

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 8 (704)

Август 2017 г.

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва  
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва  
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан  
У. Гайсбауэр, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарт, Германия  
В.В. Дегтярев, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Й. Деспотович, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.Т. Ерофеев, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИ МордГУ им. Н.П. Огарева, Саранск  
Г.В. Есаулов, акад. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва  
В.И. Жаданов, д-р техн. наук, проф., ОГУ, Оренбург  
М. Иветич, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия  
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград  
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., Юго-ЗапГУ, Курск  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск  
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Ж.С. Нуужинов, д-р техн. наук, проф., Казахстанский МИРР, Караганда, Казахстан  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск  
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург  
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж  
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113  
Тел. +7 (383) 266 28 59. [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru). E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**

<b>Исаков А.Л., Смолин Ю.П.</b> Применение виброзащитных конструкций подрельсовых оснований на линиях метрополитена для уменьшения влияния вибрации в зданиях .....	5
<b>Митасов В.М., Адищев В.В., Стаценко Н.В.</b> Концепция предельных состояний конструкций и их проверка по российским нормам и Еврокодам .....	15
<b>Бокарев С.А., Проценко Д.В.</b> Экспериментально-теоретические исследования пролетного строения сборно-разборного моста ТАЙПАН .....	24

### **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

<b>Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С.</b> Влияние времени и повышенной температуры на структурообразование цементного камня .....	34
<b>Власов В.А., Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Вакс И.В.</b> Радиоизотопный метод контроля содержания минеральных примесей в пастах и шламах при производстве органоминеральных смесей в дорожном строительстве .....	46
<b>Бартеньева Е.А., Машкин Н.А.</b> Влияние вида пенообразователей и технологических факторов на свойства пенобетона .....	53
<b>Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Панков П.П.</b> Структурообразование цементогрунтов в присутствии стабилизирующей добавки криогелит .....	63
<b>Логанина В.И., Кислицына С.Н., Мажитов Е.Б.</b> Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты .....	74

### **ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

#### **НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.**

#### **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА**

<b>Маклаков Д.В., Порохин В.Н., Сафиуллин Р.Г.</b> О снижении потерь давления в возмущающих элементах воздуховодных систем .....	80
--	----

### **ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**

<b>Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Шумкова М.Н., Яненко А.П.</b> Обеспечение безопасности судопропуска в маловодный период навигации .....	88
--	----

### **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ**

<b>Лежава И.Г., Мелодинский Д.Л., Новиков В.А.</b> Форма, конструкция, материал .....	96
---	----

### **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

<b>Байер В.Е., Ефимов А.В., Максимов О.Г.</b> Материаловедение для архитекторов .....	103
---	-----

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION

"ASSOCIATION OF EDUCATIONAL

CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS"

**NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL  
INSTITUTIONS**

# **CONSTRUCTION**

**No. 8 (704)**

August 2017

**Scientific-theoretical journal**

**Published since March 1958**

**Monthly**

---

---

*EDITORIAL BOARD*

V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia

A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia

A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia

V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia

V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia

M.A.o. Hajiyev, DSc (Eng), Prof., Baku, Azerbaijan

U. Gaisbauer, Dr. – Ing., Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Germany

V.V. Degtyarev, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia

J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia

V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk, Russia

G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia

V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg, Russia

M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia

V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia

V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk, Russia

V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia

G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia

P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany

L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia

V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia

V.I. Morozov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia

Zh.S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Republic of Kazakhstan

Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg, Russia

G.I. Pustovetov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk, Russia

V.G. Sebeshev, Honour. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia

Yu.L. Skolubovich, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia

Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia

Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia

Eun Chul Shin, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:*

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008 Russia

Phone number +7 (383) 266 28 59

E-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru

[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)

## **CONTENTS**

<b>BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES.</b>	
<b>BASES AND FOUNDATIONS</b>	
<b>Isakov A.L., Smolin Yu.P.</b> The use of vibration isolation structures podbel'skogo grounds on the metro lines to reduce the effects of vibration in buildings .....	5
<b>Mitasov V.M., Adishchev V.V., Statsenko N.V.</b> The concept of limit states of structures and their check on russian standards and Eurocodes .....	15
<b>Bokarev S.A., Protsenko D.V.</b> Experimental-theoretical researches of the span of the demontable bridge TAIPAN .....	24
<b>BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS</b>	
<b>Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Boyarintsev A.P., Mokshin D.I., Gauss K.S.</b> Influence of time and increased temperature on structural creation of cement stone .....	34
<b>Vlasov V.A., Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Vaks I.V.</b> Radioisotope content control method mineral impurities in pastes and sludges at production of organomineral mixtures in road construction .....	46
<b>Barten'eva E.A., Mashkin N.A.</b> Foamers type and technological parameters influence on the foam concrete properties .....	53
<b>Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P.</b> Structural formation of cementogronts in the presence of stabilizing additive cryogelite .....	63
<b>Loganina V.I., Kislytsyna S.N., Mazhitov E.B.</b> Structure and properties of liquid glass with silicic acid sol .....	74
<b>LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION</b>	
<b>Maklakov D.V., Posokhin V.N., Safiullin R.G.</b> On the reduction of pressure losses in the disturbing elements of ventilation systems .....	80
<b>HYDRO-ENGINEERING CONSTRUCTION, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY</b>	
<b>Degtyarev V.V., Orlova E.O., Shumkova M.N., Yanenko A.P.</b> Navigation protection in low water navigational period .....	88
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY</b>	
<b>Lezhava I.G., Melodinskiy D.L., Novikov V.A.</b> Shape, design, material .....	96
<b>SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY</b>	
<b>Bayer V.E., Efimov A.V., Maksimov O.G.</b> Material authority for architects .....	103

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 699.842

А.Л. ИСАКОВ, Ю.П. СМОЛИН

### ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДРЕЛЬСОВЫХ ОСНОВАНИЙ НА ЛИНИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ В ЗДАНИЯХ

Для оценки уровней допустимой вибрации в зданиях, расположенных по линии метро, были проведены исследования на одном из участков Новосибирского метрополитена, оборудованном тремя типами подрельсовых оснований – типовым (с деревянными шпалами), лежневым без виброзащиты и лежневым с виброзащитой с использованием резиновых прокладок в подрельсовом основании. Анализ санитарно-гигиенических норм интенсивности вибрации в зданиях проводился по октавным полосам со среднегеометрическими частотами 8; 16; 31,5 и 63 Гц. В результате исследований было установлено, что введение виброзащиты в подрельсовом основании наряду со снижением общего уровня вибрации в зданиях в 3–5 раз по сравнению с подрельсовым основанием без виброзащиты приводит к более чем двукратному увеличению интенсивности вибрации в октавной полосе 31,5 Гц. Выявлена связь коэффициента преломления вибросигнала с мощностью фундамента, который для 5-этажных зданий оказался в 4–5 раз выше, чем для 10-этажного. В целом уровень вибрации в зданиях по линии метро при всех типах подрельсового основания имел достаточный «резерв» (от 6–7 до 15–20 дБ) по соблюдению санитарных норм для жилых зданий.

**Ключевые слова:** метро, метропоезда, акселерометр, вибрация, виброзащита, ускорение колебаний, октавные полосы, железобетонные лежни, шпалы, осциллограмма, подрельсовое основание, дневная поверхность, здания.

Целью данной работы являлось определение эффективности применения лежневого железобетонного подрельсового основания по критерию снижения вибрации на дневной поверхности и в зданиях по линии метро.

**Аппаратура и методика проведения измерений.** Для непрерывной записи вибрации от движения метропоездов использовался комплекс на базе аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер», состоящий из акселерометра, усилителя заряда, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и компьютера.

Основные параметры АЦП:

разрядность . . . . .	14 бит
регистрируемая амплитуда . . . . .	±10 в
входное сопротивление . . . . .	не менее 1 МОм
частота преобразования . . . . .	до 400 кГц.

На дневной поверхности датчики крепились на металлических пластинах, прикреплявшихся с помощью специального цементирующего состава к бордюрному камню или к несущим конструкциям зданий [1].

Превышение измеряемого сигнала над фоновым шумом составляло 15–20 дБ.

**Измерения вибрации на дневной поверхности.** Измерения проводились в створе трех пикетов с различными типами подрельсового основания на одном из участков Новосибирского метрополитена. Скорость, предусмотренная графиком движения поездов на этих пикетах, составляла 60 км/ч. В качестве основных фиксируемых параметров были взяты максимальные значения амплитуд  $a_{\max}$  и среднеквадратичные значения вертикальных ускорений

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}, \quad (1)$$

где  $a_i$  – значение ускорения  $i$ -й точки осциллографмы,

$N$  – количество точек временного интервала длительностью 1 с.

Среднее значение  $RMS$  по каждому сигналу от прохождения метропоезда определялось как среднеарифметическое по последовательным интервалам, длительностью 1 с.

Более детальный анализ  $RMS$  проводился по октавным полосам со среднегеометрическими частотами 8; 16; 31,5 и 63 Гц, рекомендуемыми санитарно-гигиеническими нормами «МГСН 2.04–97. “Допустимые уровни шума, вибрации и требования к звукоизоляции в жилых и общественных зданиях”».

Геологический разрез на всех измеряемых участках был представлен одним слоем грунта – лессовой супесью с физико-механическими характеристиками:

плотность, кг/м <sup>3</sup> . . . . .	1740
коэффициент пористости . . . . .	0,67
модуль деформации, МПа . . . . .	12,0
угол внутреннего трения, град. . . . .	24
удельное сцепление, кПа . . . . .	15
коэффициент Пуассона . . . . .	0,3.

**Типовое подрельсовое основание.** На рис. 1 показана схема размещения датчиков в сечении с типовым подрельсовым основанием. Заглубление тоннеля в этом сечении составляет 7 м. Расстояние от уровня подрельсового основания до дневной поверхности – 13 м.

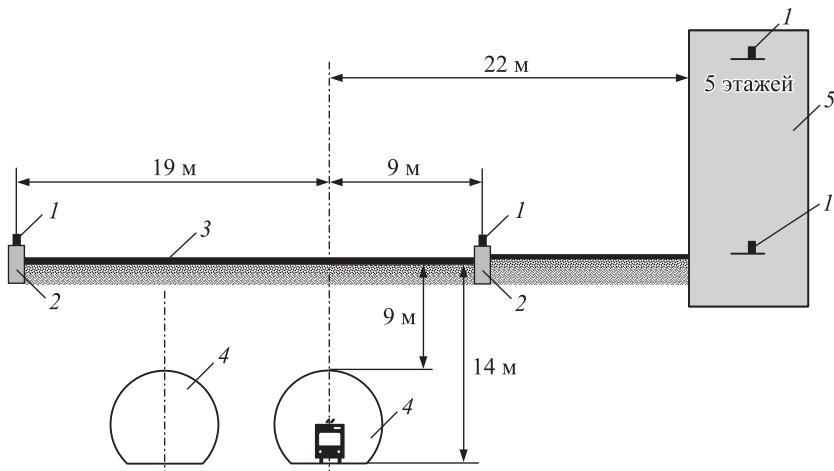


Рис. 1. Схема проведения измерений в сечении тоннеля с типовым подрельсовым основанием

1 – датчики; 2 – бордюрный камень; 3 – асфальтобетонное покрытие; 4 – тоннели;  
5 – десятиэтажный жилой дом

В табл. 1 приведены усредненные результаты всех измерений, проведенных в данном сечении, где интенсивность колебаний в целом и раздельно по октановым полосам выражена в децибелах в соответствии с формулой пересчета  $RMS$

$$L = 20 \log(RMS / a_0), \text{ дБ.} \quad (2)$$

Здесь  $a_0$  – пороговое значение ускорения, принятое согласно существующему стандарту равным  $10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>.

Таблица 1. Сводная таблица результатов измерений вертикальной вибрации на дневной поверхности в сечении с типовым подрельсовым основанием

Место проведения замеров	Максимальные ускорения вибрации, м/с <sup>2</sup>	Весь диапазон частот		Октаавная полоса 63 Гц		Октаавная полоса 31,5 Гц		Октаавная полоса 16 Гц		Октаавная полоса 8 Гц	
		RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ
Бордюрный камень (7 м от оси тоннеля слева)	0,18	0,048	<b>94</b>	0,043	<b>93</b>	0,013	<b>82</b>	0,0015	<b>64</b>	0,0007	<b>57</b>
Бордюрный камень (34 м от оси тоннеля слева)	0,16	0,044	<b>93</b>	0,042	<b>92</b>	0,0046	<b>73</b>	0,0009	<b>59</b>	0,0005	<b>54</b>
Жилой дом (20 м от оси тоннеля, 1-й этаж)	0,018	0,005	<b>74</b>	0,004	<b>72</b>	0,0011	<b>61</b>	0,0003	<b>50</b>	0,0002	<b>46</b>

#### Санитарные нормы Госкомсанэпиднадзора РФ

Для административно-управленческих и общественных зданий	0,035	<b>91</b>	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,005	<b>73</b>
Для жилых помещений, школ, учебных заведений и читальных залов	0,025	<b>88</b>	0,013	<b>82</b>	0,006	<b>76</b>	0,003	<b>70</b>
Для больниц и санаториев	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,004	<b>73</b>	0,002	<b>67</b>

Максимальные ускорения колебаний в данном сечении зафиксированы на железобетонных плитах тротуара, расположенных над осью тоннеля:  $a_{\max} = 0,26 \text{ м/с}^2$ ,  $RMS = 0,08 \text{ м/с}^2$  (98 дБ).

Измерения на бордюрном камне в 7 и 34 м от оси тоннеля дали близкие результаты:  $RMS = 0,048 \text{ м/с}^2$  (94 дБ) и  $RMS = 0,044 \text{ м/с}^2$  (93 дБ) соответственно.

Общий уровень колебаний ( $RMS$ ) в жилом 10-этажном доме, расположенным на расстоянии 20 м от оси тоннеля, составил  $0,005 \text{ м/с}^2$  (74 дБ) при максимальных значениях амплитуд  $a_{\max}$ , не превышающих  $0,02 \text{ м/с}^2$ . «Резерв» по санитарным нормам в октавных полосах 63 и 31,5 Гц варьируется в пределах 15–20 дБ.

**Лежневое подрельсовое основание без виброзащиты.** На рис. 2 показана схема размещения датчиков в сечении с лежневым подрельсовым основанием без виброзащиты. Заглубление тоннеля – 9 м. Расстояние от уровня подрельсового основания до дневной поверхности – 14 м.

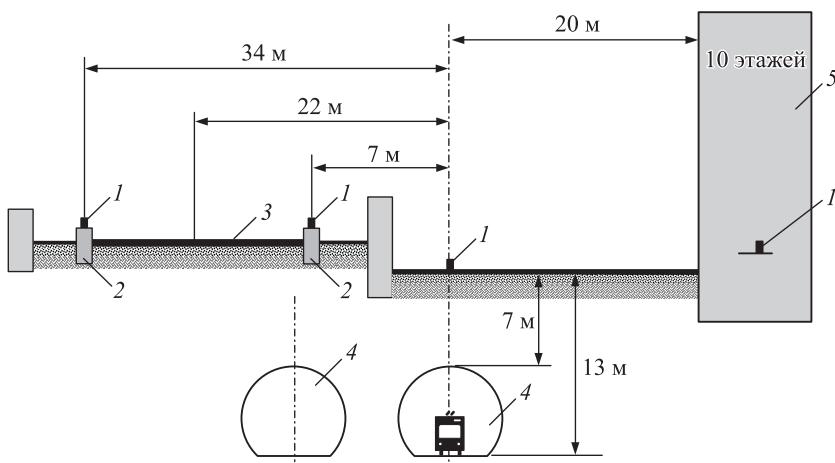


Рис. 2. Схема проведения измерений в сечении тоннеля с лежневым подрельсовым основанием без виброзащиты

1 – датчики; 2 – бордюрный камень; 3 – асфальтобетонное покрытие; 4 – тоннели;  
5 – пятиэтажный жилой дом

В табл. 2 сведены результаты всех измерений, проведенных в рассматриваемом сечении. Общий уровень колебаний ( $RMS$ ) в жилом 5-этажном доме, расположенным на расстоянии 22 м от оси тоннеля, составил  $0,014 \text{ м/с}^2$  (83 дБ) при максимальных значениях ускорений  $0,04–0,15 \text{ м/с}^2$ . «Резерв» по санитарным нормам в октавных полосах 63 и 31,5 Гц варьируется в пределах 6–7 дБ.

Для выяснения возможной погрешности измерения уровня вибрации на дневной поверхности, связанной с возможными отклонениями скорости движения поезда от расчетной, были проведены сравнительные измерения на бордюрном камне, удаленном от оси тоннеля на 9 м при контролируемой скорости поезда 40 км/ч. Результаты измерений показали двукратное снижение общего уровня вибрации –  $RMS$  (или 6 дБ) во всем частотном диапазоне по сравнению с аналогичными измерениями при скорости поезда 60 км/ч.

Таблица 2. Сводная таблица результатов измерений вертикальной вибрации на дневной поверхности в сечении с лежневым основанием без виброзащиты

Место проведения замеров	Максимальные ускорения вибрации, $\text{м}/\text{с}^2$	Весь диапазон частот		Октачная полоса 63 Гц		Октачная полоса 31,5 Гц		Октачная полоса 16 Гц		Октачная полоса 8 Гц	
		RMS, $\text{м}/\text{с}^2$	L, дБ								
Бордюрный камень (9 м от оси тоннеля справа)	0,20	0,061	<b>96</b>	0,054	<b>95</b>	0,0033	<b>70</b>	0,0012	<b>62</b>	0,0007	<b>57</b>
Бордюрный камень (19 м от оси тоннеля слева)	0,10	0,029	<b>89</b>	0,028	<b>89</b>	0,003	<b>70</b>	0,0010	<b>60</b>	0,0008	<b>58</b>
Жилой дом (22 м от оси тоннеля, 1-й этаж)	0,05	0,014	<b>83</b>	0,011	<b>81</b>	0,002	<b>66</b>	0,0003	<b>50</b>	—	—
Жилой дом (22 м от оси тоннеля, 5-й этаж)	0,04	0,011	<b>81</b>	0,009	<b>79</b>	0,001	<b>60</b>	0,0007	<b>57</b>	0,0006	<b>56</b>

**Санитарные нормы Госкомсанэпиднадзора РФ**

Для административно-управленческих и общественных зданий	0,035	<b>91</b>	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,005	<b>73</b>
Для жилых помещений, школ, учебных заведений и читальных залов	0,025	<b>88</b>	0,013	<b>82</b>	0,006	<b>76</b>	0,003	<b>70</b>
Для больниц и санаториев	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,004	<b>73</b>	0,002	<b>67</b>

Такое же снижение RMS было зафиксировано в октавной полосе с базовой частотой 63 Гц. В октавной полосе – 31,5 Гц уровень вибрации снизился в 1,4 раза, или на 2 дБ. Что касается октавной полосы 16 Гц, то уровень вибрации здесь, напротив, превысил соответствующее значение, полученное при скорости 60 км/ч на 2 дБ.

**Виброзащитное лежневое подрельсовое основание.** На рис. 3 показана схема размещения датчиков в сечении с виброзащитным лежневым подрельсовым основанием. Заглубление тоннеля – 6 м. Расстояние от уровня подрельсового основания до дневной поверхности – 12 м.

В табл. 3 приведены результаты всех измерений, проведенных в сечении ПК 107+80. Здесь же даны санитарные нормы допустимых уровней вибрации для помещений различного назначения, взятые в соответствии с «ГОСТ ИСО 8041–2006 Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений».

Наиболее достоверно оценить колебания грунта на дневной поверхности оказалось возможным, произведя измерения вибрации на бордюрном камне, установленном на хорошо утрамбованном грунтовом основании. В 7 м от оси тоннеля максимальные ускорения были равны  $0,04 \text{ м}/\text{с}^2$ , а RMS –  $0,012 \text{ м}/\text{с}^2$ , или 82 дБ. Мало чем отличались аналогичные значения, зафиксированные на бордюрном камне, расположенному на расстоянии 18 м от оси тоннеля.

Общий уровень колебаний (RMS) в жилом 5-этажном доме, расположенным на расстоянии 20 м от оси тоннеля, составил  $0,004 \text{ м}/\text{с}^2$  (72 дБ) при

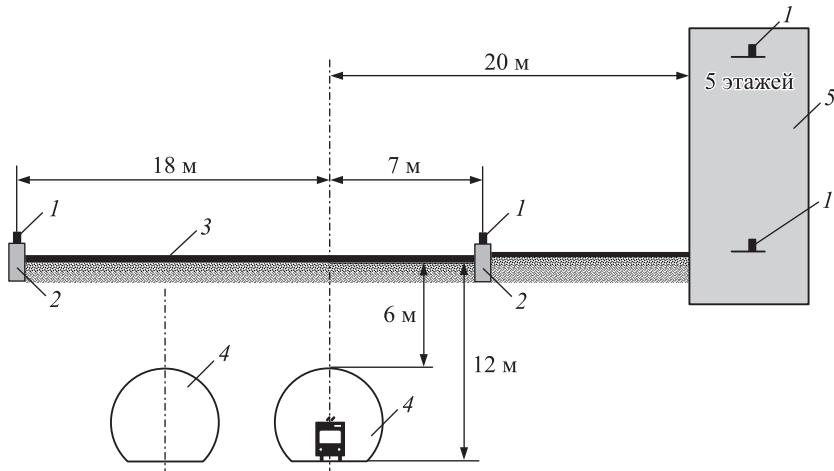


Рис. 3. Схема проведения измерений в сечении тоннеля с виброзащитным лежневым подрельсовым основанием

1 – датчики; 2 – бордюрный камень; 3 – асфальтобетонное покрытие; 4 – тоннели;  
5 – пятиэтажный жилой дом

максимальных значениях амплитуд 0,013–0,015 м/с<sup>2</sup>. «Резерв» по санитарным нормам в октавных полосах 63 и 31,5 Гц варьируется в пределах 15–20 дБ «ГОСТ ИСО 8041–2006 Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений».

Таблица 3. Сводная таблица результатов измерений вертикальной вибрации на дневной поверхности в сечении ПК 107+80 с виброзащитным лежневым основанием

Место проведения замеров	Максимальные ускорения вибрации, м/с <sup>2</sup>	Весь диапазон частот		Октачная полоса 63 Гц		Октачная полоса 31,5 Гц		Октачная полоса 16 Гц		Октачная полоса 8 Гц	
		RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ	RMS, м/с <sup>2</sup>	L, дБ
Бордюрный камень (7 м от оси тоннеля справа)	0,040	0,012	<b>82</b>	0,008	<b>78</b>	0,007	<b>77</b>	0,0013	<b>62</b>	0,0005	<b>54</b>
Бордюрный камень (18 м от оси тоннеля слева)	0,035	0,010	<b>80</b>	0,007	<b>77</b>	0,005	<b>74</b>	0,0010	<b>60</b>	0,0003	<b>50</b>
Жилой дом (20 м от оси тоннеля, 1-й этаж)	0,013	0,004	<b>72</b>	0,002	<b>66</b>	0,002	<b>66</b>	0,0003	<b>51</b>	0,0003	<b>51</b>
Жилой дом (20 м от оси тоннеля, 5-й этаж)	0,015	0,0043	<b>73</b>	0,0025	<b>68</b>	0,0022	<b>67</b>	0,0005	<b>54</b>	0,0003	<b>49</b>

#### Санитарные нормы Госкомсанэпиднадзора РФ

Для административно-управленческих и общественных зданий	0,035	<b>91</b>	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,005	<b>73</b>
Для жилых помещений, школ, учебных заведений и читальных залов	0,025	<b>88</b>	0,013	<b>82</b>	0,006	<b>76</b>	0,003	<b>70</b>
Для больниц и санаториев	0,018	<b>85</b>	0,009	<b>79</b>	0,004	<b>73</b>	0,002	<b>67</b>

**Сравнительный анализ полученных результатов.** Анализ результатов измерений вибрации от прохождения метропоездов в трех различных сечениях линии метро можно разбить на две части:

– сравнительная оценка уровней вибрации на дневной поверхности при трех видах подрельсового основания;

– сравнительная оценка вибрации, передающейся в здание «МГСН 2.04–97. “Допустимые уровни шума, вибрации и требования к звукоизоляции в жилых и общественных зданиях”».

Учитывая приблизительно одинаковую заглубленность тоннелей и идентичность грунтов в исследовавшихся сечениях, сравнительную оценку уровней вибрации можно провести, сопоставив данные измерений, проведенных на бордюрном камне.

Минимальные значения  $RMS$  ( $0,012 \text{ м/с}^2$ , или  $82 \text{ дБ}$ ), как и ожидалось, были зафиксированы в сечении с виброзащитным лежневым основанием. Аналогичные значения  $RMS$  в двух других сечениях оказались в 4–5 раз ( $12$ – $14 \text{ дБ}$ ) выше. Разница между уровнями вибрации в сечениях с лежневым подрельсовым основанием без виброзащиты и типовым была несущественной и не превышала  $2$ – $4 \text{ дБ}$ .

Важно заметить, что на дневной поверхности уровень вибрации в октавной полосе  $31,5 \text{ Гц}$  в сечении с виброзащитным лежневым основанием оказался более чем в два раза (или на  $7 \text{ дБ}$ ) выше, чем в сечении с лежневым основанием без виброзащиты.

Что касается результатов измерения вибрации в зданиях, отстоящих от оси тоннеля на  $20$ – $22 \text{ м}$ , то как и на дневной поверхности, минимальный уровень  $RMS$  ( $0,004 \text{ м/с}^2$ , или  $72 \text{ дБ}$ ) имел место в сечении с виброзащитным лежневым основанием. Аналогичные значения  $RMS$  в сечении с лежневым основанием без виброзащиты оказались примерно в три раза больше и составили  $0,014 \text{ м/с}^2$  ( $83 \text{ дБ}$ ). В обоих случаях измерения проводились в 5-этажных домах.

Близкие к минимальным значениям  $RMS$  ( $0,005 \text{ м/с}^2$ , или  $74 \text{ дБ}$ ) были зафиксированы при проведении измерений в 10-этажном доме в сечении с типовым подрельсовым основанием. Малый уровень вибрации в этом случае по сравнению с двумя предыдущими может быть объяснен различиями в мощности фундаментов 5- и 10-этажных зданий. В последнем случае коэффициент передачи вибрации от грунта к фундаменту оказался в 4–5 раз ниже, чем в двух предыдущих.

Во всех трех исследовавшихся случаях уровень вибрации в зданиях был далек от предельно допустимого, установленного санитарными нормами.

Кроме того, результаты измерений позволили приблизенно оценить степень изменения уровней вибрации на дневной поверхности в зависимости от расстояния до оси тоннеля.

Такая оценка в каждом сечении была проведена по двум точкам на дневной поверхности – бордюрным камням, расположенным на разных расстояниях от оси тоннеля (см. рис. 1–3). За исключением одного сечения, уровни вибрации, зафиксированные на различных расстояниях от оси тоннеля (от  $7$  до  $34 \text{ м}$ ), незначительно (в пределах  $20 \%$ ) отличались друг от друга.

В сечении с лежневым основанием без виброзащиты уровень вибрации в точке, удаленной от оси тоннеля на 19 м, оказался в два раза ниже, чем на расстоянии 9 м.

Согласно теоретическим оценкам, влияние удаленности от оси тоннеля проявляется начиная с расстояния, равного половине длины проходящего поезда. В данном случае – это примерно 35 м, т.е. в пределах указанной удаленности затухание колебаний определяется только свойствами проводящей среды, но не геометрией волнового сигнала.

Приведенные в табл. 1–3 данные позволяют ввести еще один важный показатель – это коэффициент ослабления волнового сигнала при его передаче из грунта на фундамент зданий

$$K_{\text{пр}} = \frac{RMS_{\text{зд}}}{RMS_{\text{гр}}}, \quad (3)$$

где  $RMS_{\text{зд}}$  и  $RMS_{\text{гр}}$  – среднеквадратичные значения вертикальных ускорений в здании и грунте соответственно при одинаковом удалении от оси тоннеля.

