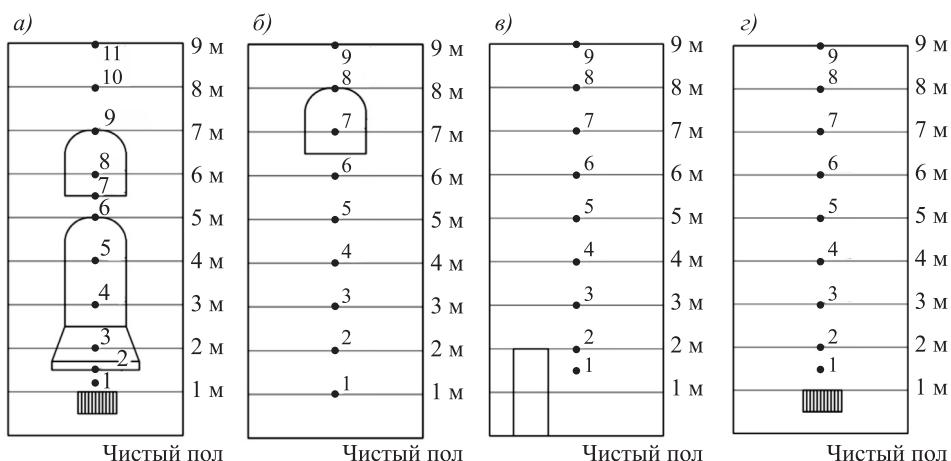


Рис. 5. Варианты расположения оконных проемов и приборов на наружной стене  
а – отопительный прибор и окно; б – только окно; в – без окон; г – только отопительный прибор

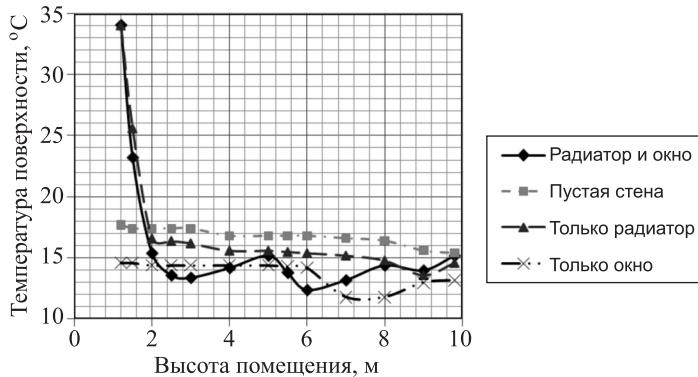


Рис. 6. Зависимость температуры поверхности наружной стены в православном храме от высоты при различных вариантах расположения окон и отопительных приборов

Из графика видно, что области самых низких температур приходятся на оконные проемы. На небольшом расстоянии от отопительного прибора (0,5 м по высоте) происходит резкое падение температуры до значений, как в случае со стеной без окон или даже ниже.

Нами разработаны методы расчета аэрационного воздухообмена и конструкции аэрационных фрамуг для храмов наиболее распространенных архитектурных форм.

**Обеспечение параметров микроклимата подклетов.** Переувлажненные ограждающие конструкции подклетов вызывают дополнительные теплопотери через зоны регулярных (сезонных) температурных колебаний. При расчетах отопления они не учитываются, что приводит к понижению значений температуры в помещениях подклетов ниже точки росы и конденсации водяных паров на внутренних поверхностях наружных стен и пола в храмах. Теплопотери через ограждающие конструкции подклетов храмов оказываются больше расчетных на 10–20 %.

За счет осушки переувлажненных конструкций подклетов с обеспечением требуемого паропроницания, защитой стен от атмосферных осадков и при создании необходимых метеорологических условий инженерными системами можно достичь экономии тепловой энергии в храмах порядка 7–15 % от общих теплопотерь здания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочев А.Г. Микроклимат православных храмов: моногр. Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. 449 с.: ил.
2. Соколов М.М. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2013. 266 с.: ил.
3. Кочев А.Г., Соколов М.М. Теоретические и экспериментальные исследования влияния внешних аэродинамических характеристик на параметры микроклимата в православных храмах // Приволж. науч. журн. 2011. № 1 (17). С. 58–65.
4. Кочев А.Г., Федорова О.В., Соколов М.М. Расчет воздухообменов для осушки конструкций и аэрации в культовых зданиях // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 2–3. С. 60–67.
5. Кочев А.Г., Соколов М.М. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов // Приволж. науч. журн. 2012. № 2 (22). С. 78–85.

6. Кочев А.Г., Соколов М.М., Сергиенко А.С., Кочева Е.А. Анализ полей аэродинамических коэффициентов православных храмов Нижнего Новгорода // Приволж. науч. журн. 2014. № 4 (32). С. 146–151.

**Кочев Алексей Геннадьевич**, д-р техн. наук, проф.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Соколов Михаил Михайлович**, канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Сергиенко Алексей Сергеевич**, канд. техн. наук, ст. препод.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Москаева Анна Сергеевна**, асп.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Кочева Елена Алексеевна**, асп.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 28.03.16

**Kochev Alexei Gennadievich**, DSc, Professor

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Sokolov Mikhail Mikhaylovich**, PhD, Ass. Professor

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Sergienko Alexei Sergeevich**, PhD, Senior Lecturer

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Moskaeva Anna Sergeevna**, Post-graduate Student

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kocheva Elena Alexeevna**, Post-graduate Student

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **FEATURES OF MICROCLIMATE CREATION IN ORTHODOX CHURCHES**

In the article the various aspects of creation of the required parameters of the microclimate in the orthodox churches, such as the thermal protection of buildings, temples heating, natural ventilation are discusses. Also the issue of climate parameters of basement of temples is addressed. In the thermal protection of buildings section the recommendations to achieve required thermal characteristics of protecting structure of temple are contains. In the heating of temples section the issue of selection of the heating system construction, the most appropriate to establish and maintain required microclimate parameters are addresses. In the natural ventilation section the guidelines for installing aeration systems and the results of laboratory and field research in this area are provides.

**Key words:** orthodox churches, aerodynamics, microclimate, thermal protection of buildings, heating systems, aeration.

## **REFERENCES**

1. Kochev A.G. Mikroklimat pravoslavnnykh khramov [Microclimate of orthodox temples]. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2004. 449 p. (in Russia)
2. Sokolov M.M. Vliyanie vneshej aerodinamiki na mikroklimat pravoslavnnykh khramov: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [The influence of external aerodynamics on the microclimate of orthodox temples: dis. candidate of technical sciences]. Nizhny Novgorod, 2013. 266 p. (in Russia)
3. Kochev A.G., Sokolov M.M. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya v vliyaniya vneshnikh aerodinamicheskikh kharakteristik na parametry mikroklimata v

- pravoslavnnykh khramakh [Theoretical and experimental studies of the influence of external parameters on the aerodynamic characteristics of the microclimate in the orthodox temples]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2011. No. 1 (17). Pp. 58–65. (in Russia)
4. Kochev A.G., Fedorova O.V., Sokolov M.M. Raschet vozdukhoobmena dlya osushki konstruktsiy i aeratsii v kul'tovykh zdaniyakh [Calculation of air exchange for drying structures and aeration in religious buildings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 2–3. Pp. 60–67. (in Russia)
5. Kochev A.G., Sokolov M.M. Fiziko-matematicheskoe opisanie estestvennoy konvektsii v pomeshcheniyakh pravoslavnnykh khramov [Physical and mathematical description of the natural convection in the premises of the orthodox temples]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2012. No. 2 (22). Pp. 78–85. (in Russia)
6. Kochev A.G., Sokolov M.M., Sergienko A.S., Kocheva E.A. Analiz poley aerodinamicheskikh koefitsientov pravoslavnnykh khramov Nizhnego Novgoroda [Analysis of fields of aerodynamic coefficients of orthodox churches in Nizhny Novgorod]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2014. No. 4 (32). Pp. 146–151. (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 С ТРУБЧАТЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Приведен анализ классификаций и их возможности по созданию новых конструктивных решений на примере использования трубчатых систем воздухоподвода и воздухоотвода.

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

Классификационные признаки-элементы представлялись ранее, например, в работах [1–10]. Однако отмеченные признаки-элементы не позволяли перейти к новым их сочетаниям, что тормозило поиск продуктивных технических решений при создании пневматических ударных механизмов (ПУМ).

К первым детальным рассмотрениям и исследованиям пневматических машин ударного действия следует отнести работы М.А. Бариля [1], которые проводились в 1908–1910 гг. Исследователь рассмотрел конструкции пневматических молотков различного назначения и разделил их на укрупненные группы по принципиальному отличию воздухораспределительных устройств: золотниковые, клапанные, бесклапанные; со ступенчатыми и бесступенчатыми ударниками; с воздухоподводящими трубками. При этом обращалось внимание на достаточность в конструктивных исполнениях деталей и узлов машин, но в самих группах не уточнялись признаки, представляющие признаки-элементы, не подлежащие функциональному разделению, т.е. последующей декомпозиции и композиции предметов признака-элемента.

Ф.А. Щепанский [2], Л.В. Арнольд [3], В.А. Кельдюшев [4] рассмотрели тип и функциональные особенности воздухораспределительного признака-элемента, но не указали на основополагающее свойство неделимости элемента.

Важность декомпозиции и композиции признаков-элементов для машин ударного действия отмечена в работах Г.В. Родионова [5, 6], где излагалась история механизмов и машин и обсуждалось предложение по их классификации не только в целом, но и детально. Г.И. Кусницын раскрыл многообразие

конструктивных исполнений воздухораспределителей-элементов и функциональные различия рабочих процессов в камерах пневматических машин ударного действия [7, 8].

Б.В. Суднишников и Н.Н. Есин [9] рассмотрели особенности клапанных систем воздухораспределения, а Ю.М. Башлыков [10] привел классификацию признаков-элементов клапанных воздухораспределительных систем пневмоударных машин.

В работе [11] дана классификация бесклапанных пневмоударных механизмов, а в последующих работах [12–14] представлено развитие признаков-элементов для новой системы дроссельного типа, а также для осуществления рабочих процессов с перепуском воздуха между камерами, с задержкой выпуска отработавшего воздуха. Развитие воздухораспределительных систем пневмоударных механизмов подытожено в работе [15] в отношении неделимых признаков-элементов, что позволило увидеть перспективу прогнозирования и развития этих систем. После предложений классификаций [16] признаков-элементов трубы появились работы поискового характера по реализации процессов подвода [17, 18], распределения [19] воздуха между рабочими камерами, резервирования [20] и выпуска отработавшего воздуха из камер посредством трубы [21].

Базируясь на признаках-элементах рассмотренных классификаций [1–24], можно считать, что конструктивным признаком, который предстоит оговаривать при создании новых технических решений пневматических ударных механизмов, должно быть расположение признаков-элементов воздухораспределения. Оно может быть выполнено (вне), (на), в рукоятке, стакане, крышке, цилиндре, ударнике, трубке, стержне, наковальне, хвостовике рабочего инструмента. При этом воздухоподвод и воздухоотвод, как правило, сочетают два признака-элемента и более, например, управление воздухоотводом осуществляется ударниками и цилиндром [25], а через многоканальные трубы может происходить одновременно выпуск и выпуск при управлении ударником и цилиндром [26].