Следуя его физическому смыслу и прибегая к аналогии с оптикой, этот показатель условно можно называть коэффициентом преломления вибrosигнала при его переходе из грунта в жесткую конструкцию – фундамент здания. При этом, следуя данным табл. 2 и 3, для 5-этажных зданий он равен 0,4–0,5 (ослабление сигнала на 6–8 дБ), в то время как для 10-этажного здания принимает значение 0,1 дБ при ослаблении сигнала на 20 дБ. Даный пример наглядно иллюстрирует связь между величиной коэффициента  $K_{\text{пр}}$  и мощностью фундамента, через который вибрация передается на все здание.

**Заключение.** 1. Использование резиновых прокладок в лежневом подрельсовом основании наряду со снижением общего уровня вибрации на дневной поверхности в 3–5 раз (10–14 дБ) приводит к более чем двукратному (6–7 дБ) увеличению интенсивности вибрации в октавной полосе 31,5 Гц.

2. Минимальный уровень среднеквадратичных ускорений ( $RMS$ ) в жилых домах, отстоящих от оси тоннеля на 20–22 м, зафиксирован в сечении с виброзащитным лежневым основанием<sup>1, 2</sup> (0,004 м/с<sup>2</sup>, или 72 дБ); аналогичные значения  $RMS$  в сечении с лежневым основанием без виброзащиты оказались примерно в три раза больше и составили соответственно 0,014 м/с<sup>2</sup>, или 83 дБ [2–8].

3. Выявлена связь коэффициента преломления вибrosигнала ( $K_{\text{пр}}$ ) с мощностью фундамента, который для 5-этажных зданий оказался в 4–5 раз выше, чем для 10-этажного.

---

<sup>1</sup> Отчет 04/13-021 об измерениях вибрации метрополитена на территории застройки жилого комплекса по адресу: г. Екатеринбург, ул. Челюскинцев, 82. Науч.-техн. отчет. ООО «ЛАИСФ», 2013 г.

<sup>2</sup> Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / под ред. В.И. Зaborова. Киев: Будивельник, 1989.

4. Уровень вибрации в зданиях по линии метро при всех трех типах подрельсового основания имел достаточный «резерв» по соблюдению санитарных норм для жилых зданий, который варьировал в пределах от 6–7 до 15–20 дБ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И с а к о в А.Л., С м о л и н Ю.П. Сравнительная оценка уровня виброколебаний путевого бетона в метро с различными типами подрельсовых оснований // Вестн. СГУПС. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2017. Вып. 4.
2. А л и м о в С.Г. Оценка влияния транспортной вибрации на конструкции зданий – памятников архитектуры: на примере г. Владивостока: автореф. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2006. 155 с.
3. Да ш е в с к и й М.А., М о н д р у с В.Л., М о т о р о н В.В. Виброзащита крупнопанельных зданий, возводимых вблизи трасс метрополитена неглубокого заложения // ПГС. 2001. № 9.
4. К о в а ль ч у к О.А. Особенности динамических откликов панельных зданий повышенной этажности, подвергающихся воздействию вибраций, вызванных движением поездов метрополитена: автореф. ... канд. техн. наук. М., 2004. 120 с.
5. Да ш е в с к и й М.А. и др. Виброзащитная конструкция верхнего строения пути // Метро. Тоннели. 2005. № 4. С. 41–43.
6. Да ш е в с к и й М.А. Инженерный метод нелинейного расчета резинометаллических виброизоляторов для зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. № 6. С. 37 – 41.
7. В ол к о в А.В., Ка лашнико в а Н.К., Ку рнавин С.А., В еретина И.А. Виброзащита зданий, расположенных вблизи линий метрополитена // Строит. материалы. 2005. № 9. С. 50–52.
8. Т и м о ш е н к о С.П., Я нг Д.Х., У и в е р У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985.

**Исаков Александр Леонидович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mylab@ngs.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
**Смолин Юрий Петрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: yurij.smolin@bk.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 11.07.17

**Isakov Alexander Leonidovich**, DSc, Professor; E-mail: mylab@ngs.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Smolin Yuriy Petrovich**, DSc, Professor; E-mail: yurij.smolin@bk.ru  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

#### **THE USE OF VIBRATION ISOLATION STRUCTURES PODBELSKOGO GROUNDS ON THE METRO LINES TO REDUCE THE EFFECTS OF VIBRATION IN BUILDINGS**

To assess the levels of permissible vibration in buildings located along the subway lines, studies have been conducted on one of the sites of the Novosibirsk metro is equipped with three types modrisovich base – model (with wooden sleepers), linesim without vibration and linesim with vibration isolation using rubber pads under the base. Analysis of sanitary-hygienic norms of the intensity of vibration in buildings were carried out in octave bands with geometric mean frequencies of 8; 16; 31,5 and 63 Hz. The studies

found that the introduction of vibration under the base along with will snizeni the overall level of vibration in buildings in 3–5 times for any under the base without the vibration, leads to a more than twofold increase in the intensity of the vibration in the octave band 31,5 Hz. A relation between the refractive index of the vibration signal with a power Foundation that for 5-storey buildings is 4–5 times higher than 10 storeys. In General, vibration levels in buildings along the subway lines in all types of Podbelskogo base had sufficient «reserves» (from 6–7 to 15–20 dB) the observance of sanitary standards for residential buildings.

**K e y w o r d s:** metro, metros, accelerometer, vibration, protection, vibration acceleration, octave band, reinforced concrete sleepers, sleepers, oscillogram, under-rail base, the surface, buildings.

## REFERENCES

1. Isakov A.L., Smolin Yu.P. Sravnitel'naya otsenka urovnya vibrokolebanii putevogo betona v metro s razlichnymi tipami podrel'sovykh osnovaniy [Comparative assessment of the level of vibrocholerae track concrete in the underground with various types of rail bases]. Vestnik SGUPS [Bulletin of the Siberian Transport University]. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Transport University, 2017. Fasc. 4. (in Russian)
2. Laimov S.G. Otsenka vliyaniya transportnoy vibratsii na konstruktsii zdaniy – pamyatnikov arkitektury: na primere g. Vladivostoka: avtoref. ... kand. tekhn. nauk [Assessment of the impact of transport vibration on the design of buildings – monuments of architecture: the example of Vladivostok: abstract ... PhD]. Vladivostok, 2006. 155 p. (in Russian)
3. Dachevskiy M.A., Mondrus V.L., Motorin V.V. Vibrozashchita krupnopanel'nykh zdaniy, vozvodimykh v blizi trass metropolitena neglubokogo zalozheniya [Protection of large-panel buildings constructed in close proximity to underground lines shallow]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2001. No. 9. (in Russian)
4. Kovalevskiy O.A. Osobennosti dinamicheskikh panel'nykh zdaniy povyshennoy etazhnosti, podvergayushchikhsya vozdeystviyu vibratsiy, vyzvannym dvizheniem poezdov metropolitena: avtoref. ... kand. tekhn. nauk [The peculiarities of dynamic response of prefabricated high-rise buildings subjected to vibrations caused by the movement of subway trains: abstract ... PhD]. Moscow, 2004. 120 p. (in Russian)
5. Dachevskiy M.A. and others. Vibrozashchitnaya konstruktsiya verkhnego stroeniya puti [Vibration protective structure for the top structure of a way]. Metro. Tunnels [Underground.Tunnels]. 2005. No. 4. Pp. 41–43. (in Russian)
6. Dachevskiy M.A. Inzhenernyy metod nelineynogo rascheta rezinometallicheskikh vibroizolyatorov dlya zdaniy [An engineering method of nonlinear analysis of rubber vibration isolators for buildings]. Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake resistant construction. Safety of structures]. 2006. No. 6. Pp. 37–41. (in Russian)
7. Volkov A.V., Kalashnikova N.K., Kurnavin S.A., Veretina I.A. Vibrozashchita zdaniy, raspolozhennykh v blizi metropolitena [Protection of buildings, located close to the metro lines]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2005. No. 9. Pp. 50–52. (in Russian)
8. Timoshenko S.P., Yang D.Kh., Weaver W. Kolebaniya v inzhernom dele [Vibrations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. (in Russian)

УДК 624.012.45

В.М. МИТАСОВ, В.В. АДИЩЕВ, Н.В. СТАЦЕНКО

## КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ ПРОВЕРКА ПО РОССИЙСКИМ НОРМАМ И ЕВРОКОДАМ

Представлены анализ и сравнения общих положений расчета конструкций по предельным состояниям по российским нормам и Еврокодам, отмечены достоинства и недостатки. Проведен сопоставительный анализ результатов расчета опасного сечения плиты шириной 1 м при изгибе по Еврокодам и национальным нормам. Исследования показали, что в России коэффициенты надежности по материалам и по нагрузкам ниже, чем по Еврокодам. Это дает возможность спроектировать конструкции с меньшим расходом материалов, но повышает требования к качеству изготовления. Предлагаются подходы, альтернативные полувероятностному методу расчета по предельным состояниям. Для решения задач надежности и долговечности железобетонных конструкций предлагается диаграммно-энергетический метод, а также применение нового математического аппарата, основанного на теории нечетких множеств. Диаграммно-энергетический метод позволяет проводить сквозной расчет по прочности, жесткости, трещиностойкости в единообразной постановке. А применение методов нечеткой алгебры позволяет получить коэффициенты надежности в процессе расчета.

**Ключевые слова:** надежность, долговечность, метод предельных состояний, диаграммно-энергетический метод, нечеткие величины.

В основу действующих международных и европейских норм проектирования надежности строительных конструкций положен методологический принцип предельного равновесия, который лег в основу метода расчета по разрушающим усилиям и позже – расчета по предельным состояниям, разработанный отечественными учеными и специалистами и впервые введенный в строительные нормы и правила в нашей стране [1–3]. В Системе Еврокодов он получил название «метод частных коэффициентов надежности» [4, 5].

«Метод предельных состояний» и «метод частных коэффициентов надежности» отражают наиболее существенные стороны метода, при этом каждая из этих сторон имеет определенную независимость.

Расчетное значение  $F_d$  воздействия  $F$  по Еврокоду EN 1990 [6] определяется следующим образом:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep}, \quad (1)$$

где  $F_{rep}$  – репрезентативное значение воздействия;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке.

Расчетные значения нагрузок  $F$  по российским нормам определяют путем умножения их нормативного значения  $F_n$  на частный коэффициент безопасности по нагрузке  $\gamma_f$ .

В СП 20.13330.2011 используется совместный коэффициент сочетаний и суммарное расчетное усилие или перемещение определяется нагрузкой  $S$ , вычисляемой по формуле

$$S = \psi \sum_i S_i, \quad (2)$$

которая понижает значение суммарной нагрузки  $S$ , составленной из полных значений  $S_i$  одновременно действующих нагрузок.

В системе Еврокодов произошла замена одного общего коэффициента сочетания  $\psi$  на раздельные (частные) коэффициенты сочетаний  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$ , каждый из которых связан с определенной стороной проблемы безопасности:

$$S = \sum_i \psi_i S_i, \quad (3)$$

т.е. суммарная нагрузка  $S$  комплектуется из компонент со значениями, пониженными умножением на коэффициент сочетаний.

В соответствии с этой зависимостью в тех случаях, когда в расчете учитывается несколько переменных нагрузок, в сочетания входят не сами нагрузки, а их специальные комбинационные значения.

В Еврокодах считается, что именно детализация в применении комбинации частных коэффициентов надежности обеспечивает (точнее, должна обеспечивать) вероятность реализации предельного состояния.

Во всех случаях расчет конструкций ведется по расчетным значениям воздействий, полученным умножением их показательных величин  $\psi_i Q_k$  на соответствующий коэффициент безопасности  $\gamma_f$ . Расчетные значения воздействий для предельных состояний по несущей способности для постоянных и переходных расчетных ситуаций по ЕвроКоду EN 1990 приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1. Расчетные значения воздействий (STR)

Формула	Постоянные воздействия		Ведущее переменное воздействие	Сопутствующие переменные воздействия	
	неблагоприятное	благоприятное		основные (если есть)	прочие
(6.10)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	—	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(6.10a)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	—	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(6.10b)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	—	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Из расчетов в табл. 2 видно, благодаря такой дифференциации заведомо увеличивается нагрузка, тем самым повышается материалоемкость при использовании Еврокодов по отношению к российским нормам.

На рис. 1 дан общий обзор системы частных коэффициентов, используемых в Еврокодах [7].

Несмотря на огромное количество разнообразных коэффициентов надежности, в Еврокодах не рассматриваются национальные особенности территории РФ (в области строительства), а именно:

- вечная мерзлота – 65 % территории РФ;
- специфические и слабые грунты – 40 % территории РФ;

Таблица 2. Сравнения результатов определения изгибающего момента в опасном сечении плиты шириной 1 м при изгибе

Международный стандарт Европы	Национальный стандарт СП 20.13330.2011
1. Нагрузка (нормативная): Кратковременная от людей $Q_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ Собственный вес ж/б перекрытия $\delta = 200 \text{ mm}$ $G_k = 5 \text{ kN/m}^2$ Полная расчетная $1,35 \cdot G_{k,j,sup} + 1,5 \cdot 1 \cdot Q_{k,1} = 9 \text{ kN/m}^2$	1. Нагрузка (нормативная): Кратковременная от людей $P_f = 1,5 \text{ kN/m}^2$ Собственный вес ж/б перекрытия $\delta = 200 \text{ mm}$ $g_n = 5 \text{ kN/m}^2$ Полная расчетная $1,1 \cdot g_n + 1,3 \cdot P_f = 7,5 \text{ kN/m}^2$
2. Расчетный момент в плите с пролетом $l = 6 \text{ м}$ $M = 9 \cdot 1 \cdot 6^2/8 = 40,5 \text{ kNm}$	2. Расчетный момент в плите с пролетом $l = 6 \text{ м}$ $M = 7,5 \cdot 1 \cdot 6^2/8 = 34 \text{ kNm}$

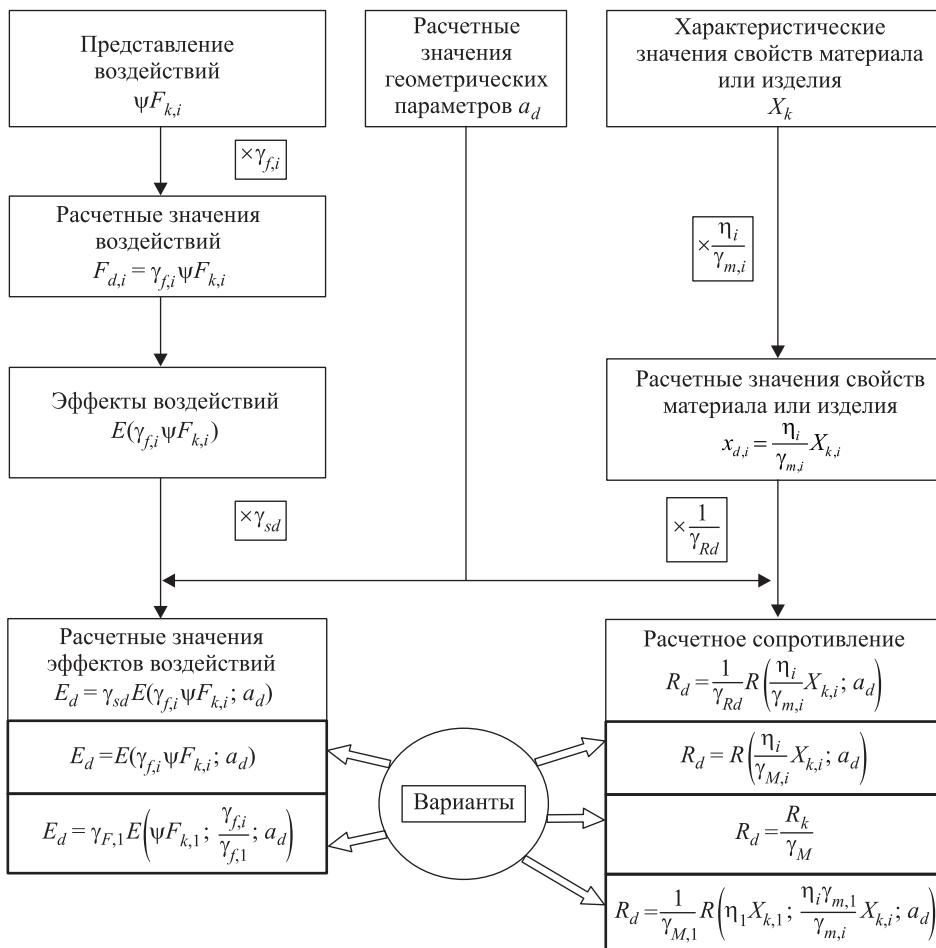


Рис. 1. Общее представление системы частных коэффициентов в Еврокоде

- карстоопасные зоны – 30 % территории РФ;
- подработанные территории – 20 % территории РФ;
- затопления и подтопления – 80 % городов РФ;
- опасные склоновые процессы – 80 % территории РФ;
- сейсмоопасные зоны – 40 % территории РФ;

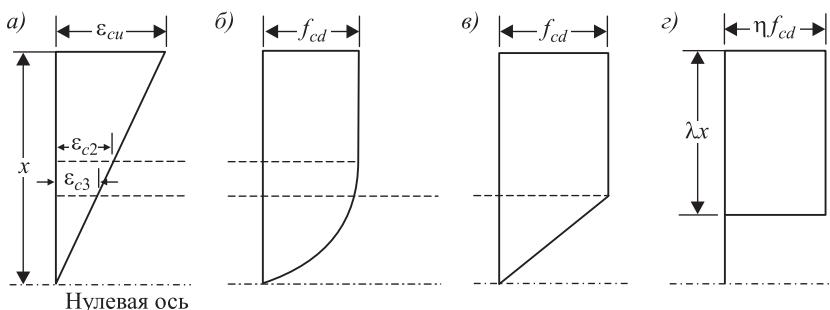
- сугробовые нагрузки – от 80 до 560 кг/м<sup>2</sup> для различных регионов РФ;
- среднегодовые перепады температур – от 30 до 70° С для различных регионов РФ;
- максимальные перепады температур – от 50 до 100° С для различных регионов РФ. Переходы «через ноль» – до нескольких раз в сутки.

Из доклада 2013 г. В.С. Плевкова, д-ра техн. наук, профессора кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета видны последствия прямого применения Еврокодов:

- Полное обрушение металлоконструкций складского высотного (36 м) комплекса в Домодедово (Московская обл.).
- Обрушение покрытия резервуаров для хранения нефти в Киришах после обильного снегопада (вблизи Санкт-Петербурга).
- Обрушение несущих стоек на крытой автостоянке у гипермаркета МЕТРО в Москве (на Дмитровском шоссе) – крыша рухнула прямо на автомобили.

Расчет железобетонных конструкций по первой группе предельных состояний сводится к определению внутренних предельных усилий в III стадии напряженно-деформированного состояния. Основные исходные положения расчета приведены в СП 63.13330.2012.

В Еврокоде EN 1992 такие же предпосылки, только вместо расчетного сопротивления бетона сжатию принимается среднее напряжение в сжатой зоне бетона  $f_{av}$ , в зависимости от принятой эпюры напряжений в сжатой зоне сечения (рис. 2) [8].



*Рис. 2. Идеализированные зависимости «деформация – напряжение»  
а – деформация; б – парабола-прямоугольник; в – билинейный; г – прямоугольный*

Сравнения результатов расчета плиты шириной 1 м по нормальному сечению при изгибе при использовании Еврокодов и российских норм приведены в табл. 3.

В книге А.Г. Колмогорова и В.С. Плевкова выполнен сравнительный анализ результатов расчета железобетонной балки по нормам различных стран [9], который подтверждает тот факт, что российские нормы позволяют проектировать конструкции с минимальным расходом материалов.

Особое внимание следует уделить применению вероятностных методов, а точнее, декларации этих методов. Как в отечественных СНиП, так и в Еврокоде 1990 используется «полувероятностный подход». То есть данные

**Таблица 3. Сравнения результатов расчета плиты шириной 1 м**

Международный стандарт Евронормы	Национальный стандарт СП 63.13330.2012
1. Класс бетона С20/25 $f_{ck}/f_{ck,cube} = 20/25, \gamma_c = 1,5$ Расчетное сопротивление $f_{av} = a_{cf} f_{ck} / \gamma_c = 0,85 \cdot 20 / 1,5 = 11,3 \text{ МПа}$ $a_{ec} = 0,85$ – вносит поправку на длительное действие нагрузки	1. Класс бетона В25 $R_{b,n} = 18,5 \text{ МПа}, \gamma_b = 1,3$ Расчетное сопротивление $R_b = 0,9 \cdot 18,5 / 1,3 = 13,05 \text{ МПа}$ $\gamma_{b1} = 0,9$ – при продолжительном (длительном) действии нагрузки
2. Класс арматуры S400 $f_{yk} = 400 \text{ МПа}, \gamma_s = 1,15$ Расчетное сопротивление $f_{yd} = 350 \text{ МПа}$	2. Класс арматуры S400 $R_{s,n} = 400 \text{ МПа}, \gamma_s = 1,15$ Расчетное сопротивление $R_s = 350 \text{ МПа}$
3. Площадь арматуры в сечении $d = h - a = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ м},$ $\beta = 0,4$ – для прямоугольной эпюры напряжений $K_{av} = M_d / bd^2 f_{av} = 40,5 / 0,15^2 \cdot 11,3 \cdot 10^3 = 0,16$ $\rho \frac{f_{yd}}{f_{av}} = \frac{1}{2\beta} - \sqrt{\left( \frac{1}{4\beta^2} + \frac{K_{av}}{\beta} \right)}; \rho = \frac{A_s}{bd}$ $A_s = 850 \text{ мм}^2 5\text{Ø}16 \text{ либо } 6\text{Ø}14$	3. Площадь арматуры в сечении $h_0 = h - a = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ м},$ $\alpha_m = \frac{M}{R_b b h_0^2} = 34 / 13,05 \cdot 10^3 \cdot 0,15^2 = 0,114$ $R_b \cdot b \cdot x - R_s \cdot A_s = 0;$ $M = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x);$ $A_s = 670 \text{ мм}^2 5\text{Ø}14 \text{ либо } 6\text{Ø}12$
4. Момент, воспринимаемый сечением $x = \frac{f_{yd}}{f_{av}} \frac{A_s}{b} = 0,029 \text{ м};$ $M_{ult} = f_{av} b x (d - \beta x) = 44,7 \text{ кНм}$	4. Момент, воспринимаемый сечением $x = \frac{R_s}{R_b} \frac{A_s}{b} = 0,02 \text{ м};$ $M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) = 37,6 \text{ кНм}$

по характеристикам материалов и воздействий получены с применением вероятностно-статистических методов. Суть применения этих методов состоит в том, что все характеристики априори считаются случайными величинами с заранее заданными функциями распределения вероятностей. Число таких функций весьма ограничено, на практике чаще всего используется нормальный закон распределения. В качестве нормативных значений характеристик материалов или воздействий выбираются левая или правая границы доверительных интервалов. Значение доверительной вероятности определяется категорией сооружения. В итоге получается, что выбираются значения характеристик, наихудшие с точки зрения расчета на несущую способность и эксплуатационную пригодность.

Но решения в полной вероятностной постановке, пригодные для практического использования, просто отсутствуют. Решить задачу в вероятностной постановке означает следующее. Исходные данные по материалам, конструктивным особенностям и воздействиям задаются в виде плотностей распределения вероятностей с соответствующими математическими ожиданиями и дисперсиями, характеризующими неопределенность исходных данных. Результатом решения задачи в вероятностной постановке должны быть плот-

ности распределения искомых величин, отражающих несущую способность и эксплуатационную пригодность сооружения или конструктивного элемента. Но как сказано выше, вследствие непреодолимых математических трудностей отсутствуют такие решения, на основе которых можно было бы дать конкретные рекомендации. Поэтому задачи решаются как детерминированные. При этом исходным данным приписываются именно те наихудшие значения, которые определены с помощью вероятностно-статистического подхода. В результате проявляется так называемый мультипликативный эффект, т. е. коэффициенты запаса становятся настолько большими, что приводят к значительному перерасходу материалов.

В настоящее время многими исследователями в различных областях формируется альтернативный вероятностному подход, в том числе и в строительстве [10–12]. Новый подход базируется на описании исходных данных как нечетких величин, степень неопределенности которых задается функцией принадлежности, а также на использовании диаграммно-энергетического метода. Функция принадлежности нечеткой величины является аналогом плотности распределения случайной величины. Строить эти функции достаточно просто, тем более что использование нечеткой алгебры не требует знания аналитических выражений функций принадлежности [11]. В работах [10–12] показано, что задачи в нечеткой постановке могут быть решены полностью, т. е. могут быть получены функции принадлежности искомых величин.

**Выводы.** 1. Еврокоды и стандарты РФ в области надежности строительных конструкций и нормирования нагрузок и воздействий имеют различные структурные построения. Это не позволяет напрямую использовать значения большинства коэффициентов, принятых в Еврокодах, и требует детального сравнительного анализа двух указанных систем нормирования.

2. Действующие отечественные нормативные документы в течение длительного срока использования обеспечивали необходимый уровень безопасности и надежности зданий и сооружений.

3. Введение большого количества частных коэффициентов в Еврокодах фактически приводит к полувероятностному методу, а возникающий при этом мультипликативный эффект приводит не к увеличению гарантии надежности и долговечности, а к необоснованному ничем повышению материала-помехости. Введение дополнительных коэффициентов ( $\psi_0 Q_k$ ,  $\psi_1 Q_k$ ,  $\psi_2 Q_k$ ) фактически отражает необходимость адекватного описания степени неопределенности исходных данных. Адекватности можно достигнуть, применив нечеткие постановки задач.

4. Предлагаемый авторами диаграммно-энергетический метод [13] и нечеткая постановка задач позволяют проводить сквозной расчет по прочности, жесткости, трещиностойкости, решая системы уравнений, соответствующие этапам сквозного расчета. При этом открывается возможность избавиться от мультипликативного эффекта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие методики расчета по предельным состояниям / под ред. Е.И. Беленя. М.: Стройиздат, 1971. 175 с.

2. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / под ред. А.А. Гвоздева. М.: Стройиздат, 1978. 198 с.
3. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: общий курс. М.: Стройиздат, 1991. 728 с.
4. Abeyles P.W. & Bardhan-Roy B.K. Prestressed Concrete Designers' Handbook, View Point Publications, London, 1981.
5. M.Y.H. Bangash. Structural Details in Concrete, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1992.
6. Гульванесян Х., Калгаро Ж.-А., Голицки М. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 0: Основы проектирования сооружений / пер. с англ. М.: МГСУ, 2011. 258 с.
7. Гульванесян Х., Формичи П., Калгаро Ж.-А. при участии Хардинга Дж. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 1: Воздействия на сооружения. Стандарты EN 1991-1-1 и 1-3-1-7. М.: МГСУ, 2011. 340 с.
8. Биби Э.В., Нарайанан Р.С. Руководство для проектировщиков к ЕвроКоду 2: Проектирование железобетонных конструкций: руководство для проектировщиков к EN 1992-1-1 и EN 1992-1-2. ЕвроКод 2: Проектирование железобетонных конструкций. Общие правила и правила для зданий. Противопожарное проектирование строительных конструкций. М.: МГСУ, 2013. 292 с.
9. Колмогоров А.Г., Плевков В.С. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. Томск: Печат. мануфактура, 2009. 496 с.
10. Адищев В.В., Шмаков Д.С. Применение кластерного анализа для построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 4. С. 60–70.
11. Адищев В.В., Шмаков Д.С. Метод построения функции принадлежности с «прямой» обработкой исходных данных // Тр. НГАСУ (Сибстрин). 2013. Т. 16. № 56. С. 45–66.
12. Митасов В.М., Адищев В.В., Себешев В.Г., Нарушевич А.Н., Шмаков Д.С. Оценка надежности типовой конструкции платформенного стыка на основе результатов натурных обследований // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 9-10. С. 5–12.
13. Митасов В.М. Основные положения теории сопротивления железобетона: монография. Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2010. 158 с.

**Митасов Валерий Михайлович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Адищев Владимир Васильевич**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Стасенко Наталья Валерьевна**, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 17.07.17

**Mitasov Valeriy Mikhaylovich**, DSc, Professor

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

**Adishchev Vladimir Vasil'evich**, DSc, Professor

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

**Statsenko Natalia Valer'evna**, Post-graduate Student

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

## **THE CONCEPT OF LIMIT STATES OF STRUCTURES AND THEIR CHECK ON RUSSIAN STANDARDS AND EUROCODES**

This article presents an analysis and comparison of the General provisions of calculation of structures according to limit state design according to Russian norms and Eurocodes, the advantages and disadvantages. Comparative analysis of calculation results the critical section of a plate of 1m width in bending according to Eurocodes and national standards. Studies have shown that in Russia, the safety factors for materials and loads is lower than the Eurocodes. This gives the opportunity to design structures with less material consumption, but increases the requirements for production quality. Offers alternative approaches poluvirtualnogo calculation method for ultimate limit state. For the decision of problems of reliability and durability of reinforced concrete structures is proposed diagram-energy method and the application of the new mathematical apparatus based on fuzzy set theory. Diagram-energy method can be carried out through the calculation of strength, stiffness, fracture toughness in the uniform setting. And the application of methods of fuzzy algebra allows to obtain the safety factors in the calculation process.

**K e y w o r d s:** reliability, durability, method of limiting states, diagram-energy method, fuzzy values.

### **REFERENCES**

1. Razvitiye metodiki rascheta po predel'nym sostoyaniyam [Development of the calculation method for limiting states]. Ed. E.I. Belen. Moscow, Stroyizdat, 1971. 175 p. (in Russian)
2. Novoe v proektirovaniy betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [New in the design of concrete and reinforced concrete structures]. Ed. A.A. Gvozdev. Moscow, Stroyizdat, 1978. 198 p. (in Russian)
3. Baykov V.N., Sigalov E.E. Zhelezobetonnye konstruktsii: obshchiy kurs [Reinforced concrete structures: General course]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 728 p. (in Russian)
4. Abeles P.W. & Bardhan-Roy B.K. Prestressed Concrete Designers' Handbook, View Point Publications, London, 1981.
5. M.Y.H. Bangash. Structural Details in Concrete, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1992.
6. Gul'vensyan Kh., Calgaro J.-A., Golitski M. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 0: Osnovy proektirovaniya sooruzheniy [Designer's guide to Eurocode 0: Basis of structural design]. Moscow, MGSU, 2011. 258 p. (in Russian)
7. Gul'vensyan Kh., Formichi P., Calgaro J.-A. with contributions from Harding G. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 1: Vozdeystviya na sooruzheniya. Standarty EN 1991-1-1 i 1-3-1-7 [Designer's guide to Eurocode 1: actions on buildings. EN 1991-1-1 and 1-3-1-7]. Moscow, MGSU, 2011. 340 p. (in Russian)
8. Bibi E.V., Narayanan R.S. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 2: Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy: rukovodstvo dlya proektirovshchikov k EN 1992-1-1 i EN 1992-1-2. Evrokod 2: Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy. Protivopozharnoe proektirovanie stroitel'nykh konstruktsiy [Designer's guide to Eurocode 2: Design of concrete structures: Designer's guide to EN1992-1-1 and EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings. Structural fire design]. Moscow, MGSU, 2013. 292 p. (in Russian)

9. Kolmogorov A.G., Plevkov V.S. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy po rossijskim i zarubezhnym normam [Calculation of reinforced concrete structures by Russian and foreign standards]. Tomsk, Printing factory, 2009. 496 p. (in Russian)
10. Adishchev V.V., Shmakov D.S. Primenenie klasternogo analiza dlya postroeniya nechetkikh approksimatsiy diagramm deformirovaniya betona [Application of cluster analysis for construction of fuzzy approximations of the deformation curves of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 4. Pp. 60–70. (in Russian)
11. Adishchev V.V., Shmakov D.S. Metod postroeniya funktsii prinadlezhnosti s «pryamoy» obrabotkoj iskhodnykh dannykh [The method of constructing membership functions with «direct» source data processing]. Trudy NGASU (Sibstrin) [The works of NSUACE]. 2013. Vol. 16. No. 56. Pp. 45–66. (in Russian)
12. Mitasov V.M., Adishchev V.V., Sebeshev V.G., Narushovich A.N., Shmakov D.S. Otsenka nadezhnosti tipovoy konstruktsii platformennogo styka na osnove rezul'tatov naturnykh obsledovaniy [Reliability evaluation of platform joint's type construction based on full-scale survey results]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 9–10. Pp. 5–12. (in Russian)
13. Mitasov V.M. Osnovnye polozheniya teorii soprotivleniya zhelezobetona: monografiya [Fundamental theses of reinforced concrete resistance theory: a monograph]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2010. 158 p. (in Russian)

УДК 69.04:69.058.2

С.А. БОКАРЕВ, Д.В. ПРОЦЕНКО

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ СБОРНО-РАЗБОРНОГО МОСТА ТАЙПАН

Изложена актуальность разработки новых решений временных мостов и приведена общая конструктивная схема ТАЙПАН мостов, разработанная специалистами ООО «ТАЙПАН» и СГУПС. Рассмотрен расчет цилиндрического элемента (пина), работающего на срез и смятие соединяемых элементов по методике, приведенной в СП 35.13330.2011, и его конечно-элементный расчет с учетом пластических свойств материала. В результате проведенного исследования установлен уточняющий коэффициент, который необходимо применять при расчетах шарнирных закреплений. Подтверждением справедливости теоретической части исследования и численного моделирования (конечно-элементных расчетов) явилась высокая степень корреляции теоретических и экспериментальных значений, приведенных в заключительной части статьи.

**Ключевые слова:** ТАЙПАН, мост, временный, сборно-разборный, пин, испытания.

Цель исследования: разработка инженерного метода расчета шарнирных соединений, который будет учитывать пластические свойства материалов.

Задачи исследования:

- 1) проработка существующего инженерного метода расчета шарнирных соединений в соответствии с действующими нормативными документами;
- 2) конечно-элементное моделирование пин-соединения, аналогичного рассмотренному в п. 1 с учетом пластических деформаций;
- 3) вычисление переводного коэффициента, позволяющего, не прибегая к сложному математическому моделированию, учитывать пластические деформации металла;
- 4) проведение эксперимента, подтверждающего или опровергающего теоретическую работу, описанную в п. 1–3.

При развитии транспортной инфраструктуры регионов выполняют пионерную прокладку временных дорог и мостов, необходимых для поставки оборудования и материалов на строительные площадки. Кроме этого временные конструкции мостов применяют организации, разрабатывающие новые и эксплуатирующие старые месторождения полезных ископаемых (руда, лес, нефть, газ, золото, алмазы и т.д.), – горнодобывающие, лесозаготовительные и иные компании [1]. Таким образом, временные сборно-разборные мосты являются неотъемлемой частью инфраструктуры любого развивающегося района. Во всех этих случаях экономически обосновано применение конструкций многоразового использования, так как после окончания строительства или завершения разработки месторождения все обрачиваемое имущество можно использовать на других площадках.

В настоящее время парк временных сборно-разборных мостов морально устарел и есть необходимость в разработке новых типов временных конструкций, отвечающих современным требованиям по нагрузкам, габаритам, безопасности движения и экологии. Как правило, разработки в этом направлении ведет министерство обороны [2, 3], однако и другие государственные и частные предприятия проводят научно-исследовательские и опытные конструкторские разработки, отходя от стандартных решений и внедряя современные материалы<sup>1</sup>.

ООО «ТАЙПАН» совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения разработали и запатентовали<sup>2</sup> конструкцию, технологию сборки и монтажа сборно-разборных мостов ТАЙПАН многократного применения [4, 5]. Отличительной особенностью этой конструкции является технологическая универсальность – возможность из нескольких стандартных элементов, массой не более 1 т каждый создавать пролетные строения переменной длины (с кратностью 3 м), с различной статической

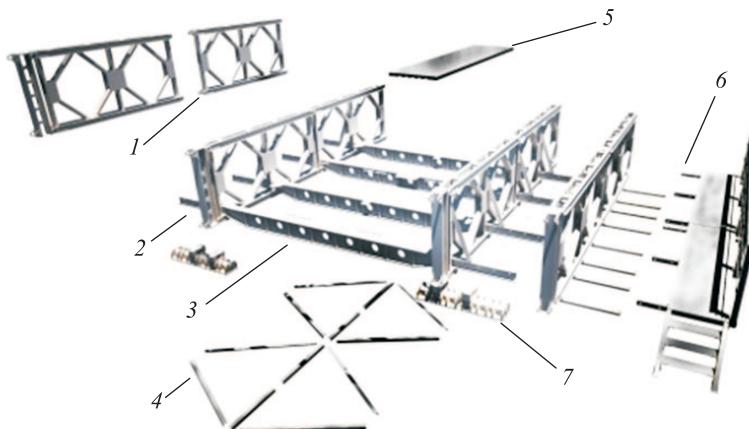


Рис. 1. Общий вид двух секций пролетного строения моста ТАЙПАН

1 – панель; 2 – опорная стойка; 3 – поперечная балка; 4 – талрепы; 5 – плита настила; 6 – консоль тротуара; 7 – опорная часть

схемой (разрезные и неразрезные конструкции), любым габаритом проезда, заданной грузоподъемностью и пр. Общий вид двух секций пролетного строения представлен на рис. 1. Существенное достоинство конструкции состоит в том, что транспортировка и монтаж моста не требуют специальной тяжелой техники.

В рамках разработанных (типовых) конструктивных решений реализованы пролетные строения с открытым верхним поясом со следующими пара-

<sup>1</sup> СТО АВТОДОР «Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию применения временных мостов (эстакад, путепроводов) на дорогах государственной компании «АВТОДОР».

<sup>2</sup> Пат. № 137558 РФ, МПК E01D 15/133 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, Р.А. Шаршов. Опубл. 23.09.2013. Пат. № 2578231 РФ, МПК E01D 15/133 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, О.А. Кольцова и др. Опубл. 17.12.2014. Пат. № 156392 РФ, МПК E01D 15/12 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, О.А. Кольцова и др. Опубл. 17.12.2014.

метрами: классы автомобильной нагрузки (К) – в интервале А2–А14<sup>3</sup>, с массой одиночного экипажа от 15 до 100 тс; длинами пролетного строения – от 3 до 60 м для разрезных схем и от 21 до 270 м для неразрезных; три типа габарита проезда – Г-4,5, Г-6,0 и Г-8,0<sup>4</sup>. Специально для пропуска экипажей массой до 500 тс разработано конструктивное решение пролетного строения с ездой поверху длиной до 30 м. В этом случае фермы в уровне верхнего пояса объединяют деревянным многослойным настилом. Для реализации нетиповых решений необходимо выполнять прочностные и деформационные расчеты в соответствии с СП 20.13330.2011.

Повышенного внимания при расчете требует пин-соединение – шарнир, обеспечивающий передачу осевого усилия от пояса одной панели к поясу соседней. На рис. 2 показана конструкция узла крепления панелей пролетного строения. Аналогом пин-соединения – узла, работающего на срез соединительного элемента и смятие объединяемых пластин, является цилиндрическое болтовое соединение. Максимальное усилие ( $N_b$ ), передающееся через пин-соединения, для конструкций, включенных в альбом, равно 159,1 тс.

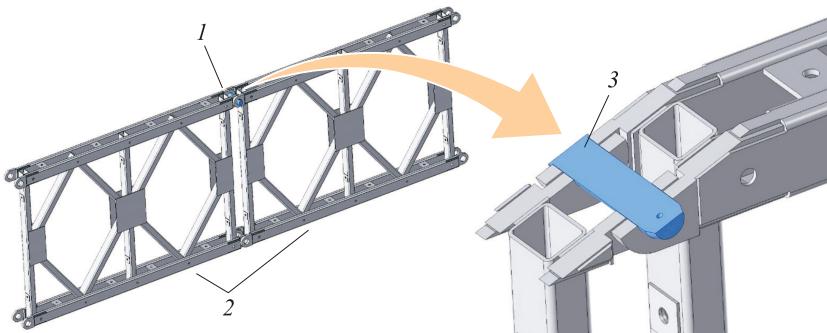


Рис. 2. Конструкция узла крепления панелей пролетного строения моста ТАЙПАН

1 – пин-соединение; 2 – панели ТАЙПАН; 3 – тело пина

Первоначально подбор диаметра пина ( $d$ ) был выполнен в соответствии с СП 20.13330.2011 по следующим формулам.

На срез болта (в нашем случае пина):

$$N_b = R_{bs} \cdot A_{bs} \cdot m_b \cdot n_s = R_{bs} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot m_b \cdot n_s, \quad (1)$$

где  $R_{bs}$  – расчетное сопротивление металла на срез;

$A_{bs}$  – площадь рабочего сечения тела болта;

$m_b$  – коэффициент условий работы соединения;

$n_s$  – число расчетных срезов одного болта;

$d$  – диаметр рабочего тела болта.

<sup>3</sup> СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения.

Откуда минимально необходимый диаметр пина:

$$d = \sqrt{\frac{4N_b}{R_{bp} \cdot \pi \cdot m_b \cdot n_s}}. \quad (2)$$

На смятие соединяемых элементов:

$$N_b = R_{bp} \cdot d \cdot \Sigma t \cdot m_b, \quad (3)$$

где  $R_{bp}$  – расчетное сопротивление металла смятию;

$\Sigma t$  – наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении.

Откуда минимально необходимый диаметр пина:

$$d = \frac{N_b}{R_{bp} \cdot \Sigma t \cdot m_b}. \quad (4)$$

Результаты выполненных расчетов показали, что при передаваемом усилии в 159,1 тс достаточный диаметр пина – соединительного элемента составил 5,6 см из расчета на срез.

Так как пин-соединение конструктивно все-таки существенно отличается от болтового соединения, работа проектируемого узла была смоделирована в конечно-элементной (КЭ) среде Midas Civil 2018 v(1.2) [6]. Тело пина и соединяемые элементы панели выполнены в объемных элементах, на рис. 3, а приведена их расчетная модель. Сложная пространственная работа пин-соединения реализована с учетом ограниченных пластических деформаций [7, 8] при решении контактной задачи. По границе контакта рабочих поверхностей пина и примыкающих элементов установлены жесткие связи, работающие только при сжатии. Все это позволило получить распределение напряжений в теле каждого из объединяемых элементов и детально проанализировать изменение напряженно-деформированного состояния пин-соединения при различных уровнях нагрузки (см. рис. 3, б).

В произведенном конечно-элементном расчете предельно допустимые напряжения в пине и элементах панели были приняты равными соответствующим расчетным сопротивлениям стали (на смятие – 735 МПа и на

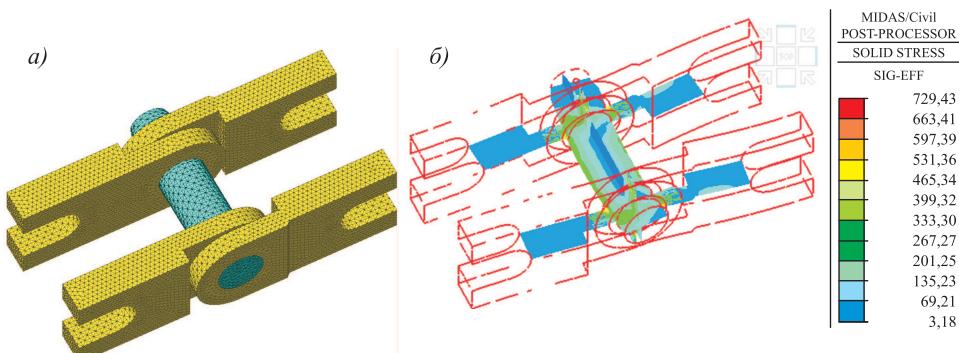


Рис. 3. Расчетная модель пин-соединения  
а – общий изометрический вид; б – НДС узла в момент приложения нагрузки

срез  $-345$  МПа). Выполненный расчет по МКЭ показал, что при передаваемом через соединение усилии  $159,1$  тс минимально необходимый диаметр тела пина составляет  $6,5$  см, что в  $1,161$  раза больше диаметра, полученного расчетом по СП 20.13330.2011.

В сводной табл. 1 приведены значения диаметров пинов, полученные по двум методам расчета для усилий, возникающих в соединении при различных схемах компоновки пролетных строений, приведенных в альбоме.

Таблица 1. Результаты расчета диаметра пина ТАЙПАН

Усилие, тс	Расчет по СП 20.13330.2011		КЭ расчет в MidasCivil 2018		Отклонение, $d_{\text{сп}}/d_{\text{кз}}$
	$d_{\text{сп}}$ , мм	критерий	$d_{\text{кз}}$ , мм	критерий	
171,9	60	Работа на срез пина	70	Работа на срез пина	0,857
159,1	56		65		0,861
121,7	52		60		0,866
97,8	47		54		0,870
65,3	41		47		0,873
42,9	36		41		0,878

Величина максимального усилия в поясах ферм пролетных строений равна  $159,1$  кН и достаточный для ее восприятия диаметр пина составляет  $6,5$  см, окончательный диаметр тела пина для всех типов конструкций ТАЙПАН, приведенных в альбоме, –  $70$  мм. Такое решение связано с рядом конструктивных и технологических особенностей, которые учитывают особенности механической обработки заготовки элемента и продуктивность работ на монтаже.

Для случая проектирования пролетного строения моста ТАЙПАН, не входящего в альбом уже подготовленных решений, можно выполнить расчет такого узла инженерным методом. Для этого необходимо ввести в расчет дополнительный коэффициент ( $k_{\text{ш}}$ ), который будет учитывать особенности работы пин-соединения и возможность поворота друг относительно друга соединяемых элементов. Значение этого коэффициента для пролетных строений моста ТАЙПАН можно принять равным  $0,857$  (табл. 1). Тогда формула СП для расчета цилиндрического болтового соединения на срез болта приобретет вид

$$N_b = R_{bs} \cdot A_{bs} \cdot m_b \cdot n_s \cdot k_{\text{ш1}}. \quad (5)$$

Для оценки достоинств и недостатков моста ТАЙПАН была запроектирована и изготовлена экспериментальная конструкция пролетного строения с неразрезной схемой  $21,31+30,31+21,31$ , общей длиной  $74,53$  м под нагрузку – одиночная тележка весом  $80$  тс. Габарит мостового перехода принят Г-4.5, который предназначен для пропуска автомобилей по одной полосе движения. Общий вид запроектированного пролетного строения приведен на рис. 4. Для оценки несущей способности и деформативности этого пролетного строения разработали его конечно-элементную модель, учитывающую податливость пин-соединений, упругопластических свойств металла и реальных условий эксплуатации.



Рис. 4. Перспектива пролетного строения ТАЙПАН

Построен мост был на автомобильной дороге М-4 «Дон» в целях организации временного проезда транспортного потока на время ремонта капитального моста. После завершения монтажа были проведены статические испытания пролетного строения, для этого в растянутой и сжатой зонах в середине каждого пролета и над опорными участками промежуточных опор наклеили тензодатчики.

На рис. 5, а показан процесс установки испытательного оборудования на верхний пояс, а на рис. 5, б – проход испытательной нагрузки по мосту. В качестве подвижной испытательной нагрузки был принят груженый самосвал общим весом 32 т. Его положение в поперечном направлении на разных этапах испытаний меняли от одного края проезжей части к другому. По длине пролета самосвал устанавливали в середине первого, второго и третьего пролетов.

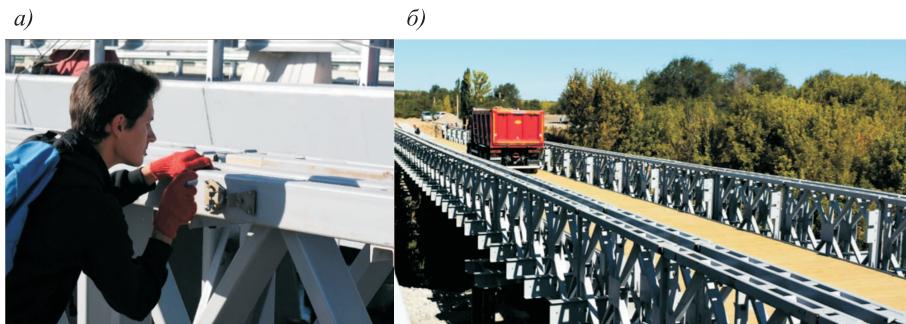


Рис. 5. Проведение испытаний

а – монтаж испытательного оборудования на верхний пояс фермы; б – передвижение испытательной нагрузки по мосту

В табл. 2 приведены значения прогибов пролетного строения, полученные по результатам инструментальных измерений нивелиром и теоретических расчетов (при положении нагрузки в поперечном направлении по середине моста), а также соответствующие конструктивные коэффициенты [9] (отношение фактических значений прогибов к теоретическим), максимальный из которых составил  $k = 0,98$ , а минимальный – 0,84. Положение нагрузки в поперечном направлении относительно оси пролета при расчетах соответствовало реальному положению нагрузки при проведении испытаний.

Экспериментальные и расчетные значения напряжений в верхних и нижних растянутых поясах ферм при положении нагрузки посередине

Таблица 2. Результаты инструментальных измерений прогибов пролетного строения

Наименование	Ферма	Середина первого пролета	Середина второго пролета	Середина третьего пролета
Прогиб фактический $f_{\text{эксп}}$ , мм	Левая внутренняя	16,0	36,0	16,0
	Правая внутренняя	17,0	39,0	16,0
Прогиб теоретический $f_{\text{теор}}$ , мм	Левая	17,4	42,8	17,4
	Правая	17,4	42,8	17,4
Конструктивный коэффициент	$k_{\text{лев}} = f_{\text{факт}} / f_{\text{теор}}$	0,92	0,84	0,92
	$k_{\text{прав}} = f_{\text{факт}} / f_{\text{теор}}$	0,98	0,92	0,92

поперечного сечения пролетного строения ТАЙПАН приведены в табл. 3. Места наклейки тензорезисторов в поперечных сечениях пролета показаны на рис. 6.

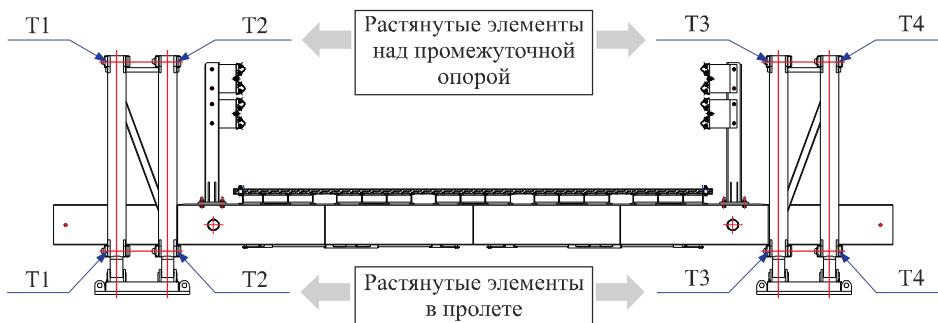


Рис. 6. Расположение тензодатчиков на поясах ферм ТАЙПАН

Как видно из табл. 3, распределение напряжений между соседними фермами происходит неравномерно. Больше нагружены внутренние фермы и это находит отражение как в экспериментальных, так и в расчетных данных.

Кроме того, в табл. 3 приведены значения конструктивных коэффициентов. Они также оказались значимо отличающимися для внутренних и наружных ферм. Завышенные значения коэффициентов получены для внутренних ферм. Тщательный осмотр конструкции в местах опирания показал, что это связано со сварным швом, который не позволял полноценно опереться поперечной балке на нижний пояс. По итогам экспериментальной сборки в проект пролетных строений моста ТАЙПАН были внесены корректировки, обеспечивающие более равномерное распределение напряжений между соседними фермами.

При испытании не были выявлены остаточные деформации конструкции, данное обстоятельство свидетельствует о том, что ее работа проходила в упругой стадии, и это хорошо согласуется с результатами расчета.

Дополнительно к статическим были проведены динамические испытания, по результатам которых фактический динамический коэффициент  $1 + \mu_{\text{эмпир}} = 1,18$ , что меньше расчетного значения ( $1 + \mu_{\text{расч}} = 1,4$ ) на 18 %.

**Таблица 3. Напряжения в поясах ферм, полученные по результатам эксперимента и расчета МКЭ**

Сечение		Середина первого пролета	Опора № 2	Середина второго пролета	Опора № 3	Середина третьего пролета
положение нагрузки		в 1-м пролете	во 2-м пролете			в 3-м пролете
Напряжения фактические $\sigma_{\text{эксп}}, \text{МПа}$	T1	56,21	64,94	86,22	66,23	58,46
	T2	78,32	75,38	108,28	74,87	79,45
	T3	76,97	74,08	107,36	72,54	76,05
	T4	55,17	63,74	84,62	65,00	57,38
Напряжения теоретические $\sigma_{\text{теор}}, \text{МПа}$	T1	63,80	72,98	94,10	72,98	63,83
	T2	79,74	75,98	108,94	75,98	79,74
	T3	79,74	75,98	108,94	75,98	79,74
	T4	63,80	72,98	94,10	72,98	63,80
Конструктивные коэффициенты T1						
$k_{T1} = \frac{\sigma_{\text{факт}}}{\sigma_{\text{теор}}}$		0,881	0,890	0,916	0,908	0,916
Коэффициенты запаса T2 $k_{T2} = \frac{\sigma_{\text{факт}}}{\sigma_{\text{теор}}}$		0,982	0,992	0,994	0,985	0,996
Коэффициенты запаса T3 $k_{T3} = \frac{\sigma_{\text{факт}}}{\sigma_{\text{теор}}}$		0,965	0,975	0,985	0,955	0,954
Коэффициенты запаса T4 $k_{T4} = \frac{\sigma_{\text{факт}}}{\sigma_{\text{теор}}}$		0,865	0,873	0,899	0,891	0,899

**Выводы.** 1. При расчете шарнирных креплений конструкций мостов, работающих на срез, в инженерной методике, предложенной СП, необходимо учитывать дополнительный коэффициент закрепления, отражающий фактическую работу конструкции пин-соединения.

2. Проведенные испытания позволили выявить неудачные конструктивные решения и внести в конструкцию пролетного строения ТАЙПАН необходимые изменения.

3. Значения конструктивных коэффициентов, приведенные в табл. 2 и 3, изменяются в пределах от 0,873 до 0,996, что говорит о достаточно хорошей степени корреляции результатов эмпирических измерений и теоретических расчетов, подтверждает правомерность сделанных допущений, адекватность расчетной схемы и свидетельствует о возможности применения конечно-элементных пакетов в указанной постановке для разработки различных конструктивных решений мостов ТАЙПАН.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bailey bridge. Headquarters department of the army. Washington, 1986. 373 p.
2. Дианов Н.П., Миргородов Ю.С. Табельные автодорожные разборные мосты: учеб. пособие / МАДИ (ГТУ). М., 2009. 236 с.

3. Кручинкин А.В. Сборно-разборные временные мосты. М.: Транспорт, 1987. 191 с.
4. Бокарев С.А., Проценко Д.В. О предпосылках создания новых конструкций временных мостовых сооружений // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. 11 с.
5. Городецкий А.С., Зоворский В.И., Лантух -Ляшенко А.И., Рассказов А.О. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1981. 143 с.
6. Проценко Д.В., Пахомов Д.Н., Шаршов Р.А. Сборно-разборный мост ТАЙПАН многократного применения // Вестн. мостостроения. 2014. № 1. С. 60–68.
7. Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 376 с.
8. Потапкин А.А. Теория и расчет стальных и железобетонных мостов на прочность с учетом нелинейных и пластических деформаций. М.: Транспорт, 1972. 192 с.
9. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. М.: Наука, 1971. 192 с.

**Бокарев Сергей Александрович**, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Проценко Дмитрий Владимирович**, асп.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 24.07.17

**Bokarev Sergey Alexandrovich**, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Protsenko Dmitriy Vladimirovich**, Post-graduate Student

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **EXPERIMENTAL-THEORETICAL RESEARCHES OF THE SPAN OF THE DEMONTABLE BRIDGE TAIPAN**

The article substantiates the urgency of designing new solutions for temporary bridges and presents the general constructive scheme of TAIPAN bridges designed by specialists of Taipan LLC and SGUPS. Considered the calculation of a cylindrical element (pin) working on the shearing and crumple of joined elements according to SP 35.13330.2011 and its finite-elemental calculation taking into account the plastic properties of the material. As a result of the study, a refinement coefficient is established, which should be used in calculations of articulated fasteners. Confirmation of the validity of the theoretical part of the study and numerical modeling (finite-elemental calculations) was a high degree of correlation between the theoretical and experimental values given in the final part of the article.