Поскольку процессы выпуска и впуска представляют интерес для повышения экономичности ПУМ, рассмотрим применение в них трубчатых признаков-элементов воздухоподвода и воздухоотвода для рабочих камер. Практика исследований физико-математических моделей пневматических ударных механизмов, например [15, 24], показывает, что при описании рабочего процесса желательно учитывать роль конструктивных признаков-элементов более детально, так как они влияют на полноту уравнений, описывающих баро- и термодинамическую составляющие рабочего процесса. При этом изменение объемов камер различного назначения связано с пространством, в котором рабочий процесс осуществляется. Таким образом, составляющие баро-, термодинамического и баромеханического процесса связаны с хородинамическим и хоростатическим процессом в камерах пневматического ударного механизма.

Предлагаемые расширенные конструктивные признаки-элементы, относящиеся к средствам воздухораспределения, посредством трубок представлены в таблице. Так как указанные признаки-элементы в принципе принадлежат к средствам воздухоподвода и воздухоотвода, то их можно отнести

**Классификационные признаки-элементы трубы**

Код	Средства формирования впуска	Код	Конструктивный признак	Код	Уточнение конструктивного признака
1	2	3	4	5	6
5[15]	Трубка средств впуска $C^*$	1*	Бесступенчатая	$a^*$	Канал круглый сквозной гладкий
				$b^*$	Канал круглый постоянного сечения
				$c^*$	Канал круглый переменного сечения
				$d^*$	Канал круглый аксиальный
				$e^*$	Канал круглый коаксиальный
				$f^*$	Канал круглый тупиковый с отводом
				$g^*$	Канал круглый со щелевым прямым выходом
				$h^*$	Канал круглый со щелевым наклонным выходом
				$i^*$	Канал круглый с ярусным выходом
				$j^*$	Канал круглый с фигурным отверстием на выходе
				$k^*$	Канал круглый с овальным выходом
				$l^*$	Канал-паз наружный прямой
				$m^*$	Канал-паз наружный наклонный
				$n^*$	Канал-паз наружный ступенчатый
				$o^*$	Канал-паз наружный коленчатый
				$p^*$	Канал-паз наружный винтовой
				$q^*$	Канал-паз наружный прерывистый
				$r^*$	Канал-паз наружный с кривизной
				$s^*$	Канал-лыска наружный прямой
				$t^*$	Канал-лыска наружный наклонный
				$u^*$	Канал-лыска наружный ступенчатый
				$v^*$	Канал-лыска наружный волнистый
				$w^*$	Канал-лыска наружный с кривизной
				$x^*$	
		2*	Ступенчатая		То же $a^*-w^*$
		3*	Не составная		То же $a^*-w^*$
		4*	Составная		То же $a^*-w^*$
		5*	Одноканальная		То же $a^*-w^*$
		6*	Многоканальная		То же $a^*-w^*$
		7*	Без выточек		То же $a^*-w^*$
		8*	С выточками		То же $a^*-w^*$
		9*	Без проточки		То же $a^*-w^*$
		01*	С проточкой		То же $a^*-w^*$

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6
		02*			
5	Трубка средств запуска $D^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств перепуска $E^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств задержки $F^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств вытеснения $G^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств форсажа $H^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств продувки $I^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств выпуска $K^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств наддува $J^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств выравнивания параметров $L^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств аккумуляции $M^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств пневматического буфера $P^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка средств предкамерных $Q^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	
5	Трубка атмосферной камеры $R^*$	То же 1*-01*		То же $a^*-w^*$	

также к средствам наддува, запуска, перепуска, задержки, вытеснения, форсажа, продувки и выпуска [15, 24].

Некоторые пояснения по исполнению признаков-элементов трубчатых воздухоподводов и воздухоотводов. Трубы могут быть с наличием наружных и внутренних конструктивных признаков-элементов. На боковой поверхности размещаются признаки-элементы в виде каналов-пазов, винтовых, фигурных с некоторой кривизной по глубине или ширине; каналов-лысок, волновых, прямых параллельных образующей трубы, наклонных под некоторым углом к оси трубы, ступенчатых с некоторой кривизной поверхности.

Каналы-пазы могут быть прерывистыми или непрерывными (сквозными) кольцевыми выточками или проточками; перпендикулярными к оси трубы или наклонными под некоторым углом к образующей.

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

хвостовика инструмента. Если трубка выполнена заодно с ударником, то такие конструктивные решения следует относить к ступенчатым ударникам, которые занимают отдельную самостоятельную классификационную нишу [15, 24].

Для трубчатого воздухораспределения будем различать внутренние каналы, закрытые с одного из торцов трубки, коленчатые с радиальным входом, коленчатые с радиальным выходом и коленчатые с радиальными входом и выходом на наружную боковую поверхность трубки; сквозные без радиальных входов и выходов; сквозные с радиальным входом, сквозные с радиальным выходом; сквозные с центральным входом и выходом. Поперечные сечения внутренних каналов-пазов могут быть по форме прямоугольными, квадратными, овальными, треугольными, трапецидальными и т.п. Каналы-пазы по протяженности непрерывные (сквозные) и прерываемые. 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 трубы или наклонно к ней, что позволяет удлинить радиальность каналов входа и выхода на той же длине образующей и повысить прочность трубы.

Менее предпочтительны в эксплуатации трубы конической формы, входящие в отверстие сквозное или несквозное в ударнике, находящемся в постоянном контакте с трубой либо в зависимости от его положения. Нежелательны трубы, отличающиеся от цилиндрической формы, например, квадратного или другого сечения. С позиции прочности трубы переходы каналов-пазов и каналов-лысок от поверхности к поверхности вдоль образующей трубы должны быть с углами меньшими  $90^\circ$ . Для сечений каналов-пазов овальной формы предпочтительны переходы, образованные глубиной канала-паза не более радиуса овала (окружности). Поперечные сечения каналов-пазов прямоугольной и треугольной формы лучше выполнять с продольными фасками.

Предложенные рекомендации по поперечным каналам-пазам справедливы и для каналов-пазов, расположенных внутри или снаружи трубчатых признаков-элементов, относящихся к цилиндрям, ударникам, хвостовикам инструмента ПУМ.

Сквозные каналы многоканальных трубок предварительно выполняют бесступенчатыми, гладкими. Отметим также, что трубы могут быть одно-, двух- и многоканальными. У двухканальных трубок каналы расположены аксиально и коаксиально, у многоканальных – аксиально и коаксиально в одном поперечном сечении трубы.

Структурная формула ПУМ записывается аналогично примерам, приведенным в работах [15, 24], для динамических признаков любого средства:  $C, D, E, F, G, H, I, J, K$ . Для уточнения исполнений конструктивных признаков динамические признаки отмечены звездочкой (\*) вверху символа:  $5^*$  и далее  $C^*, D^*, E^*, F^*, G^*, H^*, I^*, J^*, K^*$  с добавлением дополнительных динамических признаков от  $1^*$  до  $01^*$  и для трубок от  $a^*$  до  $w^*$ .

Например, для синтезированных ПУМ, представленных на рис. 1 и 2, для простоты сравнения приняты различными только исполнения трубок

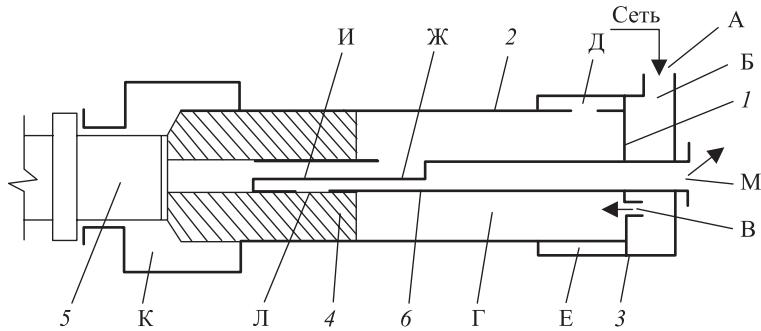


Рис. 1. Синтезированный ПУМ. Обозначения см. в тексте

с функциями впуска воздуха в камеру холостого хода. Для каждого ПУМ приведено краткое описание устройства с обозначениями признаков-элементов и последовательность их рабочих процессов, а также их структурные формулы.

Сжатый воздух поступает из сети по каналу А в предкамеру Б, далее по каналу В в крышке 1 цилиндра 2 в камеру Г рабочего хода, откуда посредством перепускного канала Д в стенке цилиндра в кольцевую аккумуляционную камеру Е в стакане 3 (см. рис. 1). В зависимости от положения ударника 4, опертого на хвостовик 5 рабочего инструмента, воздух идет по радиальному каналу Ж и его продолжению в виде круглого канала И в трубке 6 в камеру К холостого хода. Камера Е опорожняется в камеру Г посредством перепускного канала Д. Опорожнение камеры К осуществляется, в зависимости от положения ударника, после закрытия им каналов Ж перепуска, через радиальный канал Л в трубке и его продолжению в виде продольного канала М в атмосферу. Под действием разности силовых импульсов давления воздуха со стороны камер Г и К ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента.

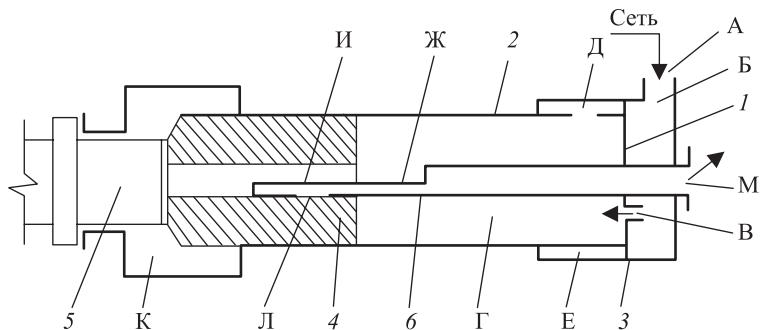


Рис. 2. Синтезированный ПУМ. Обозначения см. в тексте

Сжатый воздух поступает из сети по каналу А в предкамеру Б, далее по каналу В в крышке 1 цилиндра 2 в камеру Г рабочего хода, откуда посредством перепускного канала Д в стенке цилиндра в кольцевую аккумуляционную камеру Е в стакане 3 (см. рис. 2). В зависимости от положения ударника 4, опертого на хвостовик 5 рабочего инструмента, воздух поступает по каналу Ж в виде канала-лыски И на трубке 6 в камеру К холостого хода. Камера Е опорожняется в камеру Г посредством перепускного канала Д. Опорожнение камеры К осуществляется, в зависимости от положения ударника, после

закрытия им каналов Ж перепуска, через радиальный канал Л в трубке и его продолжению в виде продольного канала М в атмосферу. Под действием разности силовых импульсов давления воздуха со стороны камер Г и К ударник совершают возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента.

Согласно классификациям признаков-элементов [15, 24], запишем структуры формулы для синтезированных ПУМ, представленных на рис. 1 и 2.

Для ПУМ на рис. 1 получим

$$\frac{B2e256}{A2h2Ea6+A3i3Ca2}, \quad (1)$$

$$A1q1h2Ef\ 5Kf\ 5,$$

для ПУМ на рис. 2

$$\frac{B2e256}{A2h2Ea6+A3i3Ca2}, \quad (2)$$

$$A1q1h2Ef\ 5Kf\ 5.$$

В формулах (1) и (2) различия сочетаний признаков-элементов не обнаружено, и оба синтезированных ПУМ являются аналогичными. Однако отметим, что каналы перепуска Е5 у обоих ПУМ различны по исполнению. В техническом решении по рис. 2 выполнение канала в виде паза или лыски предпочтительнее круглого канала по технологическому признаку, а следовательно, описание (1) и (2) не достаточно информативны.

Запишем формулы (1) и (2) с учетом информации о признаках-элементах, изложенных в таблице, только для комбинации признаков-элементов (Е/5), считая, что остальные признаки-элементы для средств впуска С и выпуска К одинаковы, что видно из рис. 1 и 2.

Предположим, что влияние средств С и К на рабочий процесс ПУМ будет одинаковым. С учетом отмеченного запишем

для (1)

$$5E*1*c*e*f*g*, \quad (1')$$

для (2): канал-паз

$$5E*1*n*,$$

для (2): канал-лыска

$$5E*1*u*. \quad (2')$$

При сравнении результатов для (1') и (2') очевидно принятие варианта (2) с каналом-лыской ( $u^*$ ), поскольку канал-паз ( $n^*$ ) содержит больше концентрированных напряжений, нежели канал-лыска. Кроме отмеченного, при равных поперечных сечениях признак-элемент ( $u^*$ ) позволяет увеличить сечение канала выпуска, обеспечив полный выпуск отработавшего воздуха из камеры холостого хода. Это снизит противодавление и торможение ударника в камере холостого хода в предударный период.

Отметим, что при большем количестве сравниваемых ПУМ при опускании одинаковых комбинаций признаков-элементов возникает необходимость их группирования. Для сравнений выбирается предпочтительная комбинация в каждой группе, из которых выделяется наиболее предпочтительная. Соединяя ее с ранее опущенными комбинациями, получаем структурную

схему ПУМ с набором предпочтительных признаков-элементов и обоснованное принятие инженерного решения.

Аналогичный выбор предпочтительных комбинаций признаков-элементов производится посредством динамических и конструктивных признаков, отмеченных в приведенной таблице по  $D^*-R^*$  с учетом [15, 24].

**Выводы.** 1. Предложена классификация дополнительных уточняющих конструктивных признаков-элементов трубы для управления процессами впуска и выпуска воздуха в ПУМ.

2. Формализованная запись устройств ПУМ позволяет определить различия в конструкциях, анализировать и синтезировать новые технические решения с предпочтительными признаками-элементами.

3. Метод последовательного исключения одинаковых признаков-элементов (символов) при анализе ПУМ дает возможность выбрать на конечном этапе исключения рассматриваемых вариантов лучшее техническое решение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вариль М.А. Note sur les trappeurs pneumatiques // Revnemechaning. 1907. Jan. T. 20. P. 5–20; 1907. Nov. T. 21. P. 433–458.
2. Щепанский Ф.А. Принцип распределения сжатого воздуха в пневматических ударных машинах-орудиях // Русско-германский вестник науки и техники. 1933. № 2. С. 35–44.
3. Арнольд Л.В. Строительные пневматические инструменты и компрессоры. Л.; М.: НКТП – ОНТИ, 1936. 343 с.
4. Кельдюшев В.А. Пневматика. Л.; М.: НКТП – ОНТИ, 1938. 212 с.
5. Родионов Г.В. Машины ударного действия: краткий исторический обзор // Машины ударного действия. Новосибирск: Кн. изд-во, 1953. С. 3–52.
6. Родионов Г.В. О классификации машин ударного действия: в порядке обсуждения // Машины ударного действия. Новосибирск: Кн. изд-во, 1953. С. 53–73.
7. Кусницин Г.И. Исследование воздухораспределительных устройств пневматических машин ударного действия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1959. 20 с.
8. Кусницин Г.И., Зеленецкий С.Б., Доброборский С.И., Гринцер С.А., Кивман А.М., Кассациер И.С. Пневматические ручные машины: справ. Л.: Машиностроение, 1968. 376 с.
9. Суднишников Б.В., Есин Н.Н. Воздухораспределительные устройства пневматических машин ударного действия. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1965. 47 с.
10. Башлыков Ю.М. Экспериментальное исследование кинематики и динамики клапанных воздухораспределительных устройств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1975. 22 с.
11. Абраменков Э.А., Петреев А.М., Клушкин Н.А., Корчаков В.Ф. 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. Основные признаки дроссельных пневматических механизмов и их развитие // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1979. № 8. С. 109–114.
13. 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.

14. А браменков 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. А браменков Э.А., А браменков Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1993. 430 с.
16. А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Корчаков В.Ф., Малышев С.А. Пневматический ударный механизм с вариантами выпуска отработавшего воздуха // Повышение эффективности средств и методов механизации строительства. Ручные машины ударного действия: сб. науч. тр. Новосибирск: НГАС, 1996. С. 16–28.
17. А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Корчаков В.Ф., Малышев С.А. Пневматический ударный механизм с вариантами впуска подвижной трубкой // Повышение эффективности средств и методов механизации строительства. Ручные машины ударного действия: сб. науч. тр. Новосибирск: НГАС, 1996. С. 7–16.
18. А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Виговская Т.Ю., Малышев С.А., Шабанов Р.Ш. Дополнения к классификации признаков пневматических механизмов ударного действия и их анализ // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1997. № 11. С. 109–119.
19. А браменков Э.А., А браменков Д.Э., А ньшин В.В., Корчаков В.Ф., Малышев С.А., Серохвостов С.А. Варианты конструктивных решений средств запуска пневмоударного механизма // Труды НГАСУ. Новосибирск: НГАСУ, 1998. Т. 1, № 2. С. 97–107.
20. А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Гаршин С.В., Кутумов А.А., Малышева Ю.Э., Садбаков К.Е. Средства запуска, выпуска и резервирования в дроссельном пневматическом механизме машины ударного действия // Актуальные проблемы современности: междунар. сб. науч. тр. Балашак; Баспа; Караганда; 2004. Вып. 2. С. 129–134.
21. Кутумов А.А., А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Ладнов В.Э. Классификация признаков трубы пневматического ударного механизма // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 3. С. 91–94.
22. А браменков Д.Э., А браменков Э.А., Грузин А.В., Крутиков Е.И., Малышева Ю.Э., Мельникова А.С. Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухоподводящей трубкой и их физико-математическое описание // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 87–96.
23. А браменков Д.Э., А браменков Э.А. Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухоподающей управляемой трубкой и их физико-математическое описание // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 71–81.
24. Кутумов А.А., А браменков Д.Э., А браменков Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: моногр. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
25. А.с. 247179 СССР, МКИ Е21C37/24. Пневматический молоток / Н.А. Клушин, Э.А. Абраменков, Д.Г. Суворов, В.М. Бирюков; заявл. 18.05.66; опубл. 04.08.69, Бюл. № 22.
26. А.с. 1285147 СССР. МКИ Е21C37/24. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, Л.Л. Лысенко; заявл. 10.08.84; опубл. 23.01.87, Бюл. № 23.

**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 30.03.16

**Malysheva Yuliya Eduardovna**, Lead. Engineer

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

**Abramenkov Dmitry Eduardovich**, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Dedov Aleksey 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 CRITERIA-THE ELEMENTS OF THE PNEUMATIC IMPACT MECHANISMS WITH TUBULAR DISTRIBUTION**

We consider the analysis of classifications and their ability to create new constructive solutions example of the use of a tubular air inlet and the air outlet.

**К e y w o r d s:** air inlet, air outlet, air distribution, a pipe, a sign element, the impactor.

### **REFERENCES**

1. Baril M.A. Note sur les trappeurs pneumatiques. Revnemechaning. 1907. Jan. T. 20, P. 5–20; 1907. Nov. T. 21. Pp. 433–458.
2. Schepanskiy F.A. Printsip raspredeleniya szhatogo vozdukh v pnevmaticheskikh udarnykh mashinakh-orudiyakh [The Principle of distribution of compressed air in pneumatic impact machines-guns]. Russko-germanskiy vestnik nauki i tekhniki [Russian-German journal of science and technology]. 1933. No. 2. Pp. 35–44. (in Russia)
3. Arnol'd L.V. Stroitel'nye pnevmaticheskie instrumenty i kompressory [Construction pneumatic tools and compressors]. Leningrad, Moscow, NKTP – ONTI, 1936. 343 p. (in Russia)
4. Keldyushhev V.A. Pnevmatika [Pneumatics]. Leningrad, Moscow, NKTP – ONTI, 1938. 212 p. (in Russia)
5. Rodionov G.V. Mashiny udarnogo deystviya: kratkiy istoricheskiy obzor [Puncher: a brief historical review]. Mashiny udarnogo deystviya [Puncher]. Novosibirsk, 1953. Pp. 3–52. (in Russia)
6. Rodionov G.V. O klassifikatsii mashin udarnogo deystviya: v poryadke obsuzhdeniya [On the classification of impact machines: discussion]. Mashiny udarnogo deystviya [Puncher]. Novosibirsk, 1953. Pp. 53–73. (in Russia)
7. Kusnitsyn G.I. Issledovanie vozdukhoraspredelitel'nykh ustroystv pnevmaticheskikh mashin udarnogo deystviya [Investigation of air distribution devices pneumatic machines percussion]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [author. dis...candidate. tech. Sciences]. Leningrad, 1959. 20 p. (in Russia)
8. Kusnitsyn G.I., Zelenetskiy S.B., Dobroborskij S.I. et al. Pnevmaticheskie ruchnye mashiny: spravochnik [Pneumatic hand machines: Guide]. Leningrad, Mashinostroenie, 1968. 376 p. (in Russia)
9. Sudnishnikov B.V., Esin N.N. Vozdukhoraspredelitel'nye ustroystva pnevmaticheskikh mashin udarnogo deystviya [Air distributing device for pneumatic machines percussion ]. Novosibirsk: IGD SO AN USSR, 1965. 47 p. (in Russia)

10. B a s h l y k o v Yu.M. Eksperimental'noe issledovanie kinematiki i dinamiki klapannykh vozdukhораспределительных устройств [Experimental study of the kinematics and dynamics of valve air distribution devices]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [author. dis. ... candidate. tech. sciences]. Tomsk, 1975. 22 p. (in Russia)
11. A b r a m e n k o v E.A., P e t r e e v A.M., K l u s h i n N.A., K o r c h a k o v V.F. Printsipl'nye skhemy i osnovnye priznaki besklapannykh pnevmoudarnykh mekhanizmov [Concept and main features of valveless pneumatic percussion mechanisms]. Ruchnye pnevmaticheskie mashiny udarnogo deystviya s ponizhennoy vibratsiey: sb. nauch. tr. IGD SO AN SSSR [Manual pneumatic percussion machine with reduced vibration]. Novosibirsk, 1974. Pp. 11–22. (in Russia)
12. A b r a m e n k o v 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)
13. A b r a m e n k o v E.A., K o r c h a k o v 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 SSSR [Manual pneumatic puncher]. Novosibirsk, 1982. Pp. 50–57. (in Russia)
14. A b r a m e n k o v E.A., T i m o f e e v 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. A b r a m e n k o v E.A., A b r a m e n k o v D.E. Pnevmaticheskie mekhanizmy mashin udarnogo deystviya: sprav. posobie [Pneumatic mechanisms of impact machines: Handbook]. Novosibirsk, 1993. 430 p. (in Russia)
16. A b r a m e n k o v D.E., A b r a m e n k o v E.A., K o r c h a k o v V.F., M a l y - s h e v S.A. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm s variantami vypuska otrabotavshego vozdukh [Pneumatic hammer mechanism with options for exhaust air]. Povyshenie effektivnosti sredstv i metodov mekhanizatsii stroitel'stva. Ruchnye mashiny udarnogo deystviya: sb. nauch. tr. [Improving the efficiency of the means and methods of mechanization of construction. Manual puncher: Collection of scientific papers]. Novosibirsk, 1996. Pp. 16–28. (in Russia)
17. A b r a m e n k o v D.E., A b r a m e n k o v E.A., K o r c h a k o v V.F., M a l y - s h e v S.A. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm s variantami vpuska podvizhnoy trubkoy [Pneumatic hammer mechanism with options of a movable intake tube]. Povyshenie effektivnosti sredstv i metodov mekhanizatsii stroitel'stva. Ruchnye mashiny udarnogo deystviya: sb. nauch. tr. [Improving the efficiency of the means and methods of mechanization of construction. Manual puncher: Collection of scientific papers]. Novosibirsk, 1996. Pp. 7–16. (in Russia)
18. A b r a m e n k o v D.E., A b r a m e n k o v E.A., V i g o v s k a y a T.Yu. et al. Dopolneniya k klassifikatsii priznakov pnevmaticheskikh mekhanizmov udarnogo deystviya i ikh analiz [Additions to the classification of the signs of the pneumatic percussion mechanisms and their analysis]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1997. No. 11. Pp. 109–119. (in Russia)
19. A b r a m e n k o v E.A., A b r a m e n k o v D.E., A n ' s h i n V.V. et al. Varianty konstruktivnykh resheniy sredstv zapuska pnevmoudarnogo mekhanizma [Variants of constructive solutions in the launching of the pneumatic impact mechanism]. Trudy NGASU. Novosibirsk, 1998. T. 1. No. 2. Pp. 97–107. (in Russia)