**К e y w o r d s:** TAIPAN, bridge, temporary, collapsible, pin, tests.

## **REFERENCES**

1. Bailey bridge. Headquarters department of the army. Washington, 1986. 373 p.
2. Dianov N.P., Milorodov Yu.S. Tabel'nye avtodorozhnye razbornye mosty: uchebnoe posobie [Roadway collapsible bridges: textbook]. MADI (GTU). Moscow, 2009. 236 p. (in Russian)
3. Kruchinkin A.V. Sborno-razbornye vremennye mosty [Prefabricated temporary bridges]. Moscow, Transport, 1987. 191 p. (in Russian)

4. Bokarev S.A., Protsenko D.V. O predposylkakh sozdaniya novykh konstruktsiy vremennykh mostovykh sooruzheniy [On the prerequisites for the creation of new structures for temporary bridge structures]. Internet-zhurnal «Naukovedenie» [Internet-journal «Naukovedenie»]. 2014. 11 p. (in Russian)
  5. Gorodetskiy A.S., Zovorskii V.I., Lantukh-Lyashchenko A.I., Rasskazov A.O. Metod konechnykh elementov v proektirovani transportnykh sooruzheniy [The finite element method in the design of transport structures]. Moscow, Transport, 1981. 143 p. (in Russian)
  6. Protsenko D.V., Pakhomov D.N., Sharshov R.A. Sborno-razbornyy most TAYPAN mnogokratnogo primeniya [Collapsible bridge TAIPAN multiple use]. Vestnik mostostroeniya [Bulletin of Bridge Construction]. 2014. No. 1. Pp. 60–68. (in Russian)
  7. Il'yushin A.A. Plastichnost' [Plastic]. Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1963. 376 p. (in Russian)
  8. Potapkin A.A. Teoriya i raschet stal'nykh i zhelezobetonnykh mostov na prochnost' s uchetom nelineynykh i plasticheskikh deformatsiy [Theory and calculation of steel and reinforced concrete bridges for strength, taking into account nonlinear and plastic deformations]. Moscow, Transport, 1972. 192 p. (in Russian)
  9. Rumshiskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimentov [Mathematical processing of experimental results]. Moscow, Science, 1971. 192 p. (in Russian)
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.542 : 620.18

А.И. ГНЫРЯ, Ю.А. АБЗАЕВ, С.В. КОРОБКОВ, А.П. БОЯРИНЦЕВ,  
Д.И. МОКШИН, К.С. ГАУСС

### ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ\*

Проведено комплексное исследование количественного фазового состава методом Ритвельда, модельное описание решеток фаз портландцемента в зависимости от времени изотермического твердения (0–43 ч) при температуре 50 °С. Было установлено, что на дифрактограммах портландцемента обнаруживается высокая доля кристаллической составляющей, которая определяется вкладом в интенсивность клинкерных фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$ . В решетках фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  учтено присутствие атомов водорода. Показано, что в процессе гидратации участвует в основном фаза Alite, доля которой заметно снижается за указанный период, растворение  $O_{16}Si_4Ca_8$  происходит менее интенсивно, что связано с более высокой энергией связи атомов в решетке. Поверхностное растворение атомов  $O_{16}Si_4Ca_8$  происходит с большей энергоемкостью по сравнению с растворением атомов решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ . Комплексный подход позволил установить, что в процессах гидратации не участвуют объемные структуры клинкерных фаз. Показано, что решетки перечисленных фаз находятся в высокостабильном состоянии и с ростом времени твердения наблюдается тенденция к повышению энергии связи. Высокий уровень энергии связи атомов свидетельствует, что растворение происходит в приповерхностных областях соприкосновения твердой и жидкой фаз. В интервале стабильности решеток допускается некоторое перераспределение атомов внутри решеток фаз, а также вариация числа атомов в ячейках.

**Ключевые слова:** цементный камень, метод Ритвельда, параметры решетки, кристаллическое строение, количественный фазовый анализ.

**Введение.** Минерал Alite или силикат кальция ( $C_3S$ ) является основным компонентом портландцемента, который в процессе гидратации превращается в гидросиликат кальция ( $C-S-H$ ), а также, возможно, портландит ( $Ca(OH)_2$ ). На ранних стадиях твердения недонасыщенность содержания элементов в водном растворе, которая связана с сокращением площади ре-

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (проект НШ-8780.2016.8).

© Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., 2017

активной поверхности  $C_3S$ , приводит к замедлению роста  $C-S-H$  [1]. На рост  $C-S-H$  оказывает существенное влияние также соотношение элементов  $Ca/Si$ , которое должно быть не менее чем 1,45. Для Alite это требование полностью выполнено (1,75) [2]. Концентрация  $C_3S$  в процессе гидратации уменьшается [2, 3] немонотонным образом. Период интенсивного взаимодействия цемента и воды продолжается в течение 14 ч [4], а затем наблюдается период существенного замедления реакций, продолжающийся в течение длительного времени. В интервале температур 25–99 °C химические процессы при гидратации портландцементов мало различаются [5]. В работе [6] отмечается, что микроструктура  $C_3S$  при гидратации представляет собой комбинацию как прореагировавших  $Ca_3SiO_3$ ,  $Ca(OH)_2$ , так и непрореагировавших с водой фаз системы  $C-H-S$ . Система рефлексов на рентгеновских дифрактограммах портландцементов определяется когерентным излучением от кристаллических фаз, в основном  $C_3S$  и также  $C_2S$ , интенсивность растворения которого замедлена по сравнению с  $C_3S$ . В начальный период твердения зародыши гидросиликата кальция находятся в аморфном состоянии [4], интенсивность отраженного излучения фазы  $C-S-H$  на дифрактограммах представляется малоинтенсивной с широко растянутыми рефлексами, которые могут вносить существенный вклад только в фоновое излучение. И, следовательно, идентификация  $C_3S$  не будет осложнена вкладом в интегральную интенсивность от основного продукта гидратации ( $C-S-H$ ) в начальный период твердения. В литературе [7] модельный анализ структурных свойств  $C_3S$  ограничивается в рамках молекулярной динамики (МК) без учета стабильности решеток. Представляет определенный интерес изучение структуры твердеющего минерала  $C_3S$  в составе портландцемента как дифракционными методами, так и модельными оценками стабильности структуры из первых принципов. Полученные результаты позволят подтвердить или опровергнуть механизм поверхностного растворения  $C_3S$  в процессе гидратации по данным о стабильности решеток и вариации структурных параметров как внедренными атомами водорода, так и без внедрения.

Целью настоящей работы является исследование количественного содержания фаз гидратированного цементного камня (портландцемента) в зависимости от времени изотермического твердения в интервале 0–43 ч при температуре 50 °C методом Ритвельда, исследование структурных параметров решеток основных фаз цементного камня с учетом их стабильности в зависимости от времени твердения.

Выбор данной температуры определяется, прежде всего, тем, что он соответствует интервалу температур технологического прогрева бетонов, в котором гидратированный портландцемент оказывается связующим, а также ускоренными механизмами процесса гидратации портландцемента по сравнению с комнатной температурой. Температура 50 °C наиболее оптимальна при электротермообработке бетонов в зимних условиях.

**Методика эксперимента.** Объектом исследования является портландцемент класса Цем I 42,5Б по ГОСТ 31108–2003 «Цементы общестроительные. Технические условия» (ПЦ 500-Д0 по ГОСТ 10178–85), не содержащий минеральных добавок, производитель – ООО «Топкинский цемент», г. Топки Кемеровской области.

Минералогический и химический состав цемента, а также методика проведения цемента описаны в работе [8].

Рентгеноструктурные исследования плоских граней цементного камня проводились на рентгенофазовом дифрактометре ДРОН4–07 (Россия), который был модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съемки производились на медном излучении ( $\text{CuK}_\alpha$ ) по схеме Брегга–Бретано с шагом  $0,02^\circ$ , временем экспозиции в точке 1 с и в угловом диапазоне  $16\text{--}81^\circ$ . Напряжение на рентгеновской трубке составляло 30 кВ, ток пучка 25 мА. Образцы портландцемента с гладкими поверхностями закреплялись в вертикальном положении в стандартном держателе дифрактометра.

Боковые грани образцов портландцемента находились в состоянии, которое было удовлетворительным для проведения рентгеновских съемок. Для исключения внесения артефактов они не подвергались дополнительному механическому шлифованию. Качественный фазовый анализ портландцемента, проведенный в trial версии Match [9], показал, что к доминирующему эталонным фазам относятся Alite ( $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$ , номер карточки 96-154-0705) и  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  (номер карточки 96-901-2791), которые были определены из открытой базы COD [10]. Предполагалось, что в гидратационных процессах интенсивнее участвуют Alite, Belite [4], и предполагалось также, что фаза  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  изоморфна Belite. Перечисленные фазы были использованы в дальнейшем для количественного фазового анализа (КФА). В эталонных решетках Alite и  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  отсутствуют атомы водорода. Однако в процессе твердения фазы гидратированного портландцемента представляют собой систему модифицированных кристаллических решеток Alite и  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  с возможным внедрением атомов водорода. Поэтому для эталонных решеток была проведена процедура внедрения атомов H в программном комплексе TOPOS [11] без потери класса симметрии. Количественный фазовый анализ (КФА) портландцемента проводился на основе метода Ритвельда [12]. В методе Ритвельда минимизируется нелинейным методом наименьших квадратов относительная разность экспериментальной и интегральной интенсивности ( $I_A$ ) отдельных эталонных фаз ( $I_p$ ) в зависимости от вариации профильных, инструментальных, анизотропии, фона и т.д. Интенсивность фонового излучения на дифрактограммах аппроксимировалась многочленом 20-й степени. Интегральная интенсивность ( $I_A$ ) рентгеновского отражения модельных фаз оценивалась самосогласованным образом. В методе представляется возможным оценить уточненные структурные параметры решеток Alite,  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  относительно эталонных значений. Подробные детали расчетов приведены в [9]. Результаты расчетов параметров структур Alite,  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  в зависимости от времени твердения приведены в табл. 1.

Стабильность решеток Alite и  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  оценивалась по формуле

$$\Delta E = E_c - \left( \frac{n_{cO}}{8} \times E_O + \frac{n_{cH}}{4} \times E_H + \frac{n_{cCa}}{4} \times E_{Ca} + \frac{n_{cSi}}{8} \times E_{Si} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta E$  – энергия смешения решетки, эВ;

$E_c$  – энергия решетки;

$-\Delta E$  – энергия связи, эВ.

**Таблица 1. Структурные параметры, доля интенсивностей фаз  $I_p$ ,  $I_A$**

$t$ , часы	Фаза	$a$ , ( $\text{\AA}$ )	$b$ , ( $\text{\AA}$ )	$c$ , ( $\text{\AA}$ )	$\alpha$ , (град.)	$\beta$ , (град.)	$\gamma$ , (град.)	$V$ , ( $\text{\AA}^3$ )	$I_p$ , %	$R_{wp}$ , %	$I_A$ , %
0	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,1997	7,0432	9,2557	90,00	116,09	90,00	714,22	73,12	9,99	92,3
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,5151	6,8101	9,3039	90,00	94,17	90,00	348,51	19,20		
3	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,2182	7,0651	9,2796	90,00	116,13	90,00	719,13	66,07	10,64	90,5
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,4972	6,7607	9,3384	90,00	94,73	90,00	345,88	24,55		
6	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,2228	7,0727	9,2786	90,00	116,09	90,00	720,37	70,93	13,06	87,8
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,4899	6,7495	9,2926	90,00	93,55	90,00	343,67	16,82		
19	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,2558	7,0510	9,2754	90,00	116,00	90,00	720,38	49,79	13,35	90,5
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,4664	6,7788	9,3521	90,00	94,71	90,00	345,38	40,83		
30	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,1609	6,9894	9,1538	90,00	115,73	90,00	700,87	60,37	11,96	92,6
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,43601	6,8336	9,2846	90,00	95,17	90,00	343,49	32,32		
43	$\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$	12,3386	7,0884	9,0876	90,00	115,65	90,00	716,44	36,74	14,12	89,04
	$\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$	5,4956	7,0106	9,24918	90,00	94,23	90,00	355,375	52,32		

Приимечание:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры решетки в Ангстремах ( $1\text{\AA} = 10^{-10}$  м);  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – углы решетки в градусах;  $V$  – объем решетки =  $a \cdot b \cdot c$ .

Для оценки энергий элементов О, Н, Ca, Si использовались эталоны из COD [10]. Было установлено, что  $E_{\text{O}} = -3269,862$  эВ;  $E_{\text{H}} = -55,405$  эВ,  $E_{\text{Ca}} = -4006,140$  эВ,  $E_{\text{Si}} = -858,155$  эВ – энергии кристаллических решеток «чистых» элементов О, Н, Ca, Si.

Детали расчетов стабильности решеток из первых принципов приведены в [13]. Объем решеток определялся по формуле объема наклонных параллелепипедов

$$V = a \cdot b \cdot c \sqrt{(\sin \alpha)^2 \cdot (\sin \gamma)^2 - [\cos \beta - \cos \gamma \cdot \cos \alpha]^2}, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – структурные параметры, указанные в табл. 1.

**Обсуждение результатов исследований.** На рис. 1–6 приведены дифрактограммы цементного камня исследуемых состояний. На дифрактограммах указаны экспериментальная (1) и теоретическая интенсивности (2) отраженного рентгеновского излучения, их разность (3), а также дифрактограммы модельных фаз  $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$  (4),  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  (5) в зависимости от угла отражения.

Теоретическая интенсивность рассчитывалась методом Ритвельда на основе суперпозиции интенсивностей отдельных фаз в результате полнопрофильного уточнения инструментальных, профильных структурных параметров решеток фаз [13].

Результаты КФА методом Ритвельда всех исследуемых состояний гидратированного портландцемента в зависимости от времени твердения, доля вкладов интенсивности рентгеновского излучения отдельных фаз приведены в табл. 1 ( $R_{wp}$ , %). При моделировании КФА методом Ритвельда была достигнута удовлетворительная полнопрофильная сходимость расчетных инте-

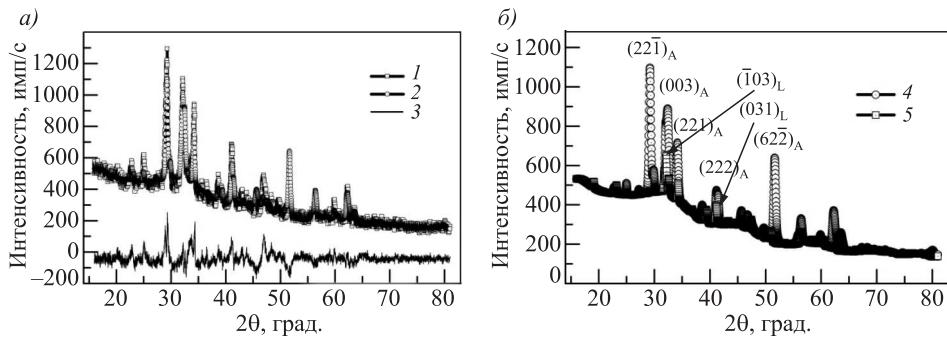


Рис. 1. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 0 ч

а – 1 – экспериментальная, 2 – теоретическая дифрактограмма, 3 – разность интенсивностей;  
б – 4, 5 – модельные дифрактограммы фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  и  $O_{16}Si_4Ca_8$  соответственно

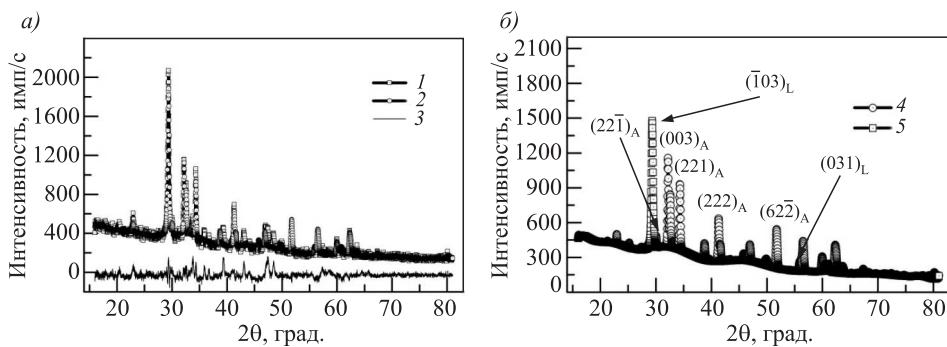


Рис. 2. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 3 ч

Усл. обозн. см. на рис. 1

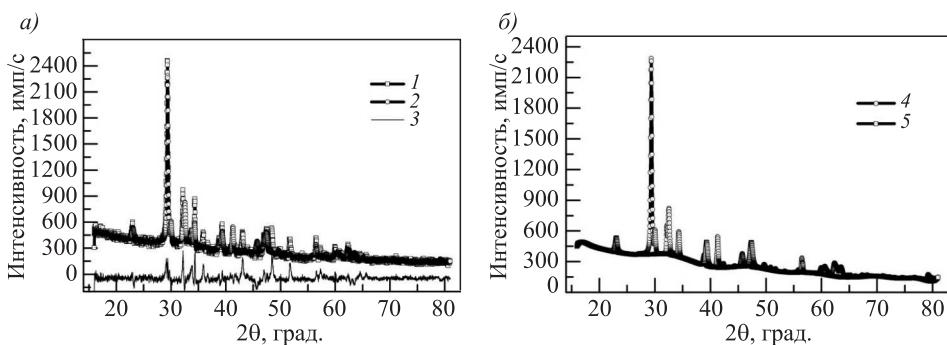


Рис. 3. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 6 ч

Усл. обозн. см. на рис. 1

гральных интенсивностей к экспериментальным дифрактограммам. Анализ показал, что вклады в интенсивность от фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  исследуемых состояний оказываются определяющими. Качественное (см. рис. 1–6, б) и количественное сравнение ( $I_A$ , см. табл. 1, рис. 1–6, а, кривая 3)

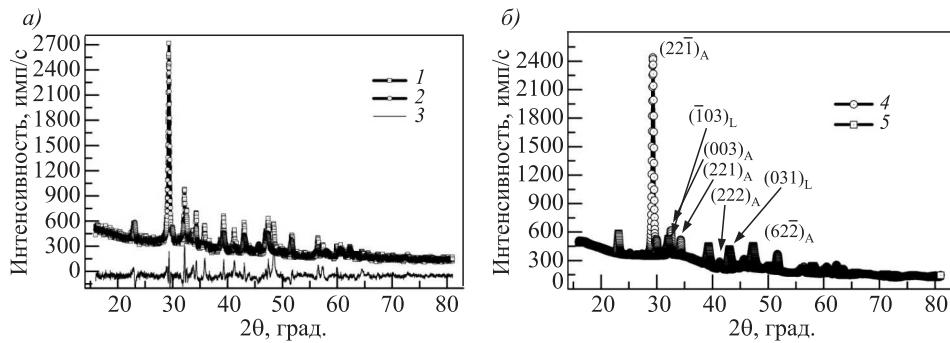


Рис. 4. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 19 ч  
Усл. обозн. см. на рис. 1

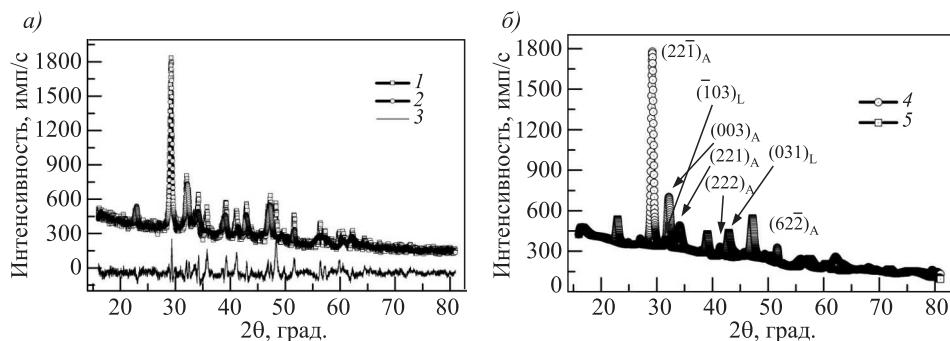


Рис. 5. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 30 ч  
Усл. обозн. см. на рис. 1

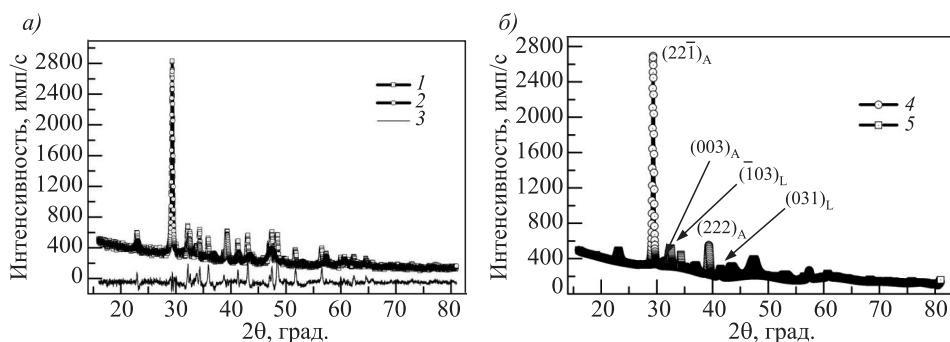


Рис. 6. Дифрактограммы цементного камня при температуре 50 °С и при времени твердения 43 ч  
Усл. обозн. см. на рис. 1

экспериментальных дифрактограмм с теоретическими интенсивностями показывает их удовлетворительное согласие. Суммарная доля вкладов ( $I_A$ , табл. 1) при 6 ч гидратации совпадает с 87,8 % и существенно превышает это значение при других значениях времени (рис. 1–6, а, табл. 1), что свидетельствует о доминирующем содержании фаз  $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$ ,  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  в исследованных состояниях портландцемента. В исследуемый период

доля продуктов гидратации в кристаллической составляющей оказывается незначительной. Результаты КФА отдельных фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  приведены в табл. 1 ( $I_p$ ). Доминирующим вкладом в интегральную интенсивность оказывается вклад от фазы  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  (Alite) при всех значениях времени за исключением 43 ч (табл. 1). После 30 ч гидратации растворение решеток Alite ускоряется. В данной работе методом Ритвельда производилось уточнение параметров структур фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$ . Результаты уточнения параметров приведены в табл. 1, а также расчетов геометрических объемов, найденных по формуле (2). Количественное содержание фаз методом Ритвельда позволило установить, что доля основных фаз в некоторой степени варьируется с изменением времени твердения. В начальный момент после замеса фаза  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  оказывается доминирующей, и в процессе твердения наблюдается перераспределение доли фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  и  $O_{16}Si_4Ca_8$  между собой. Доминирование фазы  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  с максимальным содержанием атомов H свидетельствует о том, что насыщение Alite водородом после 3 ч замеса оказывается завершенным процессом. С увеличением времени твердения наблюдается тенденция к росту доли фазы, что согласуется с литературными данными [3, 4]. Фаза  $O_{16}Si_4Ca_8$  растворяется менее интенсивно по сравнению с Alite. С ростом времени твердения наблюдается тенденция к росту объема решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  за счет сжатия вдоль вектора  $c$  и расширения размеров в плоскости векторов  $a$ ,  $b$ . Объем решетки  $O_{16}Si_4Ca_8$  уменьшается вследствие также сжатия вдоль вектора  $c$ . Для фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  и  $O_{16}Si_4Ca_8$  с ростом времени твердения наблюдается тенденция к незначительному росту объема решетки. Предполагается, что внедрение атомов H в процессе гидратации может привести к дестабилизации кристаллических решеток фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$ . Установлено, что максимальное число внедренных атомов H в решетку  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  равно 3. А в решетке  $O_{16}Si_4Ca_8$  запрещено внедрение атомов H без нарушения класса симметрии. Необходимо отметить, что в работе методом Ритвельда были определены также уточненные координаты атомов в решетках исследованных состояний. Однако из-за большого объема данных эти результаты не приводятся.

Представляется актуальной квантово-механическая оценка энергии решеток фаз цементного камня с целью определения стабильности по отношению к расслоению на фазы чистых элементов Ca, O, H<sub>2</sub> и Si. Расчеты стабильности решеток производились по формуле (1). В формуле (1) 8, 4, 4, 8 – это число атомов в решетках чистых элементов, а  $n_{cO} = 30$ ,  $n_{cH} = 6$ ,  $n_{cCa} = 18$ ,  $n_{cSi} = 6$  – число атомов в решетке  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  портландцемента в исследуемых состояниях. Предварительно была оценена стабильность решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ , насыщенной разным количеством атомов H. Было установлено, что энергия решеток  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  с двумя, одним и без атомов водорода H равна  $E_c = -31916,484$ ;  $-31892,1895$ ;  $-31868,083$  эВ соответственно. Все перечисленные решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  оказываются стабильными с энергией связи, равной 189,547; 192,955; 196,55 эВ соответственно. Максимально возможное внедрение атомов H в процессе гидратации приводит к снижению энергии связи атомов в решетке  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ . Результаты расчетов энергии решеток и стабильности  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  приведены в табл. 2, а также на рис. 7.

Таблица 2. Энергия и стабильность решеток основных фаз  $E$ , эВ

Показатель	Фаза	0 ч	3 ч	6 ч	19 ч	30 ч	43 ч
$E_c$ , эВ	$H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$	-31942,255	-31942,774	-31942,893	-31942,896	-31940,660	-31942,018
	$O_{16}Si_4Ca_8$	-15478,472	-15478,263	-15478,097	-15478,130	-15477,846	-15478,405
$\Delta E$ , эВ	$H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$	187,616	188,135	188,254	188,257	186,021	187,379
	$O_{16}Si_4Ca_8$	497,391	497,181	497,016	497,049	496,764	497,323

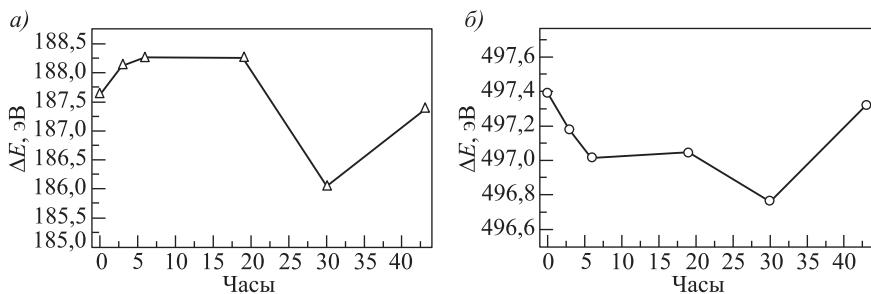


Рис. 7. Энергия связи атомов в решетках  
а –  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ; б –  $O_{16}Si_4Ca_8$

Отрицательные значения энергии решеток означают, что решетки находятся в метастабильном состоянии. Из приведенных результатов видно, что с увеличением содержания атомов Н энергия решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  возрастает, стабильность решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ , наоборот, понижается. Нужно заметить также, что в работе был проведен анализ КФА гидратированного портландцемента с модельными решетками и с различным содержанием атомов водорода. Было обнаружено, что вклад в интегральную интенсивность решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  без атомов Н практически совпадает с вкладом, приведенным в табл. 1 примерно до 30 ч твердения. При 30 и 43 ч твердения вклад от  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  без атомов Н оказывается существенно меньше значений, приведенных в табл. 1. Полученные результаты указывают, что энергия связи фазы  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  склонна к росту с увеличением времени твердения при температуре  $T = 50$  °С примерно до 19 ч твердения, а для решетки  $O_{16}Si_4Ca_8$  наблюдается противоположная тенденция. Из приведенных данных следует, что решетка  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  менее стабильна по сравнению с  $O_{16}Si_4Ca_8$ . Можно полагать, что основные фазы цементного камня в процессе изотермического твердения стабилизируются. Как видно из данных табл. 2, энергии связи решеток разных состояний оказываются сравнительно большими, что свидетельствует о том, что решетки находятся в высокостабильных состояниях. Следовательно, в интервале стабильности допускается некоторое пространственное перераспределение отдельных атомов Ca, H, O, Si внутри решеток, а также некоторый рост объема решеток за исследуемый период твердения портландцемента. Полученные результаты свидетельствуют также о том, что в процессах растворения фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  не участвуют внутри объемные структуры, даже если в них внедрены отдельные атомы водорода. Растворение происходит на поверхности клинкерных фаз. Из анализа ста-

бильности решеток фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$  следует, что поверхностное растворение атомов  $O_{16}Si_4Ca_8$  оказывается более энергоемким процессом по сравнению с растворением атомов  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ .

**Выводы.** Количественный фазовый анализ методом Ритвельда и модельное описание решеток фаз позволило установить ряд новых результатов. Установлено, что на дифрактограммах портландцемента, гидратированного до 43 ч, обнаружена высокая доля кристаллической составляющей, которая определяется вкладом клинкерных фаз  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ ,  $O_{16}Si_4Ca_8$ . В указанный период доля продуктов гидратации в кристаллической составляющей оказывается незначительной. Установлено, что в процессе гидратации участвует в основном фаза Alite, доля которой заметно снижается за указанный период. Обнаружено также, что максимально возможное внедрение атомов водорода в решетку Alite приводит к некоторому снижению энергии связи атомов, однако не приводит к заметному снижению стабильности. Установлено, что внедрение атомов H невозможно в решетку  $O_{16}Si_4Ca_8$  без нарушения исходного класса симметрии. Определена полная структурная информация решеток клинкерных фаз: уточнены структурные параметры решеток, координаты атомов и их занятость в узлах во всех исследованных состояниях. Комплексный подход позволил установить, что в процессах гидратации не участвуют объемные структуры клинкерных фаз. Ожидается, что растворение происходит в приповерхностных областях соприкосновения твердой и жидкой фаз. Поверхностное растворение атомов решетки  $O_{16}Si_4Ca_8$  происходит с большей энергоемкостью по сравнению с растворением атомов решетки  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$ , следовательно, поверхностное растворение в  $H_6O_{30}Si_6Ca_{18}$  происходит с большей интенсивностью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nicoleau L., Nonat A. A new view on the kinetics of tricalcium silicate hydration // Journal of Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 86. P. 1–11.
2. Lothenbach B., L'Hôpital E., Nied D., Achiedo G., Dauzères A. Magnesium and calcium silicate hydrates // Journal of Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 77. P. 60–68.
3. Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F.P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement // Journal of Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 1. P. 1–18.
4. Bergold S.T. The process of alite hydration: Implications from quantitative phase analysis of Calcium-Silicate-Hydrate during hydration and from acceleration of the hydration reaction by mechanical activation: dissertation der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 22.04.2016. 130 p.
5. Richardson J.G. Model structures for C-(A)-S-H(I) // Journal of Acta Crystallographica. 2014. B70. No. 6. P. 903–923.
6. Shasavari R., Buehler M.J., Pelling R. J.-M., Ulm F.-J. First-Principles Study of Elastic Constants and Interlayer Interactions of Complex Hydrated Oxides: Case Study of Tobermorite and Jennite // Journal of American Ceramic Society. 2009. Vol. 92(10). P. 2323–2330.
7. Tavakoli D., Tarighat A. Molecular dynamics study on the mechanical properties of Portland cement clinker phases // Journal of Computational Materials Science. 2016. Vol. 119. P. 65–73.

8. Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Бояринцев А.П. Влияние длительности низкотемпературного твердения на структуру цементного камня // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 5. С. 49–58.
9. Абзаев Ю.А., Саркисов Ю.С., Клопотов А.А., Клопотов В.Д., Афанасьев Д.А. Полнопрофильный рентгеноструктурный анализ клинкерного минерала  $C_4AF$  // Вестн. ТГАСУ. 2012. № 4. С. 200–209.
10. Crystallography Open Database. URL: <http://www.crystallography.net> (дата обращения: 17.01.2017).
11. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Serezhkin V.N. TOPOS 3.2: a new version of the program package for multipurpose crystal-chemical analysis // Applied Crystallography. 2000. Vol. 33. No. 4. P. 1193.
12. Абзаев Ю.А., Копаница Н.О., Клименов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Демьяненко О.В., Завьялов А.П. Моделирование структурного состояния аморфного таркосила // Вестн. ТГАСУ. 2015. № 3 (50). С. 121–133.
13. Абзаев Ю.А., Старostenkov М.Д., Клопотов А.И. Первопринципные расчеты концентрационной зависимости упругих модулей в монокристаллах  $Ni_3(Ge_{1-x}, Al_x)$  // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 1. С. 56–62.

**Гныря Алексей Игнатьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Абзаев Юрий Афанасьевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: abzaev@tsuab.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Коробков Сергей Викторович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: korobkov\_1973@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Бояринцев Александр Павлович**, доц.; E-mail: plus2001@rambler.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Мокшин Дмитрий Ильич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: mokshin@sibmail.com

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Гаусс Ксения Сергеевна**, ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 25.07.17

**Gnyrya Aleksey Ignat'evich**, DSc, Professor; E-mail: tsp\_tgasu@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Abzaev Yuriy Afanas'evich**, DSc, Professor; E-mail: abzaev@tsuab.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Korobkov Sergey Viktorovich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: korobkov\_1973@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Boyarinsev Aleksandr Pavlovich**, Ass. Professor; E-mail: plus2001@rambler.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Mokshin Dmitriy Il'ich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: mokshin@sibmail.com

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Gauss Kseniya Sergeevna**, Assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## **INFLUENCE OF TIME AND INCREASED TEMPERATURE ON STRUCTURAL CREATION OF CEMENT STONE**

The paper presents a comprehensive study of the quantitative phase composition of Portland cement using the Rietveld refinement technique, a model description of its phases

depending on the curing time (0–43 h) at isothermal temperature of 50 °C. The diffraction patterns of Portland cement demonstrate a large amount of crystalline component which is determined by the contribution of  $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$  and  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  clinker phases to the intensity. We consider the presence of hydrogen atoms in crystal lattices of  $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$  and  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  phases. It is shown alite phase is most of all involved in the hydration process the amount of which significantly reduces during this period, and the dissolution of  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  phase occurs less intensively due to the higher atomic-binding energy in the crystal lattice. The energy-intensity of dissolution of  $\text{O}_{16}\text{Si}_4\text{Ca}_8$  surface atoms is higher than that of  $\text{H}_6\text{O}_{30}\text{Si}_6\text{Ca}_{18}$  atoms in the crystal lattice. A comprehensive study of the quantitative phase composition of Portland cement shows that the bulk structures of clinker phases are not involved in the process of hydration. Experiments demonstrate that the crystal lattices of these phases are highly stable, and their binding energy tends to increase with the rise in curing time. The atomic-binding energy in crystal lattices of alite and larnite ranges within (187,379...187,616) and (496,764...497,016) eV, respectively. A high level of the atomic-binding energy indicates to the dissolution occurring at the interface between the solid and liquid phases. A certain atomic re-arrangement inside the crystal lattices can be accepted within the interval of stability as well as a variation of the number of atoms in unit cells.

**К e y w o r d s:** cement stone, Rietveld method, lattice parameters, crystal structure, quantitative phase analysis.

## REFERENCES

1. Nicoleau L., Nonat A. A new view on the kinetics of tricalcium silicate hydration. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 86. Pp. 1–11.
2. Lothenbach B., L'Hôpital E., Nied D., Achiedo G., Dauzères A. Magnesium and calcium silicate hydrates. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 77. Pp. 60–68.
3. Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F.P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. No. 1. Pp. 1–18.
4. Bergold S.T. The process of alite hydration: Implications from quantitative phase analysis of Calcium-Silicate-Hydrate during hydration and from acceleration of the hydration reaction by mechanical activation: Dissertation der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 22.04.2016. 130 p.
5. Richardson J.G. Model structures for C-(A)-S-H(I). *Journal of Acta Crystallographica*. 2014. B70. No. 6. Pp. 903–923.
6. Shasavari R., Buehler M.J., Pelling R. J.-M., Ulm F.-J. First-Principles Study of Elastic Constants and Interlayer Interactions of Complex Hydrated Oxides: Case Study of Tobermorite and Jennite. *Journal of American Ceramic Society*. 2009. Vol. 92(10). Pp. 2323–2330.
7. Tavakoli D., Tarighat A. Molecular dynamics study on the mechanical properties of Portland cement clinker phases. *Journal of Computational Materials Science*. 2016. Vol. 119. Pp. 65–73.
8. Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Gauss K.S., Boyarinsev A.P. Vliyanie dlitel'nosti nizkotemperaturnogo tverdeniya na strukturu tsementnogo kamnya [Influence of the long-temperature solidity duration on structure of cement stone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 5. Pp. 49–58. (in Russian)

9. Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Klopotov A.A., Klopotov V.D., Afanas'ev D.A. Polnoprofil'nyy rentgenostrukturnyy analiz klinkernogo minerala C<sub>4</sub>AF [Full profile X-ray structure analysis of clinker mineral C<sub>4</sub>AF]. Vestnik TGASU [Vestnik TSUAB]. 2012. No. 4. Pp. 200–209. (in Russian)
10. Crystallography Open Database. Available at URL: [www.crystallography.net](http://www.crystallography.net) (date of access: 17.01.2017).
11. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Serezkin V.N. TOPOS 3.2: a new version of the program package for multipurpose crystal-chemical analysis. Applied Crystallography. 2000. Vol. 33. No. 4. P. 1193.
12. Abzaev Yu.A., Kopanitsa N.O., Klimenov V.A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Dem'yanenko O.V., Zav'yalov A.P. Modelirovaniye strukturnogo sostoyaniya amorfogo tarkosila [Structural state modeling of amorphous tarkosil]. Vestnik TGASU [Vestnik TSUAB]. 2015. No. 3(50). Pp. 121–133. (in Russian)
13. Abzaev Yu.A., Starostenkov M.D., Klopotov A.I. Pervoprintsipyne raschety kontsentratsionnoy zavisimosti uprugikh moduley v monokristallakh Ni<sub>3</sub>(Ge<sub>1-x</sub>, Al<sub>x</sub>) [Ab-initio calculations of concentration dependences of elastic parameters in monocrystals Ni<sub>3</sub>(Ge<sub>1-x</sub>, Al<sub>x</sub>)]. Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya [Journal of Basic Problems of Material Science]. 2014. Vol. 11. No. 1. Pp. 56–62. (in Russian)

УДК 624.131.001.4

В.А. ВЛАСОВ, В.Н. ЛУКАШЕВИЧ, О.Д. ЛУКАШЕВИЧ, И.В. ВАКС

**РАДИОИЗОТОПНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ  
СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ  
В ПАСТАХ И ШЛАМАХ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ  
В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Актуальность исследования предопределена имеющимися затруднениями в использовании отдельных многотоннажных отходов и побочных продуктов промышленности в виде паст, шламов, мастик в дорожном строительстве, связанными с нестабильностью их состава. Целью исследования являлась разработка метода оперативного контроля содержания минеральной составляющей в пастах, шламах, мастиках для мгновенного реагирования на процесс дозирования этих материалов, что очень важно в связи с их довольно нестабильным составом. Изложены результаты работ по определению возможности контроля концентрации минеральных примесей в пастах и шламах с использованием радиоизотопного метода. Приведена принципиальная схема устройства для контроля зольности паст и шламов радиоизотопным методом. Экспериментальные исследования выполнены с использованием пастообразного вещества – сланцевых фусов, содержащих различное количество минеральных примесей. Получен график зависимости скорости регистрируемых импульсов от содержания минеральных примесей в пастообразном веществе – сланцевых фусах. Результаты исследования показали, что радиоизотопный метод обеспечивает необходимую для практических целей степень точности определения содержания минеральной составляющей в пастах и шламах при их использовании в дорожном строительстве.

**Ключевые слова:** радиоизотопы,  $\gamma$ -излучение, шламы, пасты, фусы, минеральные примеси, горючие сланцы, асфальтобетонная смесь, органоминеральные смеси.

В настоящее время, несмотря на бурное развитие и совершенствование технологий, в результате работы промышленности, происходит образование и накопление тысяч тонн отходов и побочных продуктов, в составе которых содержатся масла, смолы, силикаты и алюмосиликаты кальция, магния, калия и натрия. Все эти материалы хранятся в шламохранилищах, фусохранилищах, шлако- и золоотвалах. Нарушения, допускаемые в процессе хранения этих материалов, приводят к загрязнению окружающей среды, что заставляет общество решать вопросы по утилизации отходов и побочных продуктов промышленности. Одним из направлений утилизации высокотоннажных побочных продуктов и отходов различных отраслей промышленности является их использование в строительстве. Особый интерес при этом представляют отходы производства и побочные продукты, содержащие органические вещества – смолы, масла, битумы, которые содержат химически активные вещества и могут участвовать в процессах формирования структуры строительных материалов.

---

© Власов В.А., Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Вакс И.В., 2017

Вместе с тем в современных условиях к строительным материалам и конструкциям предъявляются все более жесткие требования по качеству, эксплуатационным свойствам, по долговечности. Но отходы и побочные продукты промышленности являются преимущественно неоднородными и многокомпонентными системами, применение которых в строительстве может повлечь за собой изменения показателей технологических и физико-механических свойств материалов, изготавливаемых с их применением. Для исключения отклонений показателей технологических и физико-механических свойств строительных материалов от заданных значений необходимо четко знать состав используемого отхода или побочного продукта и обеспечить его точное дозирование в соответствии с этим составом.

В данной работе приведены результаты исследования возможности определения радиоизотопными методами содержания минеральных примесей в отходах и побочных продуктах, образующихся в результате переработки нефти, каменных углей, горючих сланцев – в нефтяных шламах, пастах, сланцевых, каменноугольных и битумных фусах. Поскольку эти материалы содержат масла, смолы, битумы, они могут успешно применяться в строительной отрасли для модификации поверхностей минеральных материалов, снижения пористости и битумоемкости порошкообразных отходов промышленности и т.д. [1].

Исследования проводились на высокотоннажных отходах сланцеперерабатывающей промышленности – сланцевых фусах. Это связано с тем, что горючим сланцам принадлежит большое будущее. И роль их возрастает пропорционально повышению дефицитности нефти и продуктов ее переработки. И по мере уменьшения запасов нефти все большее внимание уделяется горючим сланцам. Запасы горючих сланцев на земном шаре составляют 449 трлн т [2]. Они представляют собой горную породу осадочного происхождения, состоящую из сплошной органической и минеральной уплотненной смеси, образовавшейся в результате метаморфизма ила (сапропеля) [3]. Наиболее крупные месторождения горючих сланцев расположены в США. Запасы горючих сланцев в России превышают 1 914 880 млн т, в которых содержится более 167 830 млн т сланцевой смолы [2].

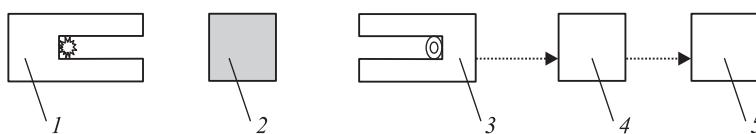
Переработка горючих сланцев производится путем сухой перегонки в печах внешнего и внутреннего обогрева. Печи с внутренним теплоносителем (газогенераторы) в настоящее время получили наибольшее распространение. Цель переработки горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах – получение газа и сланцевой смолы. Технологический процесс получения целевых продуктов сопровождается образованием отходов производства в виде сланцевых фусов, представляющих собой пастообразную смесь сланцевой смолы, минеральных примесей (15–80 %) и воды (5–10 % по массе). Выход сланцевых фусов только на одном сланцеперерабатывающем заводе «Сланцы» в различные годы достигал 30 тыс. т. В настоящее время на СПЗ легкие фусы частично сжигаются в газогенераторах. Средние и тяжелые фусы, количество которых достигает 98 % от общего выхода, поступают в фусохранилище. Использование фусов в дорожном строительстве позволит отказаться от устройства фусохранилищ, исключая тем самым загрязнение окружающей среды.

Анализ сланцевой смолы, содержащейся в фусах, показывает, что в ее составе преобладают нейтральные кислородные соединения, фенолы и карбоновые кислоты [4–6]. Именно наличие нейтральных кислородных соединений, состоящих преимущественно из простых эфиров, кетонов, а также фенолов и кислот, являющихся производными бензольного ряда, предопределяет повышенную реакционную способность смол и свидетельствует о целесообразности применения сланцевых фусов для модифицирования поверхности минеральных материалов. Например, применение сланцевых фусов в асфальтобетонных смесях повышает адгезию нефтяного битума к поверхности минеральных материалов, снижает интенсивность старения асфальтобетонных покрытий. А содержащиеся в составе фусов минеральные примеси могут полностью или частично заменять минеральный порошок в асфальтобетонных смесях [7]. Однако при этом необходимо четко контролировать содержание в фусах сланцевой смолы, поскольку избыточное ее количество может снизить вязкость нефтяного битума, что отрицательно скажется на водостойкости асфальтобетонного покрытия, приведет к уменьшению его сдвигостойчивости.

Сланцевые фусы состоят из сланцевой смолы, минеральных примесей и воды. Для определения количества сланцевой смолы в фусах достаточно знать содержание в них минеральных примесей (зольность сланцевых фусов), поскольку воды они содержат незначительное количество. Контроль содержания минеральных частиц в шламах, пастах, фусах может осуществляться различными методами. Радиоизотопный метод в силу ряда преимуществ, которыми он обладает, наиболее рациональный. Важнейшие преимущества этого метода: возможность дистанционного контроля, быстродействие регистрирующих устройств, высокая точность, возможность подключения к автоматизированным системам управления и др. [8–11].

Для разработки методики контроля содержания минеральных примесей в фусах использовался метод прямого просвечивания исследуемого материала узким пучком  $\gamma$ -излучения, физическая сущность которого заключается в следующем. При прохождении через материал часть  $\gamma$ -квантов взаимодействует с этим материалом. В результате взаимодействия происходит поглощение либо рассеивание  $\gamma$ -квантов средой. Зная интенсивность первичного  $\gamma$ -излучения и интенсивность пучка, прошедшего через материал, можно судить о вещественном составе материала. Для определения зольности сланцевых фусов строят график зависимости скорости счета импульсов от содержания минеральных частиц.

Экспериментальные исследования эффективности контроля зольности фусов методом прямого просвечивания материала узким пучком  $\gamma$ -лучей производились с использованием устройства, схема которого представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Схема радиоизотопного устройства для определения содержания минеральных примесей в пастах и шламах*

1 – источник излучения; 2 – исследуемый образец; 3 – детектор; 4 – регистрирующее устройство; 5 – цифропечатающее устройство

В качестве источника излучения применялся цезий-137, активность  $10^8$  Бк. Детектором служил газоразрядный счетчик СТС-6. Регистрирующее устройство представляло собой счетный прибор одноканальный ПСО-4 (со встроенным удвоителем напряжения для питания детектора) в комплекте с цифропечатающим устройством БЗ-15. В исследованиях использовались сланцевые фусы различной зольности, полученные на СПЗ «Сланцы». Фусы помещались в пластмассовые формы размером  $70 \times 70 \times 70$  мм. Пропускание  $\gamma$ -квантов через образец осуществлялось в геометрическом центре куба с двух установок (по четыре измерения на каждую установку) так, чтобы был произведен контроль в двух направлениях. Количество импульсов, прошедших через материал, суммировали за 100 с.

В результате проведенных экспериментальных исследований была получена зависимость скорости счета регистрируемых импульсов от процентного содержания минеральных примесей в сланцевых фусах, представленная на рис. 2.

Из графика видно, что фусы различной зольности пропускают различное количество  $\gamma$ -квантов за равный промежуток времени. Это позволяет с довольно высокой точностью определять зольность фусов. В общем случае относительная погрешность калибровочной зависимости включает три составляющие: статистическую, методическую и приборную. В нашем случае статистическая и приборная погрешности не превышали 3 %, что достигалось геометрией установки образца и подбором активности источника. Так, изменение скорости счета происходило от 100 до 150 имп/с, что обеспечивало относительную статистическую погрешность, не превышающую 1 %. Наблюдаемый незначительный разброс связан с методической погрешностью, включающей в себя: неоднородность материала в разных направлениях просвечивания  $\gamma$ -лучами, вызванную отклонениями в геометрических размерах форм, неодинаковой толщиной их стенок и т.д.

**Выводы.** Экспериментальные исследования, проведенные на примере сланцевых фусов, подтвердили, что радиоизотопный метод обеспечивает необходимую для практических целей степень точности определения содержания минеральных примесей в пастах и шламах. Это свидетельствует о возможности его использования для осуществления оперативного контроля зольности этих материалов при их применении в строительстве, например, при приготовлении асфальтобетонных смесей, различных антикоррозийных покрытий. Метод прост, не требует громоздкого и сложно-

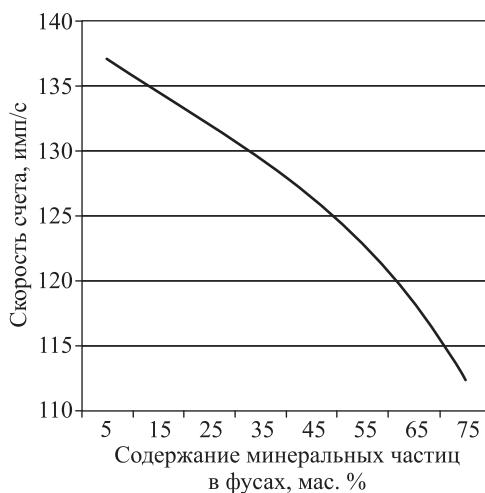


Рис. 2. Зависимость счета регистрируемых импульсов от содержания минеральных примесей в фусах

го оборудования, позволяет автоматизировать процесс контроля содержания минеральных примесей и связать его с процессом подачи и дозирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н. Адгезия вяжущего при строительстве асфальтобетонных покрытий, дисперсно армированных волокнами из отработанных сорбентов // Вестн. ТГАСУ. 2014. № 4. С. 221–230.
2. Кузнецова Д.Т. Горючие сланцы мира. М.: Недра, 1975. 368 с.
3. Denning D. Oil Shale Reserves – The Daily Reckoning.  
<https://dailyreckoning.com/oil-shale-reserves>.
4. Назаренко М.Ю., Бажин В.Ю., Салтыкова С.Н., Коновалов Г.В. Изучение физико-химических свойств горючих сланцев // Кокс и химия. 2014. № 3. С. 44–49.
5. Назаренко М.Ю., Кондрашова Н.К., Салтыкова С.Н. Исследование продуктов пиролиза горючих сланцев // Кокс и химия. 2015. № 4. С. 38–42.
6. Клесмент И., Риккен Ю., Эйзен О. Состав тяжелой сланцевой смолы. Характеристика продуктов термолиза нейтральной части смолы. М.: Известия АН СССР, 1976. Т. 25. № 3. С. 187–192.
7. Лукашевич В.Н., Погорелый А.В. Увеличение срока службы дорожных покрытий за счет дисперсного армирования и двухстадийной технологии приготовления асфальтобетонных смесей // Вестн. ТГАСУ. 2001. № 2. С. 45–51.
8. Боченин В.И. Радиоизотопные методы анализа промышленных материалов. М.: Атомиздат, 1977. 76 с.
9. Identification of radioactive sources and devices: technical guidance, reference manual. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. 154 p.
10. Regiman A. A nuclear density gauge for overlays of asphalt concrete. 1987. Publisher: Transportation Research Board. Find a library where document is available. Order URL: <http://worldcat.org/isbn/0309045177>.
11. Suvorova D., Khudonogova E., Revenko A. X-Ray fluorescence determination of CS, BA, LA, CE, ND and TA concentration in rocks of various composition X-Ray Spectrometry. 2017. Vol. 46. No. 3. P. 200–208.

**Власов Виктор Алексеевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Лукашевич Виктор Николаевич**, д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Лукашевич Ольга Дмитриевна**, д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Вакс Илья Владимирович**, студ.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 19.07.17

**Vlasov Viktor Alekseevich**, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Lukashevich Viktor Nikolaevich**, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Lukashevich Olga Dmitrievna**, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

**Vaks Il'ya Vladimirovich**, Student

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## **RADIOISOTOPE CONTENT CONTROL METHOD MINERAL IMPURITIES IN PASTES AND SLUDGES AT PRODUCTION OF ORGANOMINERAL MIXTURES IN ROAD CONSTRUCTION**

The urgency of the study is predetermined by the existing difficulties in the use of individual multi-tonnage wastes and by-products of industry in the form of pastes, slurries, mastics in road construction, associated with the instability of their composition. The aim of the study was to develop a method for the operative control of the mineral content in pastes, sludges, mastics for instant reaction to the dosing of these materials, which is very important in connection with their rather unstable composition. The results of the work on determining the possibility of controlling the concentration of mineral impurities in pastes and sludges using the radioisotope method are described. A schematic diagram of the device for controlling the ash content of pastes and sludges by a radioisotope method is given. Experimental studies were performed using pasty substance – shale fusi, containing a different amount of mineral impurities. A graph of the dependence of the recorded pulse rate on the content of mineral impurities in the pasty substance – shale fusi – was obtained. The results of the research showed that the radioisotope method provides the necessary for practical purposes degree of accuracy in determining the content of mineral constituents in pastes and sludges when used in road construction.

**K e y w o r d s:** radioisotopes,  $\gamma$ -radiation, slimes, pastes, fuse, mineral admixtures, oil shale, bituminous concrete mixture, organomineral mixture.

### **REFERENCES**

1. Lukashovich V.N., Efanova I.N. Adgeziya vyazhushchego pri stroitel'stve asfal'tobetonnykh pokrytiy, dispersno armirovannykh voloknami iz otrabotannykh sorbentov [Adhesion of binder during the construction of asphalt-concrete coatings dispersed fiber reinforced from spent sorbents]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building [Papers of the Tomsk State University of Architecture and Building]. 2014. No. 4. Pp. 221–230. (in Russian)
2. Kuznetsov D.T. Goryuchie slantsy mira [The oil shales of the world]. Moscow, Nedra, 1975. 368 p. (in Russian)
3. Denning D. Oil Shale Reserves – The Daily Reckoning.  
<https://dailyreckoning.com/oil-shale-reserves>.
4. Nazarenko M.Yu., Bazhin V.Yu., Saltykova S.N., Konovalov G.V. Izuchenie fiziko-khimicheskikh svoystv goryuchikh slantsev [Study of the physicochemical properties of oil shales]. Koks i khimiya [Coke and chemistry]. 2014. No. 3. Pp. 44–49. (in Russian)
5. Nazarenko M.Yu., Kondrashova N.K., Saltykova S.N. Issledovanie produktov piroliza goryuchikh slantsev [Investigation of pyrolysis products of combustible shales]. Koks i khimiya [Coke and chemistry]. 2015. No. 4. Pp. 38–42. (in Russian)
6. Klement I., Rikken Yu., Eyzan O. Sostav tyazheloy slantsevoy smoly. Kharakteristika produktov termoliza neytral'noy chasti smoly [Composition of heavy shale oil. Thermolysis products of neutral shale oil]. Moscow, Izvestiya USSR Academy of Sciences. 1976. Vol. 25. No. 3. Pp. 187–192. (in Russian)
7. Lukashovich V.N., Pogorelyy A.V. Uvelichenie sroka sluzhby dorozhnykh pokrytiy za schet dispersnogo armirovaniya i dvukhstadiynoy tekhnologii prigotovleniya asfal'tobetonnykh smesey [Increase in service life of road surfaces due to the dispersed reinforcement and two-stage technology of preparation of asphalt-concrete mixtures]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building [Papers of the Tomsk State University of Architecture and Building]. 2001. No. 2. Pp. 45–51. (in Russian)

8. Bochenin V.I. Radioizotopnye metody analiza promyshlennykh materialov [Radioisotope methods for analysis of industrial materials]. Moscow, Atomizdat, 1977. 76 p. (in Russian)
  9. Identification of radioactive sources and devices: technical guidance, reference manual. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. 154 p.
  10. Regimand A. A nuclear density gauge for overlays of asphalt concrete. 1987. Publisher: Transportation Research Board. Find a library where document is available. Order URL: <http://worldcat.org/isbn/0309045177>.
  11. Suvorova D., Khudonogova E., Revenko A. X-Ray fluorescence determination of CS, BA, LA, CE, ND and TA concentration in rocks of various composition X-Ray Spectrometry. 2017. Vol. 46. No. 3. Pp. 200–208.
-

УДК 691.327 : 666.973.6

Е.А. БАРТЕНЬЕВА, Н.А. МАШКИН

## ВЛИЯНИЕ ВИДА ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА

Рассмотрено действие синтетических и протеиновых пенообразователей на характеристики технической пены и неавтоклавного пенобетона. Установлено влияние технологических параметров на свойства образцов из неавтоклавного пенобетона. Получены математические модели зависимости свойств пены и пенобетона от технологических факторов. Даны рекомендации по оптимальным технологическим параметрам получения неавтоклавного пенобетона с набором требуемых стандартами свойств.