20. Abramenchikov D.E., Abramenchikov E.A., Garshin S.V. et al. Sredstva zapuska, vpuska i rezervirovaniya v drossel'nom pnevmaticheskem mekhanizme mashiny udarnogo deystviya [Launcher, intake and redundancy in throttle mechanism pneumatic puncher]. Aktual'nye problemy sovremennosti: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov [Actual problems of modernity. International collection of scientific works]. Balashak, Baspa, Karaganda, 2004. Vol. 2. Pp. 129–134. (in Russia)
  21. Kutumov A.A., Abramenchikov D.E., Abramenchikov E.A., Ladvonov V.E. Klassifikatsiya priznakov trubki pnevmaticheskogo udarnogo mekhanizma [Classification of signs tube pneumatic impact mechanism housing]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2008. No. 3. Pp. 91–94. (in Russia)
  22. Abramenchikov D.E., Abramenchikov E.A., Gruzin A.V. et al. Printsipial'nye skhemy besklapannykh pnevmaticheskikh udarnykh mekhanizmov s vozdukhopodvodyashchey trubkoj i ikh fiziko-matematicheskoe opisanie [Schematic of valveless pneumatic mechanisms with aerating tubes and their physical and mathematical description]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 5. Pp. 87–96. (in Russia)
  23. Abramenchikov D.E., Abramenchikov E.A. Printsipial'nye skhemy besklapannykh pnevmaticheskikh udarnykh mekhanizmov s vozdukhopodayushchey upravlyayushchey trubkoj i ikh fiziko-matematicheskoe opisanie [Schematic diagrams of the valveless pneumatic hammer with air supply mechanisms the administering tube and their physical and mathematical description]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 10. Pp. 71–81. (in Russia)
  24. Kutumov A.A., Abramenchikov D.E., Abramenchikov E.A. Navesnye pnevmaticheskie moloty dlya razrabotki merzlykh gruntov: monografiya [Mounted pneumatic hammers for the development of frozen soils. Monograph]. Novosibirsk, 2008. 376 p. (in Russia)
  25. A.s. 247179 the SSSR, MKI E21C37/24. Pnevmaticheskiy molotok [Pneumatic hammer] / N.A. Klushin, E.A. Abramenchikov, D.G. Suvorov, V.M. Biryukov; zayavl. 18.05./66; opubl. 04.08.69, Bull. No. 22. (in Russia)
  26. A.s. 1285147 SSSR, MKI E21C37/24. Pnevmaticheskiy molotok s drossel'nym vozdykhораспределением [Pneumatic hammer with throttle distribution]. E.A. Abramenchikov, A.G. Bogachenkov, L.L. Lysenko; zayavl. 10.08.84; opubl. 23.01.87, Bull. No. 23. (in Russia)
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 726.1 (510)

ЧЖАН ГУАНЬИН

### ОПЫТ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСЕДОК – ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ ДРЕВНЕГО КИТАЯ

Работа посвящена изучению возможности применения новейшей технологии информационного моделирования зданий (BIM) для воссоздания архитектурных и исторических памятников Древнего Китая. Для этого была создана библиотека элементов системы доугун, с помощью которых восстановлена и смоделирована утраченная деревянная конструкция беседки из монастыря Хуайшэнсы.

Ключевые слова: памятник архитектуры, доугун, музей под открытым небом, информационное моделирование, BIM, беседка, Древний Китай.

Технология информационного моделирования зданий (BIM) сегодня активно внедряется в мире во всех областях проектно-строительной деятельности [1]. Создание информационной модели можно применять и к памятникам архитектуры, получая, таким образом, как новый способ фиксации этих сооружений, так и средство для хранения и анализа информации, что особенно важно при мониторинге состояния памятников архитектуры [2]. Информационное моделирование также позволяет работать с памятниками, которые частично или полностью утрачены, делая их доступными для исследования и представления в качестве экспонатов виртуальных музеев [3].

Огромное поле для применения BIM представляют памятники архитектуры Древнего Китая. В частности, объектом проведенного и описанного в этой статье исследования стала беседка в монастыре Хуайшэнсы, которая была построена в эпоху династии Тан (618–907). Эта беседка первоначально была деревянной, в начале династии Цин (1644–1912) ее реконструировали, сохранив стиль эпохи Тан, но в процессе одной из последовавших затем «переделок» (предположительно 1949 г.) деревянные элементы заменили на железобетонные, поэтому первозданная конструктивная часть беседки полностью утрачена. Целью работы стала попытка виртуального восстановления первоначального деревянного каркаса объекта, которая в будущем может привести и к его физическому воссозданию.

Для Древнего Китая беседки являются многочисленными и характерными сооружениями архитектуры, поскольку в течение многих веков были составными частями больших инфраструктурных проектов. По велению императоров они размещались с определенным интервалом вдоль основных дорог

для возможного отдыха путников, таким образом поддерживая коммуникации внутри государства. Беседки строили из дерева, так что до нас их дошло очень мало. Выбранной беседке повезло – она находилась внутри монастыря Хуайшэнсы, одного из старейших в мире исламских монастырей и одного из четырех древнейших монастырей Китая, поэтому была под постоянным вниманием (рис. 1). И виртуальное восстановление ее первоначального облика стало важной историко-архитектурной задачей.



Рис. 1. Беседка в монастыре Хуайшэнсы – современный вид

В создании любой информационной модели памятника архитектуры можно выделить четыре основных этапа:

- 1) сбор информации о памятнике;
- 2) разработка общей схемы моделирования;
- 3) создание необходимых библиотечных элементов;
- 4) итоговое моделирование.

На первом из этих этапов была проведена работа по восстановлению использовавшейся ранее в этой беседке системы кронштейнов доугун, обеспечивающих связь вертикальных колонн с несущими горизонтальными элементами (до наших дней они не дошли, так как при реконструкции «превратились» в железобетон). Надо отметить, что из-за отсутствия исторических документов некоторые узлы с полной достоверностью восстановить так и не удалось, поэтому в модели они представлены в нашем современном (гипотетическом) понимании конструктивной целесообразности, полученном на основе исследования системы доугун. Дело в том, что система доугун за все время существования беседки развивалась и совершенствовалась. Мы не можем сказать, какие элементы использовались во время строительства в эпоху Тан, а какие были заменены в последующих реконструкциях, и были ли они заменены вообще (рис. 2).

Аналогично были воссозданы и многие другие элементы беседки, но с ними никакой неоднозначности не возникало. Для простоты и ясности

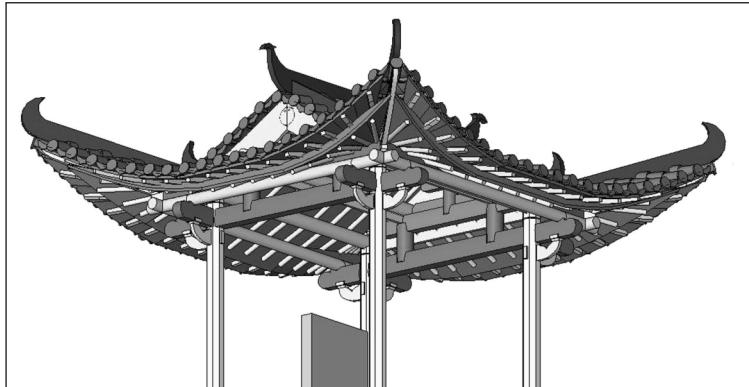


Рис. 2. Общий вид модели беседки, выполненной в программе Autodesk Revit

работы общая схема моделирования повторяла последовательность возведения беседки, так что никаких проблем здесь не было. Кроме одной – надо было создать библиотечные элементы системы доугун, которые, по нашему мнению, использовались в этом строительстве.

Для основного моделирования и создания библиотечных элементов была выбрана программа Autodesk Revit, уже хорошо зарекомендовавшая себя при воссоздании памятников архитектуры и исторических объектов [4–10]. Причин для такого решения было две:

1) хорошие возможности программы по информационному моделированию (сложным геометрическим построениям и наполнению элементов сопутствующей информацией);

2) желание сделать библиотеку элементов универсальной, допускающей использование в других программах информационного моделирования.

Универсальным и специально предназначенным для передачи информации между различными BIM-программами средством является формат файлов IFC. Но современные BIM-программы напрямую формат IFC не

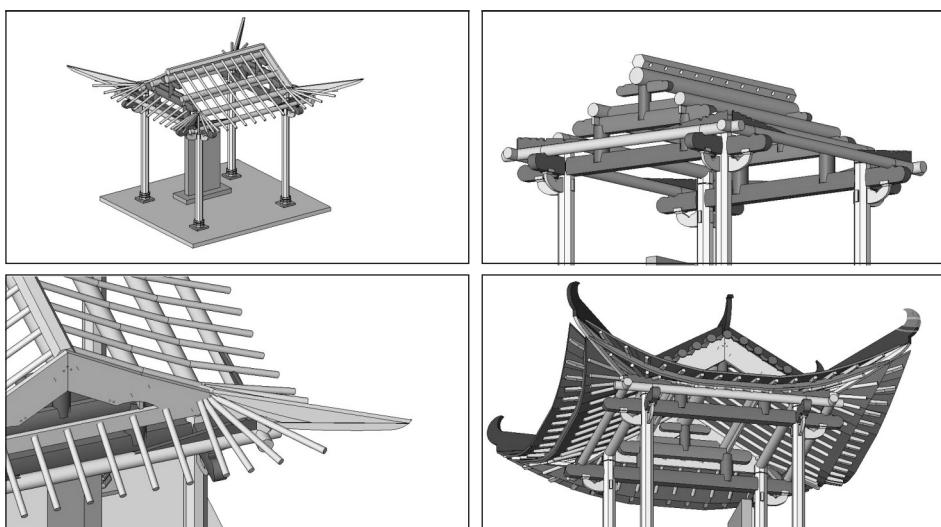


Рис. 3. Этапы итогового моделирования беседки

редактируют, поэтому было решено создавать элементы в формате RFA программы Autodesk Revit для семейств элементов, а затем для возможного использования в других программах экспортировать библиотечные элементы в формат IFC. Кроме того, форматы файлов Autodesk Revit полностью совместимы (без использования IFC) с распространенной BIM-программой Bentley AECOsim Building Designer, так что основная работа в программе Autodesk Revit была вполне оправданной.

Создание библиотечных элементов требовало полного понимания взаимодействия элементов системы доугун, поэтому этапы моделирования 1 и 3 проходили практически одновременно: трехмерное моделирование помогало понять, какие элементы системы доугун могли использоваться в конструкции беседки, а каждый успех в прочтении первоисточников добавлял осмысления в моделирование. В результате была создана библиотека элементов системы доугун, позволившая полностью смоделировать беседку из монастыря Хуайшэнсы. В дальнейшем эта модель стала своеобразным электронным паспортом объекта и может послужить его физическому воссозданию в первоначальном виде, а библиотека явилась основой для создания всеобъемлющего набора компьютерных элементов системы доугун.

**Выводы.** Применение технологии BIM к памятникам архитектуры позволяет создавать:

- информационные модели памятников архитектуры Древнего Китая для их компьютерной паспортизации (фиксации), исследования, реставрации и обслуживания при эксплуатации;
- технологические условия для «возвращения» системы доугун в современное строительство, поскольку делает элементную базу доступной для действующих систем автоматизации проектирования.

Она может послужить основой для создания библиотек элементов подобных систем, применявшихся в памятниках архитектуры Японии, Кореи и других стран буддистского востока.

*Автор выражает глубокую благодарность В.В. Талапову за руководство работой, а также компании Autodesk за бесплатно предоставленное программное обеспечение.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y: Wiley, 2011. 626 р.
2. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК-пресс, 2011. 391 с.
3. Талапов В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий. М.: ДМК-пресс, 2015. 410 с.
4. Козлова Т.И., Талапов В.В. Опыт информационного моделирования памятников архитектуры // Международный электронный научно-образовательный журнал «AMIT» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2009/3kvert09/Talapov/Article.php>
5. Козлова Т.И. Информационная модель недвижимого объекта культурного наследия как новый инструмент работы в музеевикационной практике // Вестн. Том. гос. ун-та. История. 2013. № 3(23). С. 33–37.

6. Аникеева С.О. Об опыте использования технологии ВИМ для музеефикации деревянных памятников архитектуры // Вестн. ТГУ. Культурология и искусствоведение. 2014. № 1 (13). С. 31–36.
7. Чжан Гуаньин. Информационное моделирование памятника архитектуры – здания бывшего консульства СССР в Урумчи (КНР) // Вестн. ТГУ. 2013. № 371. С. 70–71.
8. Талапов В.В. Информационная модель здания – опыт архитектурного применения // Международный электронный научно-образовательный журнал «AMIT» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/4kvart08/Talapov/article.php>
9. Jernigan F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury, 4 Site Press, 2008. 198 p.
10. Krygiel E., Niec B. Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling. N.Y., Wiley, 2008. 310 p.

**Гуаньин Чжан**, асп.; E-mail: clava19890602@qq.com  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 18.03.16

**Guanying Zhang**, Post-graduate Student; E-mail: clava19890602@qq.com  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### **EXPERIENCE OF INFORMATION MODELING GAZEBO – MONUMENTS OF ARCHITECTURE OF ANCIENT CHINA**

The article is devoted to investigate the possibility of applying the latest technology of building information modeling (BIM) for the reconstruction of architectural and Historical monuments of Ancient China. This has established a library of system elements dougun, which was restored and simulated lost wood design gazebo from the monastery of Huachansu.

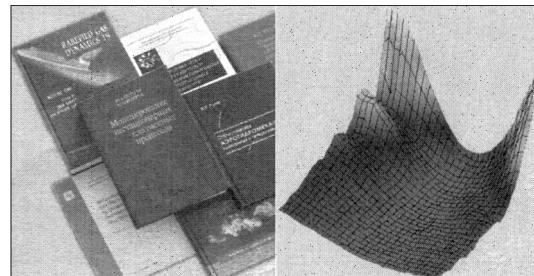
**Keywords:** architectural monument, dougong, open air museum, information modeling, BIM, gazebo, Ancient China.

### **REFERENCES**

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y., Wiley, 2011. 626 p.
2. Talapov V.V. Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovaniye zdaniy [Basic BIM: Introduction into building informational modeling]. Moscow, 2011. 391 p. (in Russia)
3. Talapov V.V. Tekhnologiya BIM: sut' i osnovy vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [BIM technology: the essence and the basics of implementing building information modeling]. Moscow, 2015. 410 p. (in Russia)
4. Kozlova T.I., Talapov V.V. Opyt informatsionnogo modelirovaniya pamyatnikov arkhitektury [The experiment of informational modeling of architectural monuments]. Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2009/3kvart09/Talapov/Article.php> (in Russia)
5. Kozlova T.I. Informatsionnaya model' nedvizhimogo ob'ekta kul'turnogo naslediya kak novyy instrument raboty v muzeefikatsionnoy praktike [The information model of the real object of cultural heritage as a new tool works in practice museification]. Vestnik TGU. Istorya [Bulletin of the Tomsk State University. History]. 2013. No. 3(23). Pp. 33–37. (in Russia)

6. A n i k e e v a S.O. Ob opyte ispol'zovaniya tekhnologii BIM dlya muzeefikatsii derevyannykh pamyatnikov arkhitektury [Experience in the use of BIM technology for museums of wooden architecture monuments]. Vestnik TGU. Kulturologiya i iskusstvovedenie [Bulletin of the Tomsk State University. Cultural studies and art history]. 2014. No. 1(13). Pp. 31–36. (in Russia)
  7. Z h a n g G u a n y i n g. Informatsionnoe modelirovaniye pamyatnika arkhitektury – zdaniya byvshego konsul'stva SSSR v Urumchi (KNR) [Information modeling monument of architecture – the building of the former Consulate of the USSR in Urumqi (China)]. Vestnik TGU [Bulletin of the Tomsk State University]. 2013. No. 371. Pp. 70–71. (in Russia)
  8. T a l a p o v V.V. Informatsionnaya model' zdaniya – opyt arkhitekturnogo primeneniya [A building information model – experience in architectural applications] // Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/4kvart08/Talapov/article.php> (in Russia)
  9. J e r n i g a n F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury, 4 Site Press, 2008. 198 p.
  10. K r y g i e l E., N i e c B. Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling. N.Y. Wiley, 2008. 310 p.
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 624.012.4

А.А. КОЯНКИН, В.М. МИТАСОВ

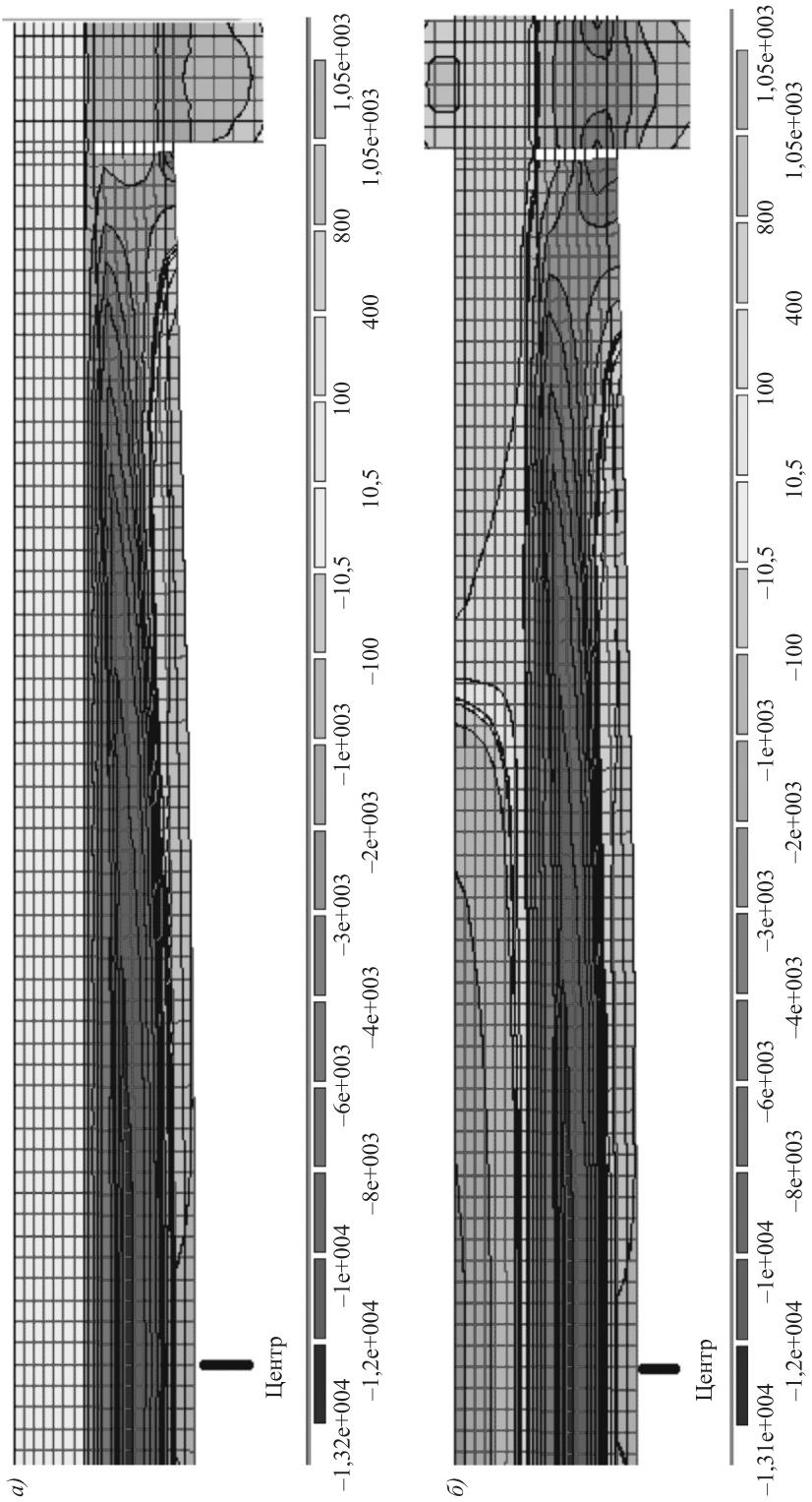
### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА МОНТАЖА

Выполнен расчет плоского сборно-монолитного железобетонного каркаса с учетом генетической нелинейности, т. е. с учетом изменения напряженно-деформированного состояния конструкций в процессе монтажа, а также проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными расчета аналогичного каркаса, но не учитывавшего процесс монтажа.

**Ключевые слова:** сборно-монолитные конструкции, генетическая нелинейность, физическая нелинейность, поэтапность монтажа, поэтапность приложения нагрузки.

Сборно-монолитное домостроение уверенными темпами развивается в современной России, чему способствует, в первую очередь, оптимальность самого конструктивного решения для применения его в климатических условиях нашей страны. В темп развитию строительства проводятся научные исследования, предлагаются методики моделирования и расчета таких зданий, которые позволяют более глубоко понять работу сборно-монолитных зданий под нагрузкой. Однако, несмотря на накопленный опыт проектирования и строительства таких зданий, существуют моменты, «нелюбимые» проектировщиками в силу трудоемкости их моделирования, а также трудности их понимания и осознания для грамотного учета в расчетной схеме. К таким факторам следует, пожалуй, отнести нелинейность деформирования конструкций, причем кроме физической и геометрической нелинейности, нужно отметить еще и генетическую, т.е. нелинейность деформирования конструкции в результате изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе монтажа. В работах [1–4] указана необходимость учета порядка монтажа строительных конструкций при выполнении расчета. При этом в приведенных примерах [1–4] в конструкциях здания получены существенные различия картин распределения усилий в зависимости от учета или неучета предыстории изменения НДС в процессе монтажа.