**Ключевые слова:** неавтоклавный пенобетон, пенообразователь, плотность пены, коэффициент стойкости пены, коэффициент конструктивного качества, уравнения регрессии.

Существенную роль в обеспечении требуемых свойств пенобетонной смеси и неавтоклавных пенобетонов играют воздухововлекающие поверхности-активные вещества (ПАВ). Показатели пенообразующей способности ПАВ и свойства пены зависят от природы пенообразователей, их концентрации, температуры, значения pH среды, интенсивности перемешивания, используемых аппаратов для воздухововлечения и других факторов [1–5]. На рынке строительных материалов при производстве пенобетона используют различные органические и неорганические пенообразователи, получаемые на основании натурального протеина, и синтетические на основе моющих средств [6–8].

Важной задачей для получения качественного пенобетона является выбор наиболее эффективного пенообразователя и отработка технологических факторов для получения необходимой структурированности пены.

Цель данной работы: изучение влияния вида пенообразователя и технологических факторов получения пен на этих пенообразователях на свойства неавтоклавного пенобетона.

В исследовании применяли портландцемент М400Д0 (ЦЕМ 1 32,5 н, г. Искитим), имеющий следующий химический состав, мас. %:  $\text{Na}_2\text{O}_3$  – 0,38;  $\text{MgO}$  – 2,44;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 5,75;  $\text{SiO}_2$  – 22,98;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,08;  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,62;  $\text{CaO}$  – 59,50;  $\text{TiO}_2$  – 0,37;  $\text{MnO}$  – 0,10;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,67;  $\text{BaO}$  – 0,03;  $\text{SO}_3$  – 2,89; п.п.п. – 1,00; минералогический состав, мас. %:  $\text{C}_3\text{S}$  – 54,  $\text{C}_2\text{S}$  – 21,  $\text{C}_3\text{A}$  – 7,  $\text{C}_4\text{AF}$  – 18. Истинная плотность портландцемента – 3026 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность – 1175 кг/м<sup>3</sup>. В качестве кремнеземистого заполнителя применяли кислую золу-уносу, полученную на ТЭЦ-5 г. Новосибирска от сжигания кузнецких каменных углей. Химический состав заполнителя, мас. %:  $\text{SiO}_2$  – 60,77;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 19,45;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5,16;  $\text{CaO}$  – 5,12;  $\text{MgO}$  – 2,10;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,89;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,01;  $\text{SO}_3$  – 0,54;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,39;  $\text{TiO}_2$  – 0,82;  $\text{BaO}$  – 0,20;  $\text{MnO}$  – 0,07. Насыпная плотность золы – 885 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность – 1870 кг/м<sup>3</sup> (ГОСТ 9758–2012),

остаток на сите 008 (по массе) – 4,49 % (ГОСТ 310.2–76). Для сравнения использовали наиболее востребованные на строительном рынке протеиновый пенообразователь «Неопор» и синтетический «ПБ-2000». Основу «Неопора» составляют протеины (белки) – биополимеры, построенные из остатков  $\alpha$ -аминокислот, связанных между собой длинными полипептидными цепями. «ПБ-2000» представляет собой водный раствор солей алкилсульфатов первичных жирных спиртов фракции С8–С15 со стабилизирующими добавками.

Пенобетонную смесь готовили с применением высокоскоростного пено-генератора кавитационного типа. Соотношение цемента и золы составляло 1 : 1, В/Т = 0,47. Оценку параметров технической пены проводили по показателям плотности пены ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и стойкости пены в растворной смеси [9]. Изучение структуры пены и пенобетона проводили на цифровом микроскопе Bresser Junior DM 400 (НОЦ НСТМ МГСУ). Твердение пенобетона осуществлялось в нормальных условиях в течение 28 сут.

На пенообразователе «Неопор» получаются «влажные» пены (рис. 1, а) с плотностью 90–212  $\text{кг}/\text{м}^3$  (рис. 2). Для них характерно снижение разрушения структуры пены и коалесценции пор при перемешивании их с пенобетон-

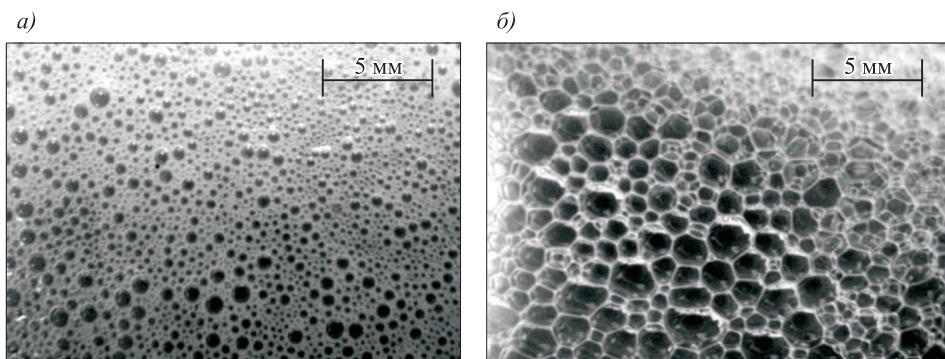


Рис. 1. Пена, полученная на пенообразователе «Неопор» (а), «ПБ-2000» (б) (увелич.  $\times 5$ )

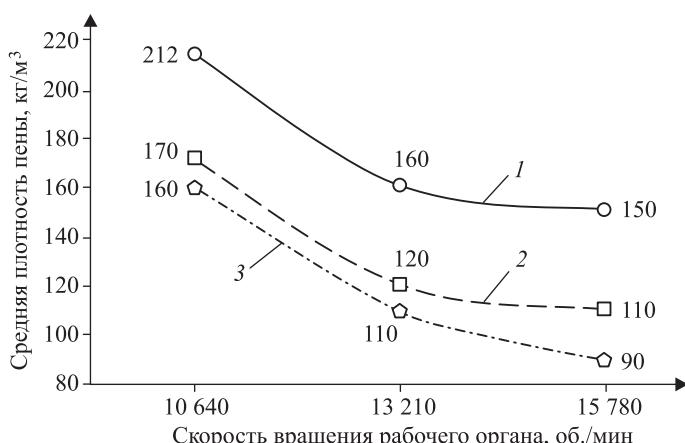
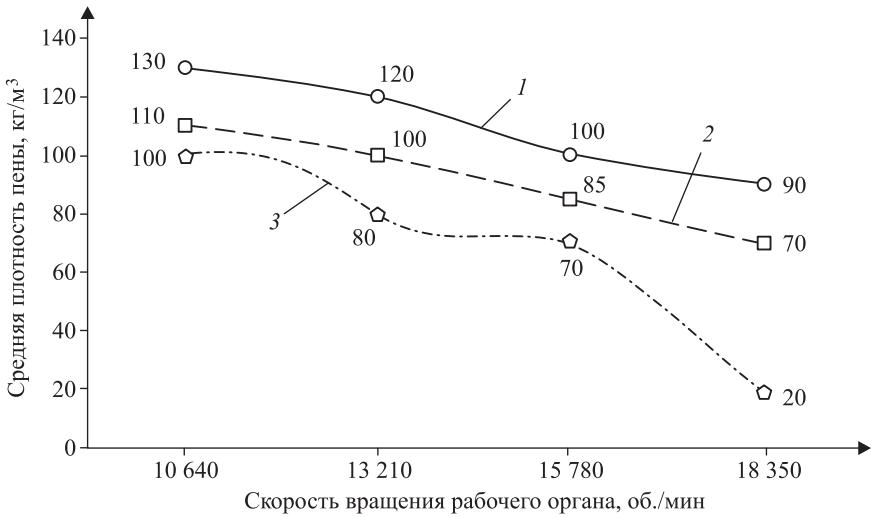


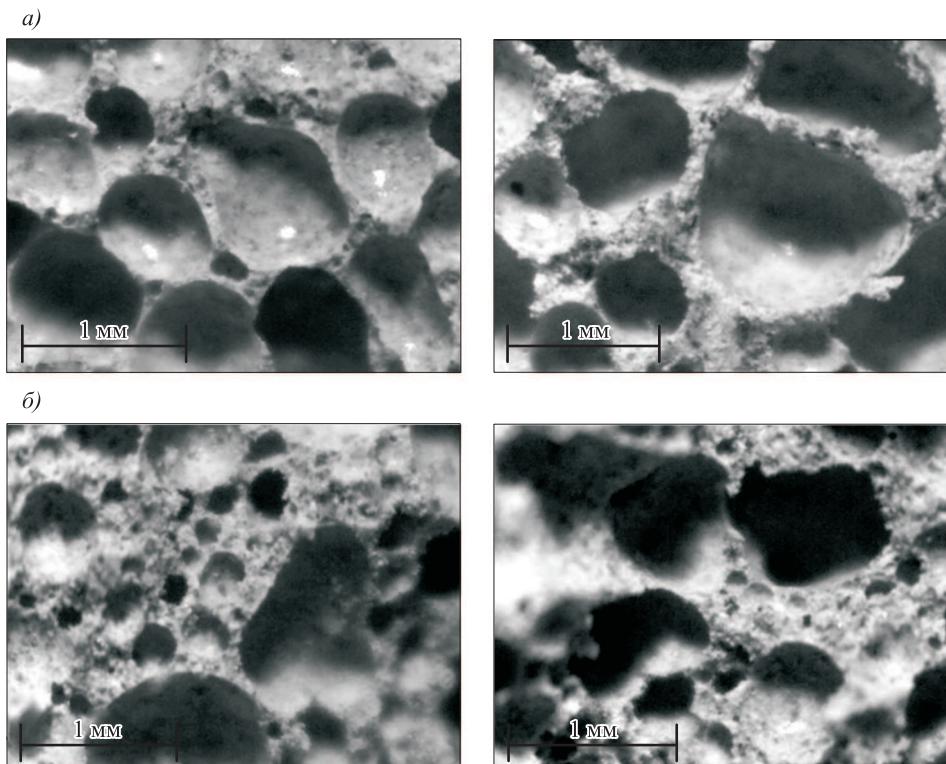
Рис. 2. Влияние технологических параметров на плотность пены «Неопор»

Время приготовления пены: 1 – 6 мин; 2 – 8 мин; 3 – 10 мин



*Рис. 3. Влияние технологических параметров на плотность пены «ПБ-2000»*  
Усл. обозначения те же, что и на рис. 2

ной смесью за счет более толстых пленок и отсутствия жесткого пространственного закрепления смежных пор. Такой пенобетон после отверждения обладает замкнутой пористостью (см. рис. 4, а). За счет большего количества воды в пенах улучшается однородность материала, так как обеспечивается хорошее перемешивание раствора с пеной.



*Рис. 4. Пенобетон, полученный на пенообразователях «Неопор» (а), «ПБ-2000» (б)  
(увелич. ×60)*

Пенообразователь «Неопор» позволяет получить в ячеистом бетоне одиночные равномерно распределенные поры сферической формы, при повышенных показателях плотности пены (рис. 2), в отличие от пенообразователя «ПБ-2000» (рис. 3).

При использовании пенообразователя «ПБ-2000» получается более «сухая» пена (см. рис. 1, б) с плотностью 20–130 кг/м<sup>3</sup> (рис. 3). В пористой структуре пенобетона на пенообразователе «ПБ-2000» поры неправильной формы встречаются незамкнутые. Для более «сухих» пен, полученных на пенообразователе «ПБ-2000», наблюдалась агрегация пенобетонной смеси, что отмечено и другими исследователями [1, 3, 4]. Пористость пенобетона, полученного на «ПБ-2000», неравномерная, поры неправильной формы, наблюдаются незамкнутые поры (рис. 4, б).

При сравнении коэффициентов конструктивного качества пенобетонных образцов (табл. 1) следует отметить более высокие показатели для пенобетона на пенообразователе «Неопор» по сравнению с «ПБ-2000».

Таблица 1. Влияние вида пенообразователя и технологических факторов на коэффициент конструктивного качества пенобетона

Время получения пены, мин	Скорость вращения рабочего органа пеногенератора, об./мин			
	10 640	13 210	14 200	18 350
«Неопор»				
6	5,8	4,7	3,7	—
8	4,1	1,5	2,2	—
10	2,8	2,2	3,5	—
«ПБ-2000»				
6	4,8	1,5	4,2	4,7
8	2,8	1,2	2,1	4,6
10	2,2	0,4	1,8	2,1

Из предварительно проведенных опытов были установлены нижние и верхние уровни для рассматриваемых факторов, значения которых представлены в табл. 3. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.

По результатам проведенных экспериментов получены функции отклика, которые представлены в виде уравнений регрессии со значимыми коэффициентами, для пенобетона на пенообразователе «Неопор» (1–4) и на пенообразователе «ПБ-2000» (5–8). Анализ уравнений проводился методом сечений с использованием математического пакета «Mathcad» [15], с помощью

анализа влияния технологических факторов на характеристики пенобетона проводился с помощью метода математического планирования эксперимента [10–14]. Был проведен двухфакторный эксперимент на трех уровнях, в качестве функций отклика были приняты предел прочности при сжатии пенобетона –  $Y_1$ , предел прочности при изгибе –  $Y_2$ , средняя плотность –  $Y_3$  и теплопроводность пенобетона –  $Y_4$ . Эксперимент проводился в соответствии с матрицей планирования (табл. 2), которая учитывает все возможные комбинации значений факторов.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_1$	-1	-1	+1	+1	-1	+1	0	0	0
$X_2$	-1	+1	-1	+1	0	0	-1	+1	0

**Влияние вида пенообразователей и технологических факторов на свойства пенобетона**

**Таблица 3. Значения факторов варьирования**

Факторы	Обозна- чение	Пенообразователь «Неопор»			Пенообразователь «ПБ-2000»		
		Уровни					
		нижний	средний	верхний	нижний	средний	верхний
Скорость вращения рабочего органа, об./мин	$X_1$	10 640	13 210	14 200	10 640	13 705	18 350
Время приготовления пены, мин	$X_2$	6	8	10	6	8	10

**Таблица 4. Результаты эксперимента**

Время приготовления пены, мин	Пенообразователь «Неопор»			Пенообразователь «ПБ-2000»		
	Скорость вращения рабочего органа, об./мин					
	10 640	13 210	14 200	10 640	13 705	18 350
<i>Предел прочности при сжатии пенобетона, МПа</i>						
6	3,44	3,41	3,25	4,12	1,75	3,15
8	2,53	1,27	1,62	2,24	1,5	1,97
10	2,23	1,52	2,31	1,55	2,48	4,50
<i>Предел прочность при изгибе пенобетона, МПа</i>						
6	1,90	1,91	1,90	2,20	1,42	2,20
8	1,68	1,13	1,07	1,45	1,13	1,41
10	1,48	1,11	1,32	1,16	1,96	3,49
<i>Средняя плотность пенобетона, кг/м<sup>3</sup></i>						
6	592	731	1024	862	970	975
8	614	859	748	795	970	950
10	805	685	663	710	945	940
<i>Коэффициент теплопроводности пенобетона, Вт/(м · °C)</i>						
6	0,173	0,219	0,337	0,189	0,262	0,236
8	0,178	0,247	0,181	0,178	0,262	0,231
10	0,191	0,182	0,152	0,157	0,276	0,228

которого построены графики линий равного уровня (рис. 5). Графический анализ экспериментально-статистических моделей позволяет оценить влияние технологических факторов в границах эксперимента на свойства готового изделия.

$$Y_1 = 1,476 - 0,17X_1 - 0,673X_2 + 0,497X_1^2 + 0,068X_1X_2 + 0,887X_2^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 1,177 - 0,128X_1 - 0,3X_2 + 0,175X_1^2 - 0,04X_1X_2 + 0,31X_2^2, \quad (2)$$

$$Y_3 = 751,889 + 70,667X_1 - 32,333X_2 - 17,333X_1^2 - 143,5X_1X_2 + 9,667X_2^2, \quad (3)$$

$$Y_4 = 0,211 + 0,021X_1 - 0,034X_2 - 0,014X_1^2 - 0,051X_1X_2 + 0,007X_2^2, \quad (4)$$

$$Y_5 = 1,229 + 0,285X_1 - 0,082X_2 + 1,012X_1^2 + 0,98X_1X_2 + 1,022X_2^2, \quad (5)$$

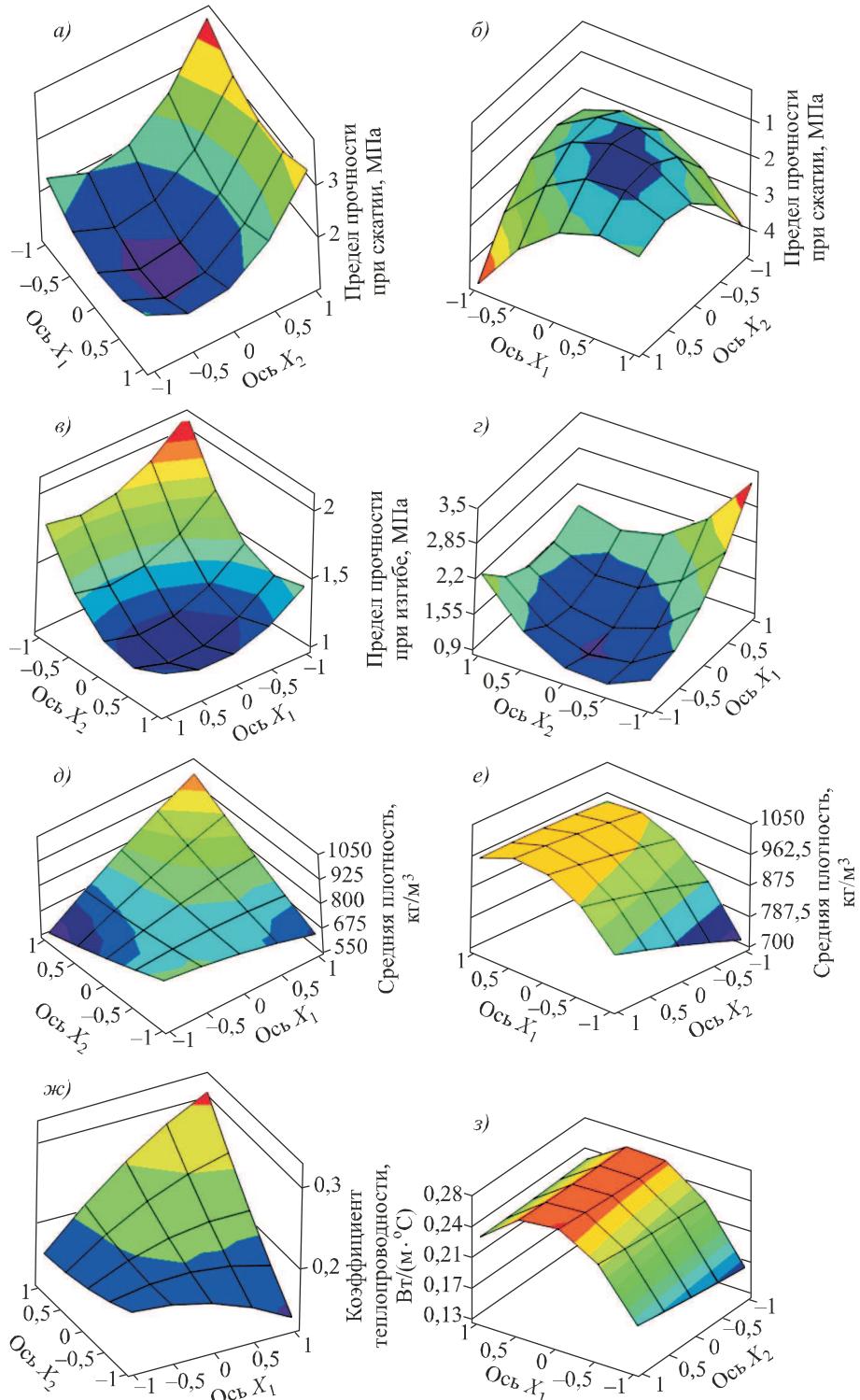


Рис. 5. Влияние технологических факторов на прочность пенобетона при сжатии «Неопор» (а), «ПБ-2000» (б); прочность при изгибе «Неопор» (в), «ПБ-2000» (г); средняя плотность пенобетона «Неопор» (д), «ПБ-2000» (е); коэффициент теплопроводности пенобетона «Неопор» (ж), «ПБ-2000» (з)

$$Y_2 = 1,009 + 0,382X_1 + 0,132X_2 + 0,482X_1^2 + 0,583X_1X_2 + 0,742X_2^2, \quad (6)$$

$$Y_3 = 964,778 + 83X_1 - 35,333X_2 - 89,667X_1^2 + 29,25X_1X_2 - 4,667X_2^2, \quad (7)$$

$$Y_4 = 0,266 + 0,029X_1 - 0,004X_2 - 0,063X_1^2 + 0,006X_1X_2 + 0,001X_2^2. \quad (8)$$

Проведенный анализ математических моделей позволяет отметить следующее.

1. Скорость вращения лабораторной установки и длительность приготовления пены оказывают отрицательное влияние на прочность при сжатии и изгибе пенобетона, полученного на пенообразователях «Неопор» и «ПБ-2000». Прочность при сжатии и изгибе в случае с пенобетоном на пенообразователе «ПБ-2000» повышается с увеличением количества оборотов пенобетоносмесителя. При увеличении времени приготовления пены прочность при сжатии снижается, прочность при изгибе увеличивается. Совместное действие технологических параметров положительно влияет на прочности при сжатии для обоих пенообразователей. Для пенообразователя «Неопор» совместное влияние исследуемых факторов отрицательно на прочность при изгибе.

2. В отдельности скорость вращения лабораторной установки повышает среднюю плотность и теплопроводность пенобетона, а длительность приготовления пены уменьшает для обоих пенообразователей.

3. Пенобетонные образцы, полученные исследуемым способом, удовлетворяют требованиям ГОСТ для ячеистых бетонов с использованием пенообразователя «Неопор» марки D600 класса по прочности при сжатии B2 при времени приготовления пены 6 мин, а скорости 10 640–13 210 об./мин и класса B1.5 при времени приготовления пены 8 мин, а скорости 10 640 об./мин. Однако для данных образцов показатели теплопроводности превышают допустимые нормативом. В данном случае рекомендуется применять дополнительные технологические операции для уменьшения теплопроводности, например, вводить тонкодисперсные минеральные модификаторы.

4. При использовании пенообразователя «ПБ-2000» рекомендуются следующие технологические режимы: время приготовления пены 10 мин, а скорость 10 640 об./мин, позволяющий получить пенобетон плотностью D700 и классом по прочности при сжатии B1.5. При скорости рабочего органа 10 640 об./мин и времени приготовления пены 8 мин получается пенобетон плотностью D800 и классом по прочности при сжатии B2. Плотность пенобетона D900 и класс по прочности при сжатии B3.5 можно получить при времени приготовления пены 6 мин и скорости 10 640 об./мин, а также при 10 мин и 18 350 об./мин. При этом для указанных технологических режимов пенобетона «ПБ-2000» теплопроводность соответствует требованиям национального стандарта.

**Выводы.** 1. Протеиновый пенообразователь позволяет получить в ячеистом бетоне одиночные равномерно распределенные поры сферической формы в отличие от синтетического пенообразователя.

2. На белковом пенообразователе получаются «влажные» пены. При использовании синтетического пенообразователя получается более «сухая» пена, за счет чего в пористой структуре пенобетона «ПБ-2000» поры неправильной формы, встречаются незамкнутые.

3. Коэффициент конструктивного качества для пенобетона на белковом пенообразователе показывает более высокие значения по сравнению с пенобетоном на синтетическом пенообразователе.

4. Анализ полученных коэффициентов уравнений регрессии показал, что улучшение теплофизических характеристик пенобетона возможно при уменьшении количества оборотов миксера-смесителя и при увеличении времени приготовления пены.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И в а н о в И.А., Ж м ѿ х о в В.М. Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона // Строит. материалы. 2007. № 7. С. 33–34.
2. Ф р и д р и х с б е р г Д.А. Курс коллоидной химии. СПб.: Лань, 2010. 410 с.
3. М о р г у н В.Н. Обоснование влияния корреляционной связи «расход ПАВ – агрегативная устойчивость» на качество пенобетона // Строит. материалы. 2009. № 8. С. 24–26.
4. Ч е р н о с и т о в а Е.С. Теплоизоляционный пенобетон на модифицированных пеноцементных смесях: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2005. 252 с.
5. Т к а ч е н к о Т.Ф., П е р ц е в В.Т. Совершенствование технологии неавтоклавных пенобетонов. Воронеж: ВГАСУ, 2011. 98 с.
6. Г о р б а ч П.С., Щ е р б и н С.А. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона // Вестн. ТГАСУ. 2014. № 5. С. 126–132.
7. Б а л я с н и к о в В.В. Пенобетон на модифицированных синтетических пенообразователях: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2003. 235 с.
8. Г у р о в а Е.В. Технический пенообразователь на основе белоксодержащего сырья для производства неавтоклавного пенобетона: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 181 с.
9. M a s h k i n N. A., B a r t e n ' e v a E. A. Foamer influence on the foam concrete properties obtained in the high-speed foam generator // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 163–168.
10. Р е б р о в а И.А. Планирование эксперимента. Омск: СибАДИ, 2010. 105 с.
11. Ш е н к Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
12. П о р с е в Е.Г. Организация и планирование экспериментов. Новосибирск: НГТУ, 2010. 128 с.
13. Б а т р а к А.П. Планирование и организация эксперимента. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007. 60 с.
14. К р а с о в с к и й Г.И., Ф и л а р е т о в Г.Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. 302 с.
15. В о с к о б ойников Ю.Е., О ч к о в В.Ф. Программирование и решение задач в пакете MathCAD. Новосибирск: НГАСУ, 2002. 136 с.

**Бартенева Екатерина Анатольевна**, асп.; E-mail: ek.bartenjeva@yandex.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Машкин Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: nmashkin@yandex.ru  
Новосибирский государственный технический университет

Получено после доработки 21.07.17

**Barten'eva Ekaterina Anatol'evna**, Post-graduate Student;

E-mail: ek.bartenjeva@yandex.ru

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

**Mashkin Nikolay Alekseevich**, DSc, Professor; E-mail: nmashkin@yandex.ru  
Novosibirsk State Technical University, Russia

## **FOAMERS TYPE AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS INFLUENCE ON THE FOAM CONCRETE PROPERTIES**

In the article is studied the effect of synthetic and protein foamers on the characteristics of technical foam and non-autoclave foam concrete. Technological parameters influence on non-autoclave foam concrete samples properties is established. Mathematical models of dependence of foam and foam concrete properties on technological factors are obtained. In this article are made recommendations the optimal technological parameters for obtaining non-autoclave foam concrete with a set of properties required by the standards.

**K e y w o r d s:** non-autoclave foam concrete, foamer, foam density, foam stability coefficient in the cement paste, coefficient of constructive performance, regression equations.