С целью определения влияния генетической нелинейности на НДС сборно-монолитных конструкций, авторами данной статьи были проведены



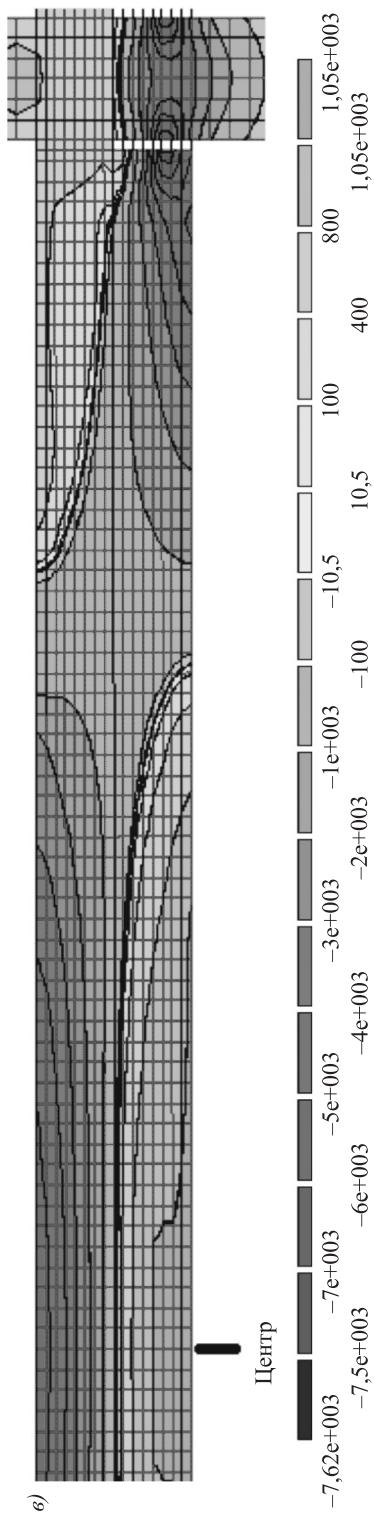


Рис. 1. Схема распределения нормальных напряжений в балке первого этажа  
а – модель М-1 (этап 4); б – модель М-2;  
а – модель М-1 (этап 10); б – модель М-2

численные расчеты плоской рамы, осуществленные как с учетом стадии монтажа каркаса (модель М-1), так и без ее учета (модель М-2). Расчетная схема плоской двухэтажной (высота этажа 3 м) двухпролетной (длина пролета 4,5 м) рамы выполнена из пластинчатых конечных элементов (КЭ) 241 (оболочка), которые моделировали бетон, и из стержневых КЭ 210 для арматуры. Применяемые КЭ позволяют исследовать физическую нелинейность работы материалов, при этом использовались заложенные в СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» трехлинейная диаграмма деформирования для бетона и двухлинейная диаграмма деформирования для арматуры. Особенности основания в данном примере не учитывались, и оно (основание) закладывалось в виде жесткой заделки.

Процесс монтажа рамы сборно-монолитного здания в примере включал следующие этапы:

1. Задание вертикальных и горизонтальных (сборные части ригелей) несущих элементов нижнего этажа с приложением нагрузок от собственного веса. Сопряжение сборных частей ригелей с колоннами шарнирное (моделируется посредством наложения шарнирной связи, т.е. объединения перемещений по  $X$  и  $Y$ ) с заполнением зазоров цементно-песчаным раствором (моделируется путем применения специального КЭ с наложением соответствующей жесткости только на сжатие);

2. Выполнение предварительного напряжения (постнапряжение) сборных ригелей нижнего этажа посредством приложения соответствующей со средоточенной нагрузки на крайние колонны в месте установки нижней арматуры;

3. Приложение нагрузки от собственного веса сборно-монолитных плит перекрытия, а также от веса монолитного бетона перекрытия;

4. Изменение жесткости ригеля за счет набора монолитным бетоном прочности. Вводится, за счет использования процессора МОНТАЖ+ в ПК Лира, монолитная часть ригеля;

5–8. Повторение алгоритма 1–4 для верхнего этажа;

9–10. Приложение нагрузки от конструкций пола, перегородок, ненесущих ограждающих стен, а также эксплуатационной нагрузки.

Численные исследования показали, что даже визуальный предварительный анализ полученных картин напряжений и деформаций отмечает качественные отличия в характере их распределения при расчете строительных конструкций сборно-монолитного здания с учетом и без учета процесса монтажа (рис. 1).

В результате детального анализа НДС установлено, что распределение напряжений в модели М-2 носит классический характер, свойственный жестко-зашемленному изгибаемому элементу. Максимальные сжимающие напряжения составляют 8,48 МПа и располагаются возле опор в нижней зоне ригелей (сборной части), в то время как в пролете в верхней зоне ригелей (монолитной части) сжатие достигает 5,17 МПа. Растворяющие напряжения имеют предельные значения 1,05 МПа в пролете нижней зоны ригелей (сборной части), свидетельствующие об образовании трещин в этой зоне.

Гораздо более сложное НДС в конструкциях оказывается в случае учета процесса монтажа (см. рис. 1), что связано с более поздним включением в работу монолитного железобетона. В итоге (см. рис. 1, а) в момент набора монолитным бетоном требуемой прочности (этап 4), но еще незагруженности его внешней нагрузкой, сборная часть ригеля уже испытывает существенные напряжения. Растворение нижней зоны в пролете в этот момент достигает предельного значения в 1,05 МПа, т.е. в пролете сборной части ригеля начинают образовываться нормальные трещины. Сжимающие напряжения верхней зоны в пролете составляют 13,91 МПа, что, однако, не превышает расчетного сопротивления бетона на сжатие 18,5 МПа. С момента установки сборной части ригеля и до начала набора монолитным бетоном прочности сборная часть ригеля представляет собой шарнирно опертую балку, но по мере набора монолитным бетоном прочности происходит постепенное ее «превращение» в жестко-зашемленный сборно-монолитный ригель. При достижении конструкцией ригеля эксплуатационной нагрузки (этапы 9, 10) начинается постепенное включение в работу монолитного бетона (рис. 1, б), что приводит к нарастанию в нем напряжений с одновременным незначительным снижением напряжений (до 13,77 МПа) в теле сборной части, несмотря на возрастающую нагрузку.

К моменту приложения полной эксплуатационной нагрузки (этап 10) монолитная часть ригеля на опоре испытывает растворяющие напряжения (см. рис. 1, б), достигающие 0,73 МПа, и сжимающие напряжения в пролете – 2,23 МПа. Растворяющие усилия в нижней зоне монолитной части ригеля в пролете не превышают 0,46 МПа. При этом верхняя сборная часть ригеля, которая сопрягается с растянутой зоной монолитной части, испытывает, по-прежнему, сжимающие усилия, значения которых уменьшаются по мере нагружения конструкции эксплуатационной нагрузкой. При сравнении конечных эпюров распределения напряжений в моделях М-1 и М-2 выявлены существенные расхождения в результатах.

Анализ эпюры продольных сил, возникающих в продольной арматуре сборно-монолитного ригеля, показывает, что распределение сил в продольной арматуре ригеля модели М-2 (рис. 2, в) происходит в соответствии с работой жесткозащемленного изгибающего элемента. Растягивающие усилия нижней продольной арматуры достигают 62,8 кН в пролете ригеля, а растяжение верхней продольной арматуры доходит до 156 кН на опоре ригеля.

Распределение усилий в продольной арматуре сборно-монолитного ригеля при его расчете с учетом процесса монтажа носит более сложный характер, аналогично ситуации с напряжениями в бетоне. При монтаже конструкции до этапа 4 включительно, т.е. до того момента пока нагруженной является только сборная часть ригеля, продольная арматура сборной части ригеля испытывает растягивающие усилия (максимальное значение 269 кН). После набора монолитным бетоном требуемой прочности и приложения эксплуатационной нагрузки (этап 10) растягивающие усилия в нижней продольной арматуре увеличиваются до 309 кН, а усилия в верхней продольной арматуре достигают 89 кН. Таким образом, фактическое завышение усилия в верхней продольной арматуре, при выполнении расчета без учета процесса монтажа, составляет 75 %, а недооценка усилия в нижней арматуре – 80 %.

Расчет строительных конструкций по прогибам без учета монтажа дает заниженные результаты, которые, в свою очередь, могут привести к неприятным последствиям на стадии эксплуатации. В частности, максимальная величина прогиба, полученная при выполнении расчета без учета монтажа, составила 3,22 мм, в то время как при расчете с учетом процесса монтажа – 53,1 мм. Прогиб сборной части ригеля в момент загружения ее монолитным бетоном и плитами перекрытия – 50,5 мм.

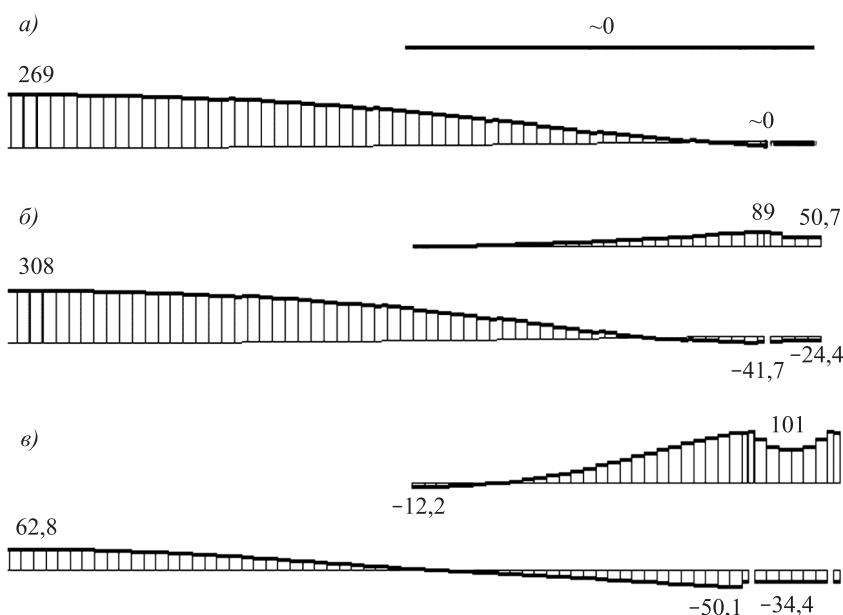


Рис. 2. Схема распределения продольных усилий в балке первого этажа  
а – модель М-1 (этап 4); б – модель М-1 (этап 10); в – модель М-2

**Выводы.** 1. Сборно-монолитный железобетон обладает важной, присущей только ему особенностью, которая заключается в его «разножесткой послойности», приводящей к сложному НДС конструкции в силу изменения жесткости сечения, а возможно, и расчетной схемы конструкции, по мере набора монолитным бетоном прочности, происходящего на фоне загруженной сборной части ригеля.

2. Для выполнения расчета сборно-монолитных конструкций с учетом процесса монтажа библиотеки ПК не имеют соответствующих стержневых и пластинчатых КЭ.

3. Неучет при расчете сборно-монолитных конструкций генетической нелинейности способен существенно исказить реальные усилия как значений, так и картины их распределения, привести к переармированию одних сечений и недоармированию других с соответствующими последствиями.

4. Определение величин прогибов сборно-монолитных конструкций без учета процесса монтажа отрицательно влияет на конечный результат, так как происходит существенное занижение их значений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. М.: Изд-во АСВ, 2014. 251 с.
2. Коянкин А.А., Митасов В.М. Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестн. МГСУ. 2015. № 9. С. 28–33.
3. Пат. 149440 RU, МПК E04B5/16. Сборно-монолитное железобетонное перекрытие / А.А. Коянкин, В.М. Митасов (RU). № 2014131676; заявл. 30.07.2014; опубл. 10.01.2015; Бюл. № 1.
4. Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лазнюк М.В., Юсипенко С.В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. Проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии. Киев: Факт, 2004. 106 с.

**Коянкин Александр Александрович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: KoyankinAA@mail.ru  
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета,  
г. Красноярск

**Митасов Валерий Михайлович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mitasovv@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 11.03.16

**Koyankin Alexandre Alexandrovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: KoyankinAA@mail.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Mitasov Valeriy Mikhaylovich**, DSc, Professor; E-mail: mitasovv@mail.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### ESTIMATION OF STAIN-STRESS STATE CAST-IN-PLACE AND PRECAST CONSTRUCTION CONSIDERING ERECTION PROCEDURE

A calculation of flat cast-in-place and precast reinforced concrete framing was carried out considering genetic nonlinearity, that is considering change of stain-stress condition

in the process of erection, and also comparative analyses of obtained result with analytic data of a similar framing, excluding the fact of the erection process, was performed.

**K e y w o r d s:** cast-in-place and precast construction, genetic nonlinearity, physical nonlinearity, erection phasing, loading phasing.

## REFERENCES

1. Perel'muter A.V. Besedy o stroitel'noy mekhanike [Construction mechanics discussions]. Moscow, Association of civil engineering HEI, 2014. 251 p. (in Russia)
  2. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Karkas sborno-monolitnogo zdaniya i osobennosti ego raboty na raznykh zhiznennykh tsiklakh [Cast-in-place and precast construction framing and specifics of its functioning at various live cycles]. Vestnik MGSU [News of MGSU]. 2015. No. 9. Pp. 28–33. (in Russia)
  3. Pat. 149440 RU, МПК E04B5/16. Sborno-monolitnoe zhelezobetonnoe perekrytie [Cast-in-place and precast construction concrete floor]. A.A. Koyankin, V.M. Mitasov (RU). – №. 2014131676; apl. 30.07.2014; publ. 10.01.2015; Bull. No. 1.
  4. Gorodetskiy A.S., Batrak L.G., Gorodetskiy D.A., Laznyuk M.V., Yusipenko S.V. Raschet i proektirovanie konstruktsiy vysotnykh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona. Problemy, opyt, vozmozhnye resheniya i rekomendatsii, kompyuternye modeli, informatsionnye tekhnologii [Calculation and engineering of cast reinforced concrete multistorey buildings. Problems, experience, possible resolutions and recommendations, computer models, information technologies]. Kiev, Fact, 2004. 106 p. (in Russia)
-

УДК 72.01.001.572

В.В. ТАЛАПОВ

## О НЕКОТОРЫХ ПРИНЦИПАХ, ЛЕЖАЩИХ В ОСНОВЕ BIM

Работа посвящена анализу основных принципов, лежащих в основе технологии информационного моделирования зданий BIM и вытекающих из общей теории моделирования. Приведены особенности применения этих принципов для объектов строительства: единая модель, прагматизм и согласованное моделирование. Рассмотрены различия между технологией BIM и распространенной в машиностроении концепцией PLM.

**Ключевые слова:** теория моделирования, информационное моделирование, BIM, единая модель, принцип прагматизма, согласованное моделирование.

Технология BIM – это принципиально новый подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания, к управлению жизненным циклом объекта, включая его экономическую составляющую, к управлению окружающей нас рукотворной средой обитания [1, 2]. BIM – это то, что определит и уже определяет направление развития мировой проектно-строительной отрасли на несколько десятилетий вперед. Но подход к работе со строительными объектами через информационную модель имеет свои основополагающие принципы и правила, которые необходимо четко представлять и которыми необходимо руководствоваться при дальнейшей успешной работе.

Достаточно подробный анализ различных подходов к определению информационного моделирования содержится в книге одного из основоположников BIM Чарльза Истмэна с коллегами [1].

Здесь мы приведем одно из наиболее употребляемых определений BIM. *Информационное моделирование зданий* (от английского Building Informational Modeling, сокращенно BIM) – это *процесс*, в результате которого формируется *информационная модель здания* (от английского Building Informational Model, также получившая аббревиатуру BIM) [3].

*Информационная модель здания* (BIM) – это предназначенная для решения конкретных задач и пригодная для компьютерной обработки структурированная информация о проектируемом, существующем или даже утраченном строительном объекте, при этом:

- 1) нужным образом скоординированная, согласованная и взаимосвязанная;
- 2) имеющая геометрическую привязку;
- 3) пригодная для расчетов и количественного анализа;
- 4) допускающая необходимые обновления [3].

Отметим, что такое определение в наибольшей степени соответствует сегодняшнему подходу к концепции BIM многих разработчиков компьютерных средств проектирования и работы со строительными объектами.

Таким образом, согласно определению, на каждой стадии процесса информационного моделирования мы имеем некую результирующую информационную модель, которая отражает объем обработанной информации о здании. Из этого определения также следует, что исчерпывающей информационной модели здания не существует в принципе, поскольку мы всегда можем дополнить имеющуюся на какой-то момент времени модель новой информацией.

Процесс информационного моделирования, как всякое осуществляющее человеком действие, на каждом этапе решает поставленные перед его исполнителями задачи. А формируемая информационная модель здания каждый раз будет результатом решения этих задач.

Изучение вопросов моделирования – это предмет исследования *теории моделирования*, которая является составной частью *общей теории систем* [4–6]. В упомянутых теориях под *моделью* обычно понимается объект-заместитель для объекта-оригинала, обеспечивающий изучение определенных свойств последнего, а сама теория моделирования изучает средства и методы такого замещения. Конечно, при использовании BIM можно руководствоваться общими принципами и правилами из теории моделирования. Однако область применения BIM – объекты строительства, которые имеют определенную специфику. Поэтому разработка и использование технологий информационного моделирования зданий требует уточнения основополагающих принципов теории моделирования применительно к объектам строительства.

Среди основных особенностей информационного моделирования зданий необходимо выделить следующие, связанные со спецификой строительной деятельности:

1. Модель строительного объекта чаще всего создается тогда, когда самого сооружения еще нет. Например, в процессе проектирования, модель на определенное время фактически становится виртуальным объектом-оригиналом, но она является своеобразной копией настоящего здания, которое появится в будущем. Таким образом, на начальной (проектно-строительной) стадии информационная модель здания – это обязательный элемент, ведущий к построению самого здания, это основной результат рабочего процесса, а объектом-заместителем модель становится намного позже, когда здание уже построено. Если же говорить о памятниках архитектуры, то на момент моделирования их может уже не быть [7].

2. Строительно-технологические процессы и их моделирование могут быть весьма протяженны во времени. Например, период вывода АЭС из эксплуатации может длиться 70 лет. Поэтому вряд ли возможно говорить о модели как о некоем завершенном продукте, здесь на первое место выходят процесс и методика моделирования.

3. Специфика строительных объектов такова, что они довольно часто могут практически одновременно проектироваться, строиться и эксплуатироваться.

Последние две из перечисленных особенностей также хорошо объясняют, почему в строительстве не применимы в полной мере технологии, методики и программные средства, успешно отработанные в машинострое-

нии. В частности, они объясняют, почему BIM – это не PLM [8], хотя эти два подхода к проектированию, изготовлению и эксплуатации изделий имеют общую идеиную основу.

Теперь вернемся к теории моделирования. Она выделяет два подхода к синтезу итоговой модели: классический и системный.

*Классический подход* заключается в том, что изучаемый объект разделяется на подсистемы, которые самостоятельно моделируются, а затем суммируются в общую модель. Такой подход соответствует принципу «от простого к сложному» и хорошо применим для сравнительно простых моделей, в которых возможно разделение и взаимно независимое рассмотрение отдельных сторон функционирования объекта.

*Системный подход* предполагает начало общего моделирования на основе исходных данных и ограничений, накладываемых на систему сверху или появляющихся из возможностей ее реализации, а также вытекающих из основной цели ее функционирования. В совокупности это формулирует исходные требования к модели, на основании которых уже формируются общие виды подсистем и элементов и осуществляется их выбор на основе появляющихся критериев. Затем каждая подсистема может моделироваться отдельно, но уже в рамках синтезированной модели.

Подход к работе со зданиями через их информационное моделирование предполагает прежде всего *сбор, хранение и комплексную обработку* всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями, когда здание и все, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый комплекс.

Правильное определение этих взаимосвязей, а также точная классификация, хорошо продуманное и организованное структурирование, актуальность и достоверность используемых данных, удобные и эффективные инструменты доступа и работы с информацией (интерфейс управления данными), возможность передавать эту информацию или результаты ее анализа для дальнейшего использования во внешние системы – вот основные составляющие, характеризующие информационное моделирование зданий и определяющие его дальнейший успех.

Надо также отметить, что возрастающий объем технической работы, выполняемой компьютером при использовании BIM, носит теперь принципиально иной характер – человеку с таким все возрастающим объемом в условиях постоянно сокращающегося времени, выделяемого на проектирование, уже не справиться. Любой строитель со стажем может рассказать много случаев из своей практики, когда на стройплощадке долбят стены или переваривают воздуховоды, чтобы исправить ошибки проектировщиков, которые по разным разделам привыкли работать независимо друг от друга. Такие переделки, являющиеся результатом «классического подхода» без должной согласованности отдельных разделов проекта, имеют совершенно конкретную цену, даже при скромных подсчетах составляющую 5–10 % от итоговой стоимости объекта.

Такие проблемы, как и все вопросы, связанные с синтетическим осмыслением строительного объекта (расчеты нагрузок, спецификации, сметы,

изготовление конструкций, графики поставок материалов и строительства и т.п.), решает BIM. Таким образом, в современных условиях все возрастающей сложности строительных объектов системный подход является основным в реализации комплексного информационного моделирования. Применительно к BIM его можно сформулировать как принцип *единой информационной модели*, выполненной на основе *полной и согласованной* информации по объекту. Как это часто бывает на ранней стадии развития новых подходов в работе, вокруг принципа единой модели существует много домыслов и непониманий, основные из которых подробно рассмотрены в работе [9], но это не мешает принципу работать.

Теперь рассмотрим еще один фундаментальный элемент, лежащий в основе любого моделирования – *принцип прагматизма*, согласно которому каждый раз надо моделировать ровно столько, сколько требуется для решения поставленной задачи. Казалось бы, это самый простой принцип – не делать ничего лишнего. Более того, когда один человек работает над одним проектом, он подсознательно старается именно так и поступать. Но даже здесь появляются варианты исполнения.

Например, один человек может сразу взять пилу и пилить дрова, а другой, более опытный, сначала наточит пилу, а уже потом станет пилить, и в результате напилит больше. Применительно к BIM сказанное проявляется в том, что в первом случае можно сразу погрузиться в моделирование здания, создавая необходимые элементы по мере их «потребления», но есть также вариант сначала хорошо продумать процесс и создать многопараметрические библиотечные элементы, а уже потом с их помощью быстро «собрать» модель. То есть, говоря терминологией шахмат, в случае BIM «многоходовка» может оказаться гораздо эффективнее прямолинейной «одноходовки».