### **REFERENCES**

1. Ivanov I.A., Zhmyhov V.M. Otsenka svoystv sinteticheskikh pенообразователей dlya penobetona [Evaluation of the properties of synthetic foamers for foam concrete]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2007. No. 7. Pp. 33–34. (in Russian)
2. Fridrichsberg D.A. Kurs kolloidnoy khimii [Course of colloid chemistry]. Saint-Petersburg, Lan', 2010. 410 p. (in Russian)
3. Morgun V.N. Obosnovanie vliyaniya korrelyatsionnoy svyazi «raskhod PAV – agregativnaya ustoychivost'» na kachestvo penobetona [Rationale of the influence of the correlation relation «surfactant consumption – aggregative stability» on the quality of foam concrete]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2009. No. 8. Pp. 24–26. (in Russian)
4. Chernositova E.S. Teploizolyatsionnyy penobeton na modifitsirovannykh penotsementnykh smesakh: dis. ... kand. tekhn. nauk [Heat-insulating foam concrete on modified foam cement mixtures: diss. ... PhD]. Belgorod, 2005. 252 p. (in Russian)
5. Tkachenko T.F., Pertsev V.T. Sovershenstvovanie tekhnologii neavtoklavnykh penobetonov [Improving the technology of non-autoclave foam concrete]. Voronezh, VGASU, 2011. 98 p. (in Russian)
6. Gorbach P.S., Scherbina S.A. Vliyanie pенообразovatelya na svoystva peny i penobetona [Foamer effect on the foam and foam concrete properties]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2014. No. 5. Pp. 126–132. (in Russian)
7. Balysnikov V.V. Penobeton na modifitsirovannykh sinteticheskikh pенообразovatelyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk [Foil concrete on modified synthetic foamers: diss. ... PhD]. Belgorod, 2003. 235 p. (in Russian)
8. Gurova E.V. Tekhnicheskiy pенообразovatel' na osnove beloksoderzhashchego syr'ya dlya proizvodstva neavtoklavnogo penobetona: dis. ... kand. tekhn. nauk [Technical foamers based on protein-containing raw materials for production of non-autoclave foam concrete: diss. ... PhD]. Omsk, 2002. 181 p. (in Russian)
9. Mashkin N.A., Barteneva E.A. Foamer influence on the foam concrete properties obtained in the high-speed foam generator. Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. Pp. 163–168.
10. Rebrova I.A. Planirovanie eksperimenta [Design of experiment]. Omsk, 2010. 105 p. (in Russian)

11. Shenk Kh. Teoriya inzhenernogo eksperimenta [Theory of Engineering Experiment]. Moscow, Mir, 1972. 381 p. (in Russian)
  12. Porsev E.G. Organizatsiya i planirovanie eksperimentov [The organization and planning of experiments]. Novosibirsk, 2010. 128 p. (in Russian)
  13. Batrak A.P. Planirovanie i organizatsiya eksperimenta [Planning and organization the experiment]. Krasnoyarsk. 2007. 60 p. (in Russian)
  14. Krasovskiy G.I., Filaretov G.F. Planirovanie eksperimenta [Planning the experiment]. Minsk, 1982. 302 p. (in Russian)
  15. Voskoboinikov Yu. E., Ochkov V.F. Programmirovaniye i reshenie zadach v pakete MathCAD [Programming and problem solving in the package «Mathcad»]. Novosibirsk, 2002. 136 p. (in Russian)
-

УДК 691.542 : 620.1

Н.А. КОНОВАЛОВА, О.Н. ДАБИЖА, П.П. ПАНКОВ

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТОГРУНТОВ В ПРИСУТСТВИИ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ КРИОГЕЛИТ

Методами растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, термогравиметрии, инфракрасной спектроскопии изучены микроструктура, фазовый состав, степень гидратации и карбонизации, структура исходных и стабилизированных полимерной добавкой Криогелит цементогрунтов на основе суглинка и супеси, модифицированных золой-уносом. Показано, что в стабилизированном цементогрунте на основе суглинка образуются органоминеральные комплексы с участием полимера и монтмориллонита. Выявлено, что структурообразование сопровождается физической адсорбцией полимера на активных центрах силикатных минералов, карбонизацией и процессами гидратации–дегидратации. Установлено, что причиной повышения прочности стабилизированных Криогелитом цементогрунтов является гидрофобизация пористой структуры минералов, образование оксид-силиката кальция и двухкальциевого гидратированного силиката.

Ключевые слова: цементогрунт, стабилизирующая добавка Криогелит, структурообразование, карбонизация, гидрофобизация.

При внесении стабилизатора и вяжущего в глинистый грунт протекают физико-химические и коллоидные процессы [1], позволяющие придавать дорожно-строительным композитам заданные свойства [2–4]. Добавление в цементогрунтовую смесь полиэлектролита в количестве 0,05–0,70 % от массы грунта повышает предел прочности при сжатии до 75 % и снижает водонасыщение до 64 % [5]. При внесении водного раствора стабилизатора грунта LBS происходит гидрофобизация поверхности пылеватых частиц, что необратимо изменяет физико-механические свойства грунта [6]. Образование первичного структурного каркаса из двойных солей, гидратов и гидроксисолей, обрастающего затем гидросиликатами кальция, обеспечивает повышение прочности образцов из щебеночно-песчаных смесей с добавками стабилизаторов «ANT» и «nanoSTAB» [1]. Также известно, что в процессе структурообразования полимерцементогрунтовой смеси испаряющаяся вода с полимерных частиц способствует зарастанию пор и образованию «тромб», которые препятствуют дальнейшему движению воды в материале [7].

Изучение процесса структурообразования цементогрунтов с участием синтезированного ранее Криогелита [8] позволит направленно регулировать их физико-механические характеристики.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании процесса структурообразования цементогрунтов на основе суглинка и супеси, модифицированных золой сухого улавливания Читинской ТЭЦ-2 в присутствии стабилизирующей добавки полимерного типа Криогелит.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи: 1) исследовать микроструктуру цементогрунтов методом растровой электронной микроскопии; 2) изучить фазовый состав образцов методами рентгенофазового анализа (РФА), дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии (ДСК–ТГ); 3) установить структурные особенности цементогрунтов и природу взаимодействия компонентов методом инфракрасной спектроскопии (ИКС).

Объектом исследования являются цементогрунты, модифицированные золой-уносом и укрепленные стабилизирующей добавкой Криогелит, а предметом исследования – их структура.

Суглинок и супесь отбирали на станции Черновская Забайкальской железной дороги. Содержание в них глинистых минералов составляет 39,0 и 5,7 % соответственно. Характеристики грунтов и золы-уноса ТЭЦ-2 г. Чита описаны в работе [2]. Фазовый состав портландцемента ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б Ангарского цементно-горного комбината: алит, белит, портландит, кварц. Установлено, что оптимальное содержание золы-уноса и портландцемента в цементогрунте составляет 10 и 8 мас. % соответственно [2].

Наименование образцов отражает их качественный состав: Г-ЗУ-ПЦ и П-ЗУ-ПЦ – цементогрунты, модифицированные золой-уносом на основе суглинка и супеси соответственно; Г-ЗУ-ПЦ-Кр и П-ЗУ-ПЦ-Кр – их аналоги, стабилизированные добавкой Криогелит.

Стабилизирующая добавка Криогелит разработана в НИ ПТБ «ЗабИЖТ-Инжиниринг» Забайкальского института железнодорожного транспорта и представляет собой водно-полимерную дисперсию.

Рентгенофазовый анализ выполняли на базе ИЗК СО РАН (г. Иркутск) методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН-3.0, излучение – CuK<sub>α</sub>, Ni – фильтр, U = 25 кВ, I = 20 мА, угловой диапазон: 2θ = 3–55°, скорость измерения – 1 °/мин. Рентгенограммы идентифицировали с помощью программы поиска фаз. Количественное соотношение компонентов рассчитывали по корундовым числам методом RIR.

ИК-спектры регистрировали инфракрасным Фурье-спектрометром SHIMADZU FTIR-8400S в области 4000–400 см<sup>-1</sup> на таблетках с KBr.

Микроструктуру образцов исследовали растровым электронным микроскопом JSM-6510LV·JEOL (Япония) с системой микроанализа – энергодисперсионным рентгеновским спектрометром модели INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания) на базе Центра коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО ВСГУТУ (г. Улан-Удэ, Бурятия). Тонкий слой платины на непроводящий образец напыляли с применением установки JFC-1600 (Великобритания).

Термограммы регистрировали в ИПРЕК СО РАН (г. Чита) синхронным термоанализатором STA 449F1 (фирма NETZSCH, Германия) методами ДСК и ТГ. Образцы нагревали от 30 до 998 °C в платиновых тиглях в динамической атмосфере аргона со скоростью 10 °C/мин.

Микроскопические исследования показали (рис. 1, *a, б*), что по минералогическому составу исходные цементогрунты представлены окатанными и остроугольными зернами и обломками кварца, полевых шпатов, слюды и других минералов. Легко увидеть, что цементогрунт Г-ЗУ-ПЦ содержит

полидисперсные фракции с размерами крупных частиц неправильной формы в пределах от 77 до 197 мкм (рис. 1, а), а образец П-ЗУ-ПЦ – от 112 до 382 мкм. Цементогрунт П-ЗУ-ПЦ имеет отдельные очень крупные включения округлой формы диаметром 747–800 мкм (рис. 1, б). В результате стабилизации цементогрунтов Криогелитом наблюдается образование крупных агрегатов размерами от 1,619 до 2,603 мм (рис. 1, в) и от 0,805 до 1,843 мм (рис. 1, г). Следовательно, механизм действия добавки Криогелит идентичный в цементогрунтах и на основе суглинка, и на основе супеси. В результате структурообразования микроструктура образцов принимает вид единой плотной массы крупных агломератов, что согласуется с данными об образовании кристаллизационно-коагуляционных структур в цементогрунтах [5, 7].

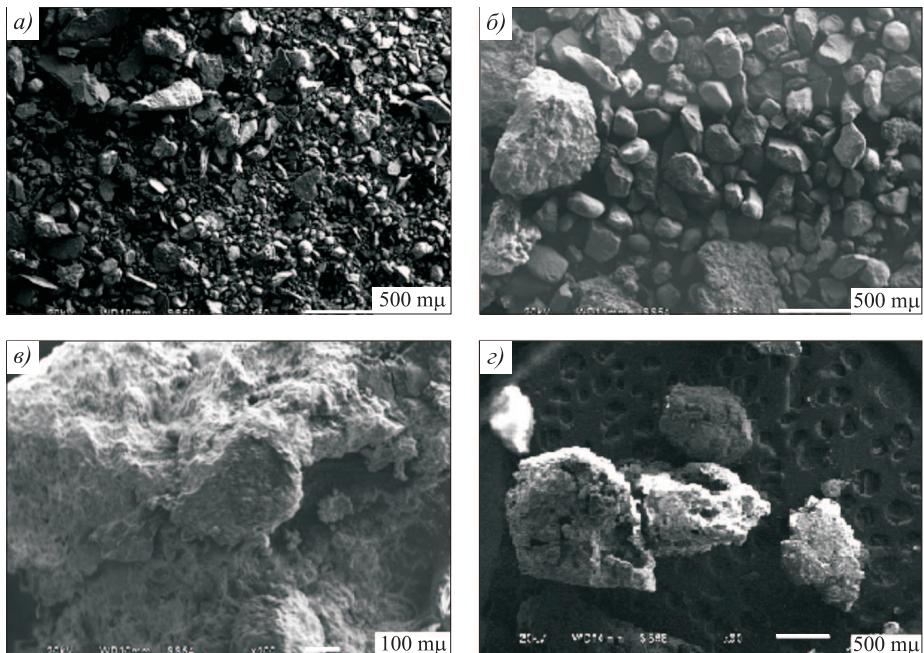
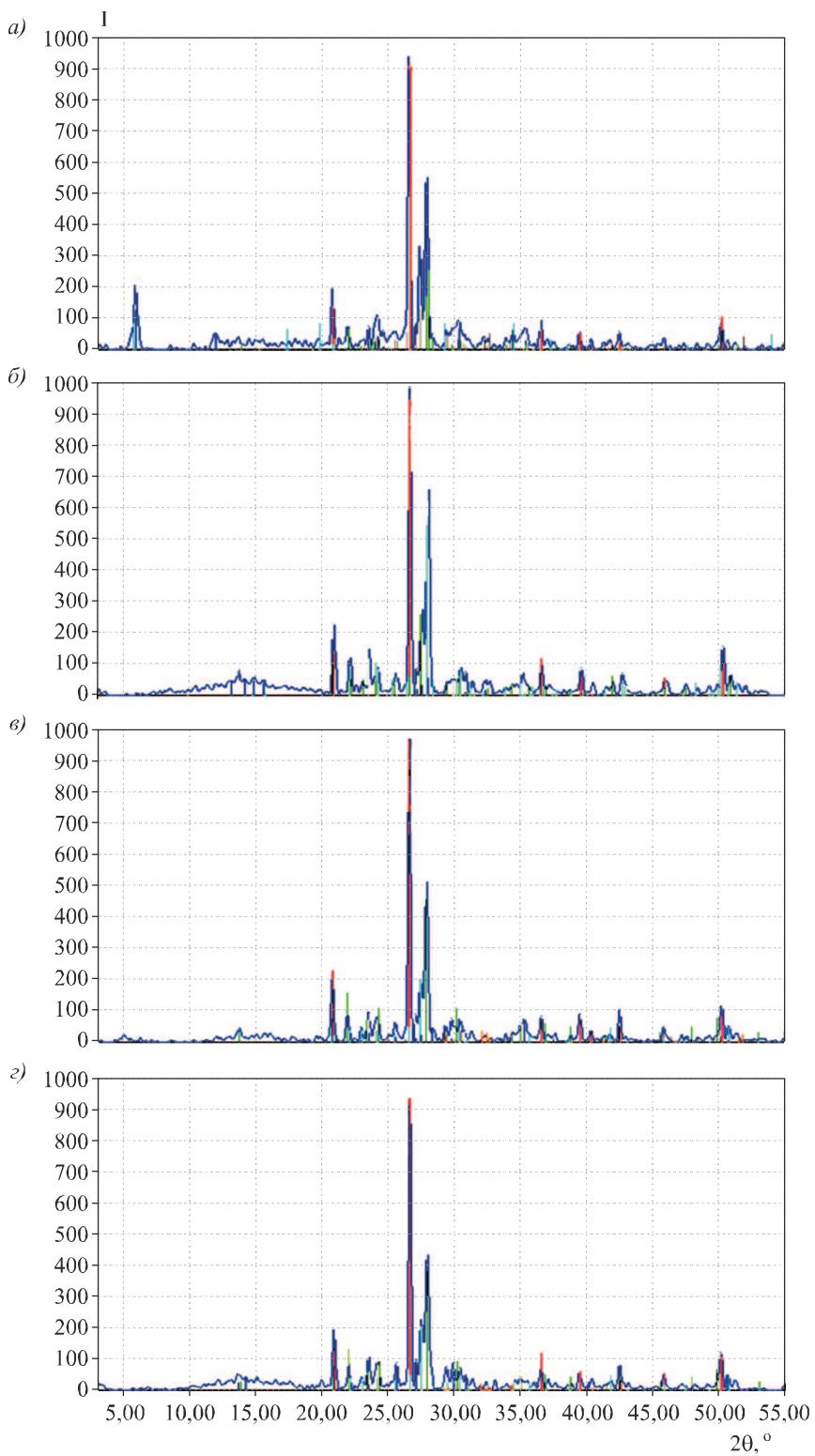


Рис. 1. Микрофотографии РЭМ

а – исходный цементогрунт на основе суглинка Г-ЗУ-ПЦ; б – исходный цементогрунт на основе супеси П-ЗУ-ПЦ; в – цементогрунт на основе суглинка с добавкой Криогелит Г-ЗУ-ПЦ-Кр; г – цементогрунт на основе супеси с добавкой Криогелит П-ЗУ-ПЦ-Кр

Для определения механизма структурообразования дальнейшие исследования проводили комплексом методов: РФА, ДСК, ТГ, ИКС.

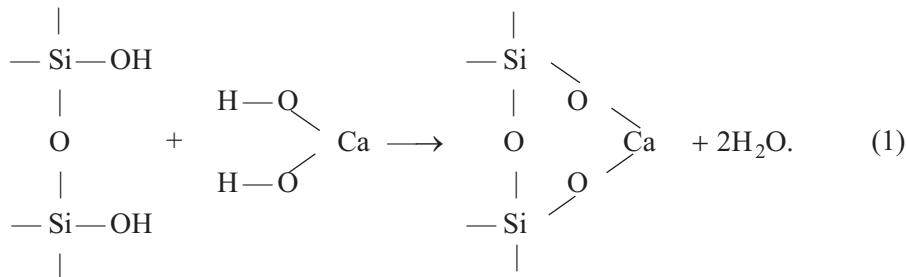
Анализ дифрактограмм (рис. 2) позволил установить минералогический состав цементогрунтов,  $\omega$ , %: 37 альбит; 35 микроклин; 8 оксид-силикат кальция; 13 монтмориллонит; 7 кварц (Г-ЗУ-ПЦ); 43 альбит; 30 кварц; 19 микроклин; 4 силикат кальция; 4 двухкальциевый гидратированный силикат (Г-ЗУ-ПЦ-Кр); 36 микроклин; 35 альбит; 27 кварц; 2 силикат кальция–магния–алюминия (П-ЗУ-ПЦ); 47 альбит; 25 микроклин; 24 кварц; 4 оксид-силикат кальция (П-ЗУ-ПЦ-Кр). После добавления стабилизирующей добавки Криогелит на дифрактограмме Г-ЗУ-ПЦ-Кр (рис. 2) исчезают рефлексы монтмориллонита ( $d = 1,485; 0,740$  нм). Это свидетельствует об интеркаляции полимера в структуру этого минерала и способствует повышению адгезионной прочности дорожно-строительных композитов на основе суглинка [8]. Кроме



*Рис. 2. Дифрактограммы: исходный цементогрунт на основе суглинка Г-ЗУ-ПЦ (а), на основе супеси П-ЗУ-ПЦ (б); цементогрунт на основе суглинка с добавкой Криогелит Г-ЗУ-ПЦ-Кр (в), на основе супеси с добавкой Криогелит П-ЗУ-ПЦ-Кр (г)*

того, обнаружено, что в результате участия в структурообразовании содержание представителя полевых шпатов – микроклина уменьшается в 1,8 (Г-ЗУ-ПЦ-Кр) и в 1,4 раза (П-ЗУ-ПЦ-Кр).

Полученные результаты показали, что причиной повышения прочности образцов является образование оксид-силиката кальция  $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ , силиката кальция  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  и двухкальциевого гидратированного силиката  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  при взаимодействии силикатов с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :



Анализ кривых ДСК показал наличие нескольких термоэффектов (рис. 3). Эндоэффект с экстремумом при температуре 86 °C вызван удалением гигроскопической воды, а при 162 °C – дегидратацией межслоевой (адсорбционной) воды монтмориллонита (рис. 3). Эндоэффект при 574 °C обусловлен полиморфным превращением  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц. Единственный экзоэффект, который регистрируется при 475 °C, возникает из-за выгорания тонкодисперсного углеродистого вещества в составе золы-уноса. На термограмме исходного сырьевого компонента – золы-уноса ТЭЦ-2 г. Чита – этот экзоэффект наблюдается при 494 °C. Перечисленные термоэффекты сопровождаются потерями массы на ТГ-кривой и четырьмя четкими экстремумами на ДТГ-кривой. Температурные смещения эндотермических эффектов при 107 и 692 °C на ДСК-кривой цементогрунта Г-ЗУ-ПЦ-Кр, объясняющиеся процессами дегидратации и декарбонизации, указывают на гидрофобизирующую активность полимерной добавки за счет физической адсорбции на активных центрах силикатов.

Эндоэффект, наблюдаемый на термограмме при 162 °C у цементогрунта (Г-ЗУ-ПЦ), отсутствует у образца, стабилизированного Криогелитом (Г-ЗУ-ПЦ-Кр). Форма эндоэффекта с экстремумом при 107 °C широкая и имеет размытый вид (рис. 3). ТГ-кривые также различны, несмотря на то, что общая потеря массы при  $t = 798$  °C у образцов Г-ЗУ-ПЦ и Г-ЗУ-ПЦ-Кр практически одинакова: 5,79 и 5,40 % соответственно. Так, по сравнению с исходным цементогрунтом, сначала потеря массы происходит медленнее (до температуры 360 °C), а далее, наоборот, быстрее. Появление на ДСК-кривой экзоэффекта при 340 °C с потерей массы на ТГ-кривой обусловлено разложением органических соединений, связанных в *органоминеральные комплексы*. Кроме того, на термограмме имеет место сдвиг и увеличение интенсивности эндоэффекта при 659 °C (Г-ЗУ-ПЦ), вызванного разложением карбоната магния, до 692 °C (Г-ЗУ-ПЦ-Кр). Это объясняется дополнительной карбонизацией органоминерального цементогрунта, что способствует упрочнению и препятствует выщелачиванию гидроокиси кальция, а также эрозии цементного камня [9]. Отсутствие на дифрактограммах рефлексов, принадлежащих магнезиту, может свидетельствовать о его рентгеноаморфной структуре.

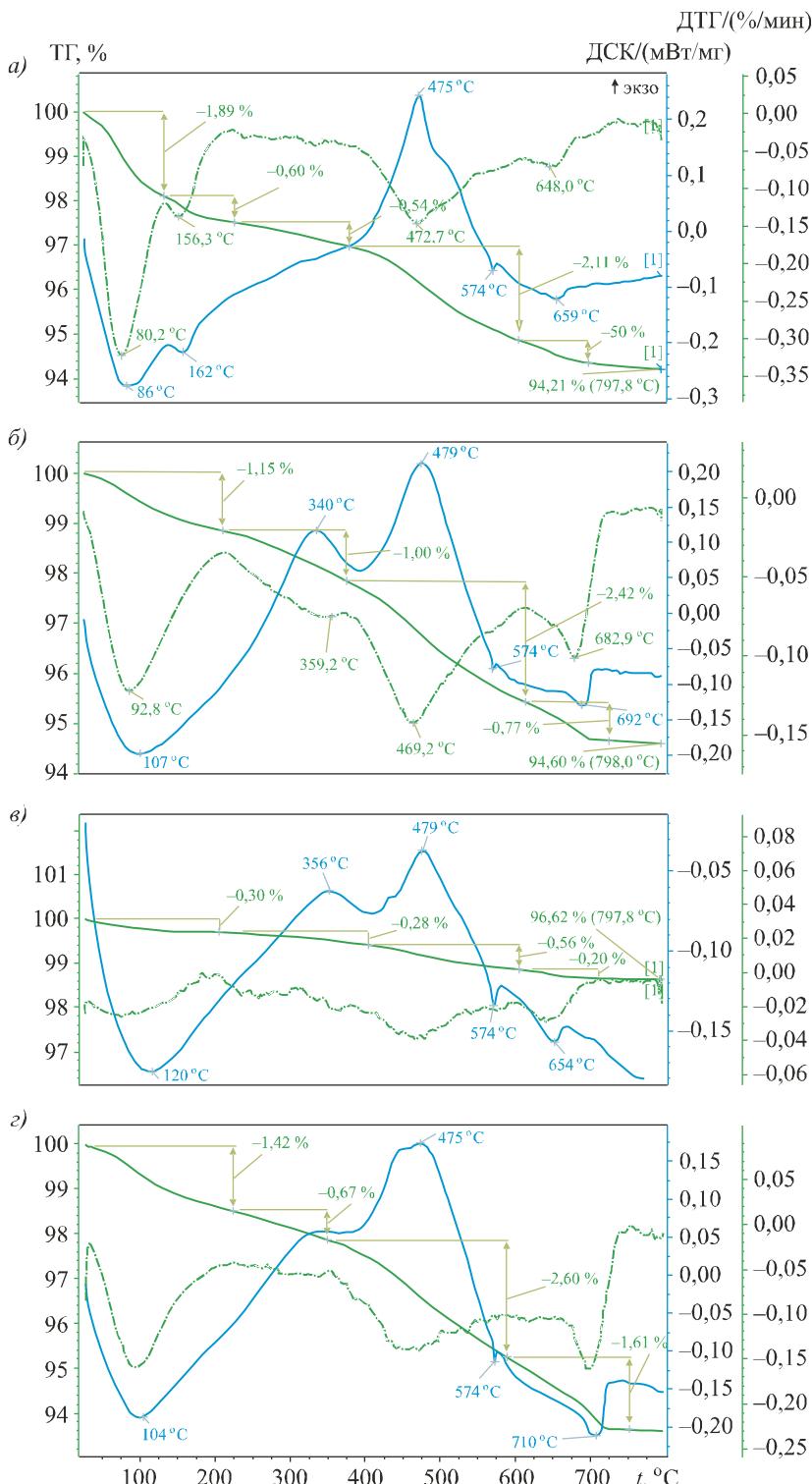


Рис. 3. Термограммы: исходный цементогрунт на основе суглинка Г-ЗУ-ПЦ (а), на основе супеси П-ЗУ-ПЦ (б); цементогрунт на основе суглинка с добавкой Криогелит Г-ЗУ-ПЦ-Кр (в), на основе супеси с добавкой Криогелит П-ЗУ-ПЦ-Кр (г)

Данными, представленными на термограммах (рис. 3), подтверждается, что удаление адсорбционно-связанной воды в цементогрунте П-ЗУ-ПЦ происходит при 120 °С и сопровождается потерей массы 0,30 %, а в стабилизированном – при 104 °С с потерей массы 1,42 %. Согласно С.В. Вавренюк, образование «кальций-полимерных соединений» коллоидных размеров в цементогрунтах характеризуется плохим удержанием воды [10]. В этом случае на термограмме и дифрактограмме должны появляться термоэффекты и рефлексы, относящиеся к новообразованиям и отсутствующие у исходных материалов, чего в нашем случае не наблюдается. Следует отметить, что ТГ-кривая цементогрунта П-ЗУ-ПЦ пологая с нечеткими, плохо определяющимися ступенями и потерей веса при 798 °С в 3,38 %. ТГ-кривая образца П-ЗУ-ПЦ-Кр показывает, что потеря массы исходным цементогрунтом на основе супеси проходит в три этапа и при 798 °С составляет 6,30 % (рис. 3). Экзоэффекты на ДСК-кривых при 475–479 °С соответствуют выгоранию углистого вещества в золе-уносе.

Структура исследуемых цементогрунтов изучена методом ИК-Фурье спектроскопии (рис. 4). В ИК-спектре исходного цементогрунта на основе суглинка наблюдаются полосы поглощения (п.п.) кристаллизационной воды в области  $\nu$  3600–3400 и  $\delta$  1634  $\text{cm}^{-1}$ , интенсивности которых уменьшаются после добавления стабилизатора Криогелит. Это связано с дегидратацией и блокированием активных гидрофильных центров дисперсных минералов. Кроме того, регистрируются новые п.п. при 2926 и 2855  $\text{cm}^{-1}$ , характерные для групп C–H полимерной органической добавки. Следует отметить, что гидрофобизирующая активность Криогелита видна по уменьшению интен-

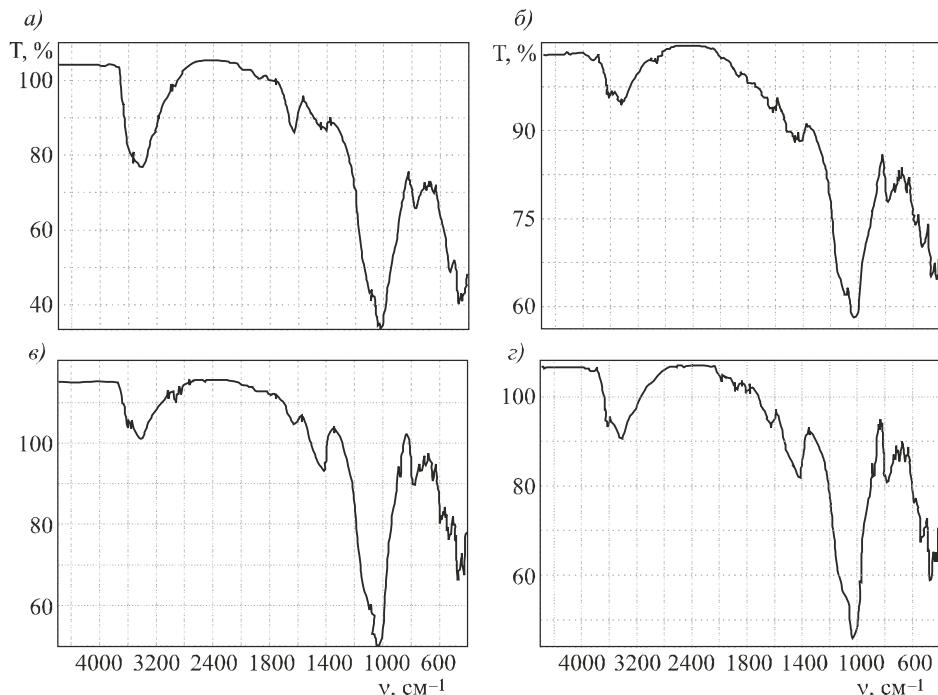


Рис. 4. ИК-спектры: исходный цементогрунт на основе суглинка Г-ЗУ-ПЦ (а), на основе супеси П-ЗУ-ПЦ (б); цементогрунт на основе суглинка с добавкой Криогелит Г-ЗУ-ПЦ-Кр (в), на основе супеси с добавкой Криогелит П-ЗУ-ПЦ-Кр (г)

сивности п.п. валентных и деформационных колебаний OH-групп межслоевой воды, что связано с проникновением макромолекул стабилизатора в галереи монтмориллонита. Обнаружено, что интенсивность п.п. в области  $1410\text{--}1420\text{ см}^{-1}$  – валентных колебаний группы  $\text{CO}_3^{2-}$  усиливается в ИК-спектре стабилизированного цементогрунта (рис. 4), а также появляется п.п. деформационных колебаний этой группы при  $878\text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о протекающем процессе *карбонизации*. П.п. при  $3622\text{ см}^{-1}$  принадлежит группам Si-OH и указывает на гидроксилирование минеральной поверхности. Наблюдается смещение п.п. OH; Si-O-Si и  $\text{CO}_3^{2-}$ -групп с изменением их интенсивности в ИК-спектре образца Г-ЗУ-ПЦ-Кр, что указывает на процессы физической адсорбции на активных центрах силикатов.