Подобная проблема проявляется в еще большей степени, когда над одним проектом работает много исполнителей, и она усиливается, когда возникает много центров управления или принятия решений. В частности, когда задача распределяется по смежникам. Тогда узкопонимаемый «прагматизм» одного участника процесса моделирования может вступать в противоречие с «прагматизмом» другого и в каких-то случаях даже достигать уровня «профессионального эгоизма». Но чаще всего причина противоречий среди исполнителей заключается в том, что одни узкие специалисты просто не видят (не знают) проблем, которые возникают у других узких специалистов, также работающих над общим проектом. В результате то, что кажется рациональным для решения частной задачи моделирования, для всего процесса может стать совершенно негодным и потребовать многочисленных переделок с потерей дополнительного времени и ресурсов.

Конечно, бороться с такими явлениями можно и нужно. Да и средство давно известно – единое управление моделированием, т. е. классический принцип единонаучия, и согласование методов (правил, объемов) моделирования между всеми исполнителями. Другими словами, принцип прагматизма в BIM приводит нас к пониманию необходимости единого (согласованного) подхода к работе над проектом, т.е. к принципу *согласованного моделирования*.

В качестве характерных признаков согласованного моделирования в рамках организации можно в первую очередь выделить:

1. Наличие у проекта BIM-менеджеров и BIM-координаторов, в функции которых как раз и входит согласование процесса моделирования. При этом они должны работать в тесном контакте с ГИПами и ГАПами, деятельность которых также должна тесно координироваться уже в рамках процесса проектирования.

2. Наличие общих правил по информационному моделированию. Эти правила естественно называть BIM-регламентом, хотя некоторые, следуя моде, называют их стандартами организации. Здесь важна суть – наработанные правила и спецификации существенно облегчают процесс информационного моделирования. Однако надо помнить, что чрезмерное регламентирование (забюрокрачивание) процесса BIM, попытки описать в инструкциях «все случаи жизни» могут только вредить делу [10].

3. Любой проект начинается с составления общего плана моделирования, уточнения структуры единой модели, требований по детализации, обмену информацией между исполнителями, распределением рабочих, управляющих и контрольных функций, определения способов проверки и устранения коллизий, конкретизации правил хранения информации и т.п. Другими словами, осуществляется конкретизация общих правил BIM-регламента для каждого нового проекта.

Таким образом, чем сложнее проект, тем «выше» уровень принятия решения о «прагматизме» тех или иных видов работ, которое затем «спускается» конкретным исполнителям. Но у всякой медали две стороны: часто возникает ситуация, когда какая-то информация из модели одним специалистам нужна, а другим нет. В этом случае освобождение от «лишней» информации – это также важный, но уже чисто технический вопрос, имеющий много вариантов решений.

Подведем итог вышеизложенного – в основе успешного использования технологии BIM обязательно должны лежать три принципа:

- единой модели;
- прагматизма;
- согласованного моделирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y.: Wiley, 2011. 626 р.
2. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК-пресс, 2011. 391 с.
3. Талапов В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий. М.: ДМК-пресс, 2015. 410 с.
4. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
5. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
6. Кельтон В. Имитационное моделирование. 3-е изд.; пер. с англ. СПб.: Питер, 2007. 847 с.
7. Талапов В.В. О некоторых закономерностях и особенностях информационного моделирования памятников архитектуры // Международный электронный

- научно-образовательный журнал «AMIT» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/talapov/abstract.php>
8. Левин Д.Я., Малюх В.Н., Ушаков Д.М. Энциклопедия PLM. Новосибирск: ЛЕДАС, 2008. 450 с.
  9. Талапов В.В. Технология BIM: единая модель и связанные с этим заблуждения // Технологии строительства. 2016. № 1–2 (111–112). С. 74–80.
  10. Кулкова С.О., Талапов В.В. Проблема формализации процессов и учет возраста организации // САПР и графика. 2015. № 11. С. 6–9.

**Талапов Владимир Васильевич**, канд. физ.-мат. наук, доц.;

E-mail: talapoff@yandex.ru

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 25.03.16

**Talapov Vladimir Vasil'evich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: : talapoff@yandex.ru  
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

## SOME OF THE PRINCIPLES UNDERLYING THE BIM

This paper analyzes the basic principles underlying the technology of BIM building information modeling and the resulting General theory of modelling. The features of the application of these principles for construction projects: a unified model, pragmatism, and consistent modeling. Also discusses the differences between BIM and technology common engineering concept of PLM.

**Key words:** theory modeling, information modeling, BIM, a single model, the principle of pragmatism, consistent modeling.

## REFERENCES

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y., Wiley, 2011. 626 p.
2. Talapov V.V. Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovaniye zdaniy [Basic BIM: Introduction into building informational modeling]. Moscow, 2011. 391 p. (in Russia)
3. Talapov V.V. Tekhnologiya BIM: sut' i osnovy vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [BIM technology: the essence and the basics of implementing building information modeling]. Moscow, 2015. 410 p. (in Russia)
4. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovaniye system [Modeling systems]. Moscow, 2001. 343 p. (in Russia)
5. Buslenko N.P. Modelirovaniye slozhnykh system [Modeling of complex systems]. Moscow, 1978. 400 p. (in Russia)
6. Kel'ton V. Imitatsionnoe modelirovaniye [Simulation. 3d ed., trans from Eng]. Saint-Petersburg, 2007. 847 p. (in Russia)
7. Talapov V.V. O nekotorykh zakonomernostyakh i osobennostyakh informatsionnogo modelirovaniya pamyatnikov arkhitektury [Some principles and features of information modeling of architectural monuments]. Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/talapov/abstract.php> (in Russia)
8. Levin D.Ya., Mal'yukh V.N., Ushakov D.M. Entsiklopediya PLM [The PLM encyclopedia]. Novosibirsk, 2008. 450 p. (in Russia)

9. Talapov V.V. Tekhnologiya BIM: edinaya model' i svyazannye s etim zabluzhdeniya [Technology BIM: a single model and related misconceptions]. Tekhnologii stroitel'stva [Construction technology]. 2016. No. 1–2 (111–112). Pp. 74–80. (in Russia)
10. Kulikova S.O., Talapov V.V. Problema formalizatsii protsessov i uchet vozrasta organizatsii [The problem of formalization of processes and the account of age]. SAPR i grafika [SAPR and Graphics]. 2015. No. 11. Pp. 6–9. (in Russia)

## **ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Элементы природного ландшафта и сооружения, непосредственно взаимодействующие с водными объектами, подвергаются постоянному воздействию различных факторов, которые приводят к их постепенному разрушению. К ним относятся:

- подъем уровня воды в период половодья;
- гидростатическое давление воды;
- повышение уровня грунтовых вод;
- размывы береговых откосов речным потоком;
- воздействие ветровых волн.

Наряду с существующей документацией (СП 39.13330. 2012 и СП 58.13330. 2012), рекомендующей применение следующих типов крепления: каменные (насыпные), бетонные монолитные, железобетонные сборные и монолитные; биологические. В нашей стране большое распространение получили такие берегоукрепительные сооружения откосного профиля, как габионные матрацы и бетонозаполняемые текстильные маты. Принципы проектирования, строительства и эксплуатации данных типов берегоукрепительных сооружений недостаточно полно отражены в нормативной документации. Одним из параметров, значительно влияющих на надежность и экономичность берегозащиты, является отметка верха крепления откоса, которая определяется величиной наката волны, зависящей от шероховатости откоса. Таким образом, исследования шероховатости новых типов конструкций берегоукрепления своевременны и актуальны.

Для оценки величины наката волны на различные современные типы конструкций берегоукрепления в Самарском государственном архитектурно-строительном университете в лаборатории кафедры природоохранительного и гидротехнического строительства были проведены модельные исследования новых типов конструкций – габионных матрацев и бетононаполняемых текстильных матов. При этом коэффициент шероховатости крепления оценивался путем определения разницы величины наката волн на различные конструкционные типы крепления в сравнении с моделью крепления откоса бетонными плитами, который был принят равным единице. Было установлено, что наличие металлической сетки поверх каменного крепления повышает коэффициент шероховатости поверхности берегоукрепительного сооружения по сравнению с поверхностью из каменной наброски. Применение же бетононаполняемых текстильных матов наоборот снижает коэффициент шероховатости по сравнению с поверхностью из бетонных плит.

Учет фактических значений коэффициентов шероховатости берегоукрепительных конструкций из габионных матрацев и бетононаполняемых текстильных матов повышает их экономическую эффективность за счет обеспечения возможности снижения отметки верха крепления откоса, следовательно, уменьшения объемов строительных работ.

В случае необходимости за консультацией можно обращаться к разработчикам.

**Разработчики: Бальзаников Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.;**

**Родионов Максим Владимирович, канд. техн. наук, доц.;**

**Малик-Пашаева Наталья Эрнестовна, магистрант**

443001, Самарская обл., г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194.

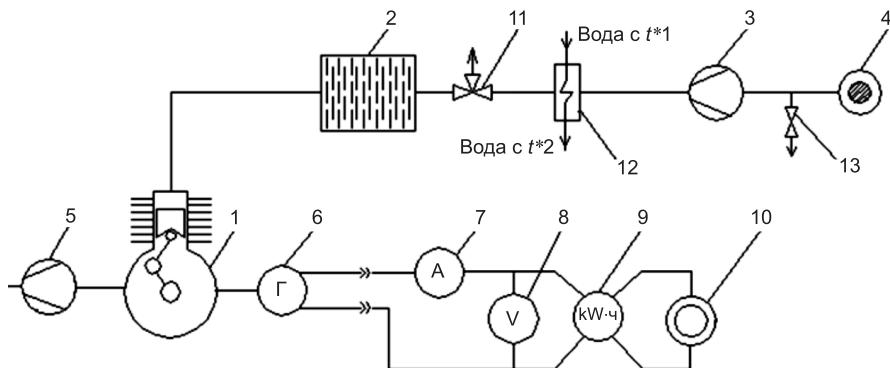
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: sgasu@samgasu.smr.ru

Телефон: +7(846) 242 17 84; 242 17 91; 221 74 44

## ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРИ МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В момент начала строительства малоэтажных зданий на территориях, предназначенных для индивидуального малоэтажного жилого строительства, передко полностью отсутствует инфраструктура. Застройщики применяют для энергоснабжения различные варианты микроТЭС (бензогенераторы) на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) карбюраторного типа с воздушным охлаждением. В Новосибирском государственном техническом университете произведены исследования с целью повышения эффективности микроТЭС за счет применения когенерации, т. е. дополнительной выработки теплоты.



Принципиальная схема установки

1 — двигатель внутреннего сгорания; 2 — теплообменник; 3 — расходомер уходящих газов; 4 — дымовая труба; 5 — расходомер топлива; 6 — генератор; 7 — амперметр; 8 — вольтметр; 9 — счетчик электрической энергии; 10 — нагрузка; 11 — трехходовой кран; 12 — кожухо-трубчатый газоводяной теплообменник; 13 — слив конденсата

На базе ДВС с воздушным охлаждением (Хитачи-2400) мощностью 2,4 кВт была опробована новая теплоэнергетическая установка (ТЭУ), позволяющая использовать теплоту от контура охлаждения двигателя (рисунок). Установлено, что когенерация для ТЭУ на базе ДВС с воздушным охлаждением дает возможность увеличить полноту использования топлива в 2,5 раза.

Приглашаем к сотрудничеству всех заинтересованных лиц.

Разработчики: Щинников Павел Александрович, д-р техн. наук, проф.;  
Синельников Денис Сергеевич, студ.

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

Тел.: +7(383) 346 11 42.

E-mail: [Sinelnikovden@hotmail.com](mailto:Sinelnikovden@hotmail.com)

## **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**

**№ 4 (688) 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*