Полосы при  $3439$  и  $1618\text{ см}^{-1}$  в спектре П-ЗУ-ПЦ принадлежат валентным и деформационным колебаниям молекулярно-адсорбированной воды, п.п. при  $3622\text{ см}^{-1}$  – валентным колебаниям гидроксильных групп кварца – основного минерала супеси. О протекании процесса гидратации в цементогрунте на основе супеси в результате стабилизации Криогелитом свидетельствуют валентная, деформационная и комбинационная полосы поглощения OH-группы при  $3428, 1792, 1839\text{ см}^{-1}$  (П-ЗУ-ПЦ-Кр). Также имеет место протекание *карбонизации*, на что указывает увеличение интенсивности полосы поглощения при  $1420\text{ см}^{-1}$  (рис. 4). Стабилизирующая добавка Криогелит способствует возникновению пространственного объемного каркаса из дисперсных частиц, соединенных между собой через тонкие прослойки воды и полимера.

Следует отметить, что в сравнении с цементогрунтом на основе супеси цементогрунт на основе суглинка, содержащий монтмориллонит, характеризуется примерно равным уровнем физико-механических свойств [8].

**Заключение.** Микроскопическими исследованиями найдено, что стабилизирующая добавка Криогелит участвует в образовании коагуляционной структуры в цементогрунтах на основе суглинка и супеси, модифицированных золой-уносом. Методом рентгенофазового анализа выявлено, что прочность стабилизированных цементогрунтов обусловливается образованием кристаллизационной структуры изоксид-силиката кальция и двухкальциевого гидратированного силиката. Анализ ИК-спектров и термограмм образцов позволил сделать заключение о вкладе в структурообразование процессов карбонизации и гидрофобизации поверхности силикатных минералов. Упрочнению структуры цементогрунтов способствует также возникновение органоминеральных комплексов, пространственного объемного каркаса из дисперсных частиц, которые соединяются через тонкие прослойки воды и полимера.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матуа В.П., Мирончук С.А., Матуа Р.В., Благоз Э.М. Влияние добавок «ANT» и «NanoStab» на процессы структурообразования, укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей // Новые технологии. 2012. № 3. С. 80–84.
2. Коновалова Н.А., Корякина Е.А., Панков П.П. Использование золошлаковых отходов Забайкальского края для улучшения свойств грунтов при строительстве и ремонте инженерных сооружений // Естественные и техн. науки. 2016. № 5. С. 23–29.

3. Sha Aimin, Hu Liqun. Structural characteristics of stabilized base materials // Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 2013. P. 949–958.
4. Upadhyaya S., Tiwari B., Olgun G. Static and dynamic properties of compacted soil-cement mixtures // Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. 2016. P. 1646–1654.
5. Чудинов С.А. Повышение эффективности укрепления глинистых грунтов портландцементом с добавкой полиэлектролита // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог / Сб. науч. трудов ОАО «ГИПРОДОРНИИ». 2013. № 4 (63). С. 121–129.
6. Клековина М.П., Филиппова К.В. Инновационные материалы – добавки и стабилизаторы для укрепления грунтов // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. № 3 (5). С. 31–33.
7. Коротаев Д.Н., Голубева Е.А. Повышение эффективности структурообразования дорожных цементогрунтовых композиций // Наукоемкие технологии и инновации: Юбил. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI науч. чтения). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. С. 197–203.
8. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P. Estimation of technological efficiency of use of perspective stabilizers of clay soil // Fundamental and applied sciences today: mater. of the IX Internat. Scientific and pract. conf. North Charleston. USA, 2016. P. 113–115.
9. Пичугин А.П., Гришина В.А., Язиков И.К. Физико-химические процессы в укрепленных грунтах // Строительные материалы. 2009. № 12 (660). С. 41–43.
10. Варенюк С.В. Структурообразование цементных систем в присутствии добавок поливинилового спирта // Строительные материалы. 2013. № 12. С. 81–82.

**Коновалова Наталья Анатольевна**, канд. хим. наук, доц.;

E-mail: zabizht\_ngineering@mail.ru

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита

**Дабизха Ольга Николаевна**, канд. хим. наук, доц.; E-mail:dabiga75@mail.ru

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита

**Панков Павел Павлович**, ст. препод.; E-mail: zabizht\_ngineering@mail.ru

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита

Получено после доработки 14.07.17

**Konovalova Nataliya Anatol'evna**, PhD, Ass. Professor;

E-mail: zabizht\_ngineering@mail.ru

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, Russia

**Dabizha Ol'ga Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail:dabiga75@mail.ru

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, Russia

**Pankov Pavel Pavlovich**, Senior Lecturer; E-mail: zabizht\_ngineering@mail.ru

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, Russia

## **STRUCTURAL FORMATION OF CEMENTOGRANTS IN THE PRESENCE OF STABILIZING ADDITIVE CRYOGELITE**

The microstructure, the phase composition of the degree of hydration and carbonization, the structure of the initial and stabilized by the polymer additive Cryogelite soil-cement materials based on loam and sandy loam modified by fly ash were studied by scanning

electron microscopy, X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry, thermogravimetry, infrared spectroscopy. It is shown that in the stabilized soil-cement based on loam, organo-mineral complexes are formed with the participation of polymer and montmorillonite. It was revealed that the structure formation is accompanied by physical adsorption of the polymer on the active centers of silicate minerals, by carbonization and hydration-dehydration processes. It has been established that the cause of the increase in strength of Cryogelite soil-cement is the hydrophobization of the porous structure of minerals, the formation of calcium silicate oxide and of dicalcium hydrated silicate.

**К e y w o r d s:** soil-cement, stabilizing additive Cryogelite, structuring, carbonization, hydrophobization.

## REFERENCES

1. Matua V.P., Mironchuk S.A., Matua R.V., Blyagoz E.M. Vliyanie dobavok «ANT» i «NanoStab» na protsessy strukturoobrazovaniya, ukreplennykh mineral'nymi vyazhushchimi shchebenochno-peschanykh smesey [The effect of the additives «ANT» and «NanoStab» on the processes of the structure formation of mineral aggregates reinforced with crushed stone-sand mixtures]. Novye tekhnologii [New technologies]. 2012. No. 3. Pp. 80–84. (in Russian)
2. Konovalova N.A., Koryakin A.E., Pankov P.P. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov Zabaykal'skogo kraya dlya uluchsheniya svoystv gruntov pri stroitel'stve i remonte inzhenernykh sooruzheniy [Use of ash and slag wastes of the Trans-Baikal region to improve the properties of soils in the construction and repair of engineering structures]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]. 2016. No. 5. Pp. 23–29. (in Russian)
3. Shaimin, Huiqun. Structural characteristics of stabilized base materials. Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 2013. Pp. 949–958.
4. Upadhyaya S., Tiwari B., Olgun G. Static and dynamic properties of compacted soil-cement mixtures. Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. 2016. Pp. 1646–1654.
5. Chudinov S.A. Povyshenie effektivnosti ukrepleniya glinistykh gruntov portlandtsementom s dobavkoy polielektrolita [Increasing the efficiency of strengthening clay soils with Portland cement with the addition of polyelectrolyte]. Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomobil'nykh dorog. Sb. nauch. trudov OAO «GIPRODORNII» [Topical issues of designing roads. Col. Sci. papers of GIPRODORNII]. 2013. No. 4 (63). Pp. 121–129. (in Russian)
6. Klekovina M.P., Filippova K.V. Innovatsionnye materialy – dobavki i stabilizatory dlya ukrepleniya gruntov [Innovative materials – additives and stabilizer for strengthening soils]. Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya [Equipment. Technologies. Engineering]. 2017. No. 3 (5). Pp. 31–33. (in Russian)
7. Korotayev D.N., Golubeva E.A. Povyshenie effektivnosti strukturoobrazovaniya dorozhnykh tsementogruntovykh kompozitsiy [Increase in efficiency of structure formation of road soil-cement compositions]. Naukoemkie tekhnologii i innovatsii: Yubileynaya Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennaya 60-letiyu BGTU im. V.G. Shukhova (XXI nauch. chteniya) [High technology and innovation: the Jubilee International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 60th anniversary of the BSTU named after. V.G. Shukhova (XXI scientific readings)]. Belgorod: Belgorod Shukhov State Technological University, 2014. Pp. 197–203. (in Russian)

8. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P. Estimation of technological efficiency of use of perspective stabilizers of clay soil. Fundamental and applied sciences today: mater. of the IX Internat. Scientific and pract. conf. North Charleston. USA, 2016. Pp. 113–115.
  9. Pichugin A.P., Grishina V.A., Yazikov I.K. Fiziko-khimicheskie protsessy v ukreplennykh gruntakh [Physico-chemical processes in fortified soils]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2009. No. 12 (660). Pp. 41–43. (in Russian)
  10. Vavrenyuk S.V. Strukturoobrazovanie tsementnykh sistem v prisutstvii dobavok polivinilovogo spirta [Structurization of cement systems in the presence of additives of polyvinyl alcohol]. Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2013. No. 12. Pp. 81–82. (in Russian)
-

УДК 691.611.22 : 620.18

В.И. ЛОГАНИНА, С.Н. КИСЛИЦЫНА, Е.Б. МАЖИТОВ

## СВОЙСТВА ЖИДКОГО СТЕКЛА С ДОБАВКОЙ ЗОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ КИСЛОТЫ

Приведены сведения о свойствах жидкого стекла с применением добавок кремнезоля. Показано, что введение добавок кремнезоля в раствор жидкого стекла приводит к повышению силикатного модуля, изменению его структуры. Выявлено, что использование золя в количестве 15–30 % от массы жидкого стекла позволяет получить полисиликатные растворы. При увеличении количества вводимого золя кремниевой кислоты (увеличение силикатного модуля) наблюдается снижение pH растворов. Установлено, что введение золя способствует увеличению доли высокополимерных фракций кремнекислородных анионов и абсолютного значения степени их полимеризации. Разработаны рецептуры силикатных красок с применением золь-силикатного связующего.

Ключевые слова: жидкое стекло, золь кремниевой кислоты, силикатный модуль, структура полисиликатных растворов, покрытия.

Для отделки фасадов зданий применяют вододисперсионные краски, покрытия на основе которых отличаются широкой и насыщенной цветовой гаммой, повышенными эксплуатационными характеристиками. Однако покрытия на основе таких красок практически не устойчивы к действию микрорганизмов, что осложняет предотвращение появления плесени и грибков [1].

Улучшенными характеристиками отличаются силикатные краски. Силикатные покрытия характеризуются высокой паропроницаемостью, отличаются незначительным прилипанием пыли и грязи, огнезащитными свойствами, экологичностью. Силикатные краски применяют для наружной и внутренней отделки стен зданий, при реставрации зданий исторической застройки [2].

Для повышения стойкости силикатных покрытий предложено использовать полисиликатные растворы, полученные смешиванием жидкого стекла с золем кремниевой кислоты [3, 4]. Полисиликатные растворы обладают рядом преимуществ по сравнению с золями и жидкими стеклами, так как содержат в своем составе наряду с частицами золя мономер, олигомеры и полимерные разновидности кремнезема. Такой состав полисиликатного раствора способствует проявлению высокой реакционной способности кремнезема в составе различных композиций [5, 6].

В работе полисиликатные растворы получали путем взаимодействия стабилизованных растворов коллоидного кремнезема (золей) с водными растворами щелочных силикатов (жидкими стеклами) [7]. Применили золь кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, выпускаемые ПК «ПромстеклоСентр». Характеристики кремнезоля приведены в табл. 1. Применили натрие-

**Таблица 1. Изменение состава жидкостекольных растворов с содержанием золя кремниевой кислоты Nanosil 20**

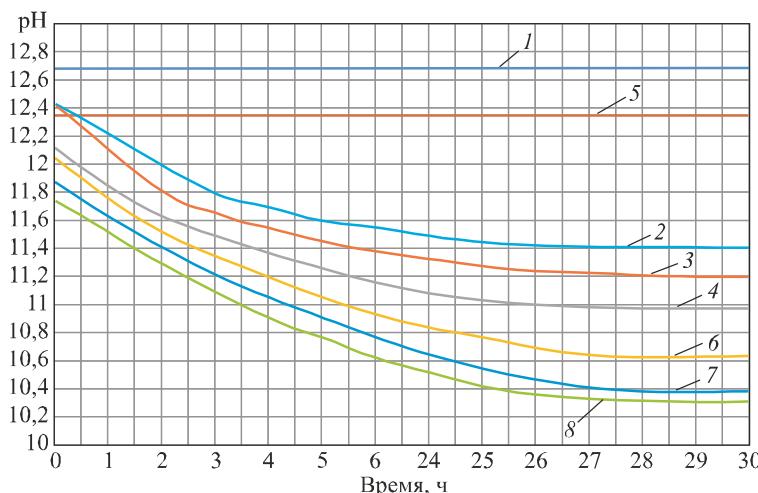
Содержание золя кремниевой кислоты Nanosil 20, %	Натриевое жидкое стекло			Калиевое жидкое стекло		
	общее содержание кремнезема	$\alpha\text{-SiO}_2 + \beta\text{-SiO}_2$	$\gamma\text{-SiO}_2$	общее содержание кремнезема	$\alpha\text{-SiO}_2 + \beta\text{-SiO}_2$	$\gamma\text{-SiO}_2$
0	23,72	20,937	2,783	21,9	19,386	2,511
15	30,57	18,83	12,04	34,93	15	19,93

вое жидкое стекло с модулем  $M = 2,78$ , калиевое жидкое стекло с модулем  $M = 3,29$ .

Выявлено, что использование золя в количестве 15–30 % от массы жидкого стекла с модулем  $M = 2,78$  позволяет получить полисиликатные растворы с модулем  $M = 4,25–5,29$ .

На рис. 1 приведена зависимость pH растворов для различных концентраций золя кремниевой кислоты. Установлено, что при увеличении количества вводимого золя кремниевой кислоты (увеличение силикатного модуля) наблюдается снижение pH растворов при неизменной концентрации щелочи. Так, при содержании золя кремниевой кислоты в количестве 5 % от массы калиевого жидкого стекла pH составляет 12,23, а при содержании золя кремниевой кислоты в количестве 15 % pH = 11,85, в то время как у контрольного состава (без добавления золя) pH = 12,68. Аналогичные закономерности характерны и для натриевого жидкого стекла.

Установлено, что pH раствора с добавкой золя кремниевой кислоты непрерывно изменяется (рис. 1). После смешивания жидкого стекла и золя кремниевой кислоты pH выше, чем на более поздних стадиях. Скорость процесса затухает в течение 27–30 ч. Снижение pH, очевидно, связано с изменением структуры жидких стекол.



*Rис. 1. Кинетика изменения pH силикатных растворов*

1 – калиевое жидкое стекло; 2 – калиевое жидкое стекло + 5 % Nanosil 20; 3 – калиевое жидкое стекло + 10 % Nanosil 20; 4 – калиевое жидкое стекло + 15 % Nanosil 20; 5 – натриевое жидкое стекло; 6 – натриевое жидкое стекло + 5 % Nanosil 20; 7 – натриевое жидкое стекло + 10 % Nanosil 20; 8 – натриевое жидкое стекло + 15 % Nanosil 20

Для изучения структуры жидких стекол применяли молибдатный метод, основанный на различной скорости взаимодействия мономерных, олигомерных и полимерных ККА с молибденовой кислотой [8]. Растворы полисиликатов анализировали на содержание  $\text{SiO}_2$ . По методике определения  $\text{SiO}_2$  с образованием желтого кремнемолибдатного комплекса снимали кинетическую кривую образования этого комплекса в состарившихся растворах полисиликатов за первые 30 мин реакции. С молибдатом кремнезем взаимодействует только в мономерной форме, поэтому полученная кинетическая кривая представляет суммарный результат взаимодействия молибдата с мономерным кремнеземом, бывшим в растворе и деполимеризовавшимся за время реакции. Результаты исследований приведены в табл. 1.

При исследовании состояния кремниевой кислоты в жидким стекле в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты установлено, что введение золя (повышение силикатного модуля) способствует увеличению доли высокополимерных фракций кремнекислородных анионов (ККА) и абсолютного значения степени их полимеризации ( $n$ ). Так, при добавлении золя кремниевой кислоты Nanosil 20 в количестве 15 % от массы жидкого стекла увеличивается содержание полимерной формы кремнезема  $\gamma\text{-SiO}_2$  до 19,93 %, в то время как в контрольном составе (без добавки золя) – 2,51 %. Аналогичные закономерности характерны и для натриевого жидкого стекла.

Установлено, что содержание растворимого кремнезема при смешивании жидкого стекла и золя кремниевой кислоты постоянно изменяется. На рис. 2 приведены значения содержания мономерных форм кремнезема  $\alpha\text{-SiO}_2$  и  $\beta\text{-SiO}_2$  в калиевом жидким стекле с добавкой 15 % золя в течение некоторого времени.

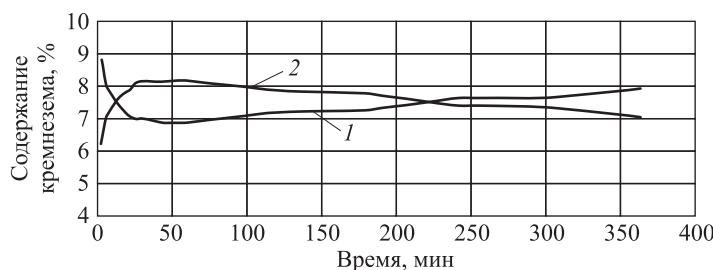


Рис. 2. Изменение  $\alpha\text{-SiO}_2$  и  $\beta\text{-SiO}_2$  в процессе старения полисиликатных растворов  
1 –  $\beta\text{-SiO}_2$ ; 2 –  $\alpha\text{-SiO}_2$

Выявлено, что содержание кремнезема  $\alpha\text{-SiO}_2$  на ранних стадиях взаимодействия золя с жидким стеклом выше, т.е. зависимость носит экстремальный характер (рис. 2, кривая 2). Максимальное значение, равное 8,158 %, характерно для 60 мин. Очевидно, в силу достаточно высокой щелочности среды ( $\text{pH} > 12$ ) золь переходит в раствор в мономерной форме. При достаточно высокой концентрации низкopolимерных форм кремнезема усиливается их гидролиз. Вследствие освобождения гидроксильных ионов последние вступают в реакцию растворения исходного золя. В результате образуется фаза полимерного кремнезема, которая отличается большей степенью

Таблица 2. Свойства покрытий на основе натриевого полисиликатного раствора

Наименование показателей	Значения
Удобонасичимость	Хорошая
Шлифуемость	Хорошая
Усадка, наличие трещин	Нет
Жизнеспособность, сут	Более 10
Время высыхания, мин	15–25
Адгезия, баллы	1
Адгезия, МПа	1,1–1,3
Водостойкость (внешний вид после 24 ч выдержки в воде)	Отсутствие белых матовых пятен, отслаивания, сыпи, пузырей и других разрушений

гидратации [9]. Минимальное значение содержания  $\beta\text{-SiO}_2$  составляет 6,642 % (от общего содержания кремнезема), характерное для 60 мин.

На основе натриевого полисиликатного раствора разработана рецептура отделочного состава, предназначенного для отделки наружных фасадов и внутренних стен зданий. Свойства покрытия на его основе приведены в табл. 2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Михайлов Б.Н. Исследование наномодифицированных водоэмульсионных красок // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. № 2(13). С. 87–96.
- Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. 2012. № 3. С. 6–21.
- Figovskiy O., Beilin D. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2009. Vol. 3. No. 2. P. 97–101. DOI: 10.4334/IJCSM.2009.3.2.097.
- Получение и применение гидрозолей кремнезема / под ред. проф. Ю.Г. Фролова // Тр. МХТИ им. Менделеева. 1979. С. 37.
- Figovskiy O.L., Beylin D.A. Nanostructured Silicate Polymer Concrete // Vestnik MGSU. 2014. No. 3. P. 197–204.
- Kudryavtsev P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries // Scientific Israel-Technological Advantages. 2014. Vol.16. No. 2. P. 147–170.
- Логанина В.И., Кислицына С.Н., Мажитов Е.Б. Разработка рецептуры золь-силикатной краски // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 51–53.
- Айлер Р. Химия кремнезема. В 2 т. М.: Мир, 1982.
- Figovskiy O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials // Scientific Israel-Technological Advantages. 2012. Vol. 14. No. 1. P. 7–12.

**Логанина Валентина Ивановна**, д-р. техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**Кислицына Светлана Николаевна**, канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
**Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич**, асп.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено после доработки 18.07.17

**Loganina Valentina Ivanovna**, DSc, Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Kislitsyna Svetlana Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Mazhitov Erkebulan Bisengalievich**, Post-graduate Student

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **STRUCTURE AND PROPERTIES OF LIQUID GLASS WITH SILICIC ACID SOL**

Information on the properties of liquid glass with the use of silica additives is given. It is shown that the introduction of silica gel additives into the solution of liquid glass leads to an increase in the silicate module, a change in its structure. It was found that the use of sol in an amount of 15–30 % of the mass of the liquid glass makes it possible to obtain polysilicate solutions. As the amount of silicic acid sol added (increase in the silicate module) increases, the pH of the solutions decreases. It was found that the introduction of the sol contributes to an increase in the fraction of high-polymer fractions of silicic anions and the absolute value of the degree of their polymerization. Formulations of silicate paints using a zolsilicate binder have been developed.

**Key words:** liquid glass, silicic acid sol, silicate module, structure of polysilicate solutions, coatings.

## **REFERENCES**

1. Mikhaylov B.N. Issledovanie nanomodifitsirovannykh vodoemul'sionnykh krasok [Research of nanomodified water-based paints]. Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya [Proceedings of high schools. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2015. No. 2 (13). Pp. 87–96. (in Russian)
2. Figoovskiy O.L., Beylin D.A., Ponomarev A.N. Uspekhi primeneniya nanotekhnologiy v stroitel'nykh materialakh [Advances in the Application of Nanotechnology in Building Materials]. Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnology in Construction]. 2012. No. 3. Pp. 6–21. (in Russian)
3. Figoovskiy O., Beilin D. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2009. Vol. 3. No. 2. Pp. 97–101. DOI: 10.4334/IJCSM.2009.3.2.097.
4. Poluchenie i primenie gidrozoley kremnezema. Pod red. prof. Yu.G. Frolova [Preparation and use of silica hydrosols. Ed. prof. Yu.G. Frolova]. Trudy MHTI im. Mendeleeva [Proceedings of the Chemical-technological University named Mendeleev]. 1979. P. 37. (in Russian)
5. Figoovskiy O.L., Beylin D.A. Nanostructured Silicate Polymer Concrete. Vestnik MGSU. 2014. No. 3. Pp. 197–204.
6. Kudryavtsev P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries. Scientific Israel-Technological Advantages. 2014. Vol.16. No. 2. Pp. 147–170.

7. Loganina V.I., Kislytsyna S.N., Mazhitov E.B. Razrabotka retseptury zol'-silikatnoy kraski [ Development of the formulation of sol-silicate paint]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [ Regional Architecture and Construction]. 2017. No. 3. Pp. 51–53. (in Russian)
  8. Ayler R. Khimiya kremnezema [Chemistry of silica]. V 2 t. Moscow, Mir, 1982. (in Russian)
  9. Fyodorov O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials. Scientific Israel-Technological Advantages. 2012. Vol. 14. No. 1. Pp. 7–12.
-

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ  
НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ,  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ  
СТРОИТЕЛЬСТВА**



УДК 697.922.22

Д.В. МАКЛАКОВ, В.Н. ПОСОХИН, Р.Г. САФИУЛЛИН

**О СНИЖЕНИИ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ  
В ВОЗМУЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ  
ВОЗДУХОВОДНЫХ СИСТЕМ\***

Основную долю потерь давления в воздуховодах составляют потери в возмущающих элементах (ВЭ). Снижение сопротивления ВЭ может быть достигнуто за счет профилирования стенок так, чтобы их очертания соответствовали форме вихревых зон (ВЗ), образующихся в местах изломов границ, а также при соударении и разделении потоков. Это позволит также улучшить акустические характеристики ВЭ, которые являются основным источником шума. Определение очертаний вихревых зон с помощью физического эксперимента весьма затруднительно. Анализ течения в рамках модели идеальной жидкости также не гарантирует адекватного результата. Приемлемой альтернативой могут служить современные методы расчета с помощью CFD-программ. В статье приводится сопоставление аналитического и численного расчетов очертаний вихревой зоны в колене с острыми кромками. Исследуется также влияние вязкости на геометрию течения.

Ключевые слова: резкий поворот, вихревая зона, идеальная жидкость, численный расчет, влияние вязкости.

Актуален вопрос о разработке современного поколения возмущающих элементов воздуховодных систем с улучшенными энергетическими и акустическими характеристиками. Задача состоит в том, чтобы уменьшить аэродинамическое сопротивление ВЭ за счет профилирования стенок, так чтобы форма их соответствовала очертаниям вихревых зон, образующихся в местах, где стенки имеют изломы (резкие повороты, внезапные расширения, диффузоры с большим углом раскрытия и т.п.), при соударении и разделении потоков в тройниках и крестовинах.

Так, например, в известном справочнике [1] указывается, что скругление кромок на входе в прямую трубу приводит к снижению потерь давления на 90 %; исследования, проведенные в СПбГУНиПТ, показали, что размещение вставок соответствующей формы в ответвлении тройника позволило снизить потери давления на 37 % [2].

\* Работа поддержана РФФИ (проект № 15-01-06029).  
© Маклаков Д.В., Пosoхин В.Н., Сафиуллин Р.Г., 2017

Известен ряд отечественных и зарубежных патентов, где предлагаются ВЭ с профилированными стенками [3–5]. В работах [6, 7] теоретически определяются формы ВЭ и, соответственно, оптимальные формы входов в отсосы, выполненные в виде растробов. Значительно меньше сведений имеется о формах ВЭ для течений внутри воздухопроводов.

Рассмотрим плоское течение в остроугольном повороте на  $90^\circ$  (далее – колено) (рис. 1). Необходимо определить форму свободной линии тока (СЛТ), разделяющей вихревую зону и основной поток. При анализе используем модель течения Жуковского–Рошко [8], согласно которой модуль скорости  $v_0$  на криволинейном участке  $CE$  СЛТ постоянен. Далее, на полупрямой  $ED$ , параллельной стенке колена  $AD$ , скорость некоторым образом меняется, так что на удалении в точке  $D$  скорость равна  $v_d$ . В точке  $B$  скорость  $v_b$ . Расход жидкости  $Q = v_b h_b = v_d h_d$ . Наличие вихря в точке  $A$  не учитывается.

Годограф безразмерной комплексной сопряженной скорости  $\frac{dW}{v_0 dz} = \frac{v_x}{v_0} - i \frac{v_y}{v_0}$  показан на рис. 2, а,

где  $W = \phi + i\psi$  – комплексный потенциал течения;  $\phi$  и  $\psi$  – потенциал и функция тока течения.

Далее необходимо определить параметры  $b = \frac{v_b}{v_0}$  и  $d = \frac{v_d}{v_0}$ . Заметим, что коэффициент сжатия струи  $\epsilon = \frac{h_d}{h_b} = \frac{v_b}{v_0} = \frac{b}{d}$ . Если  $v_d = v_0$ , то  $d = 1$  и  $\epsilon = b$ .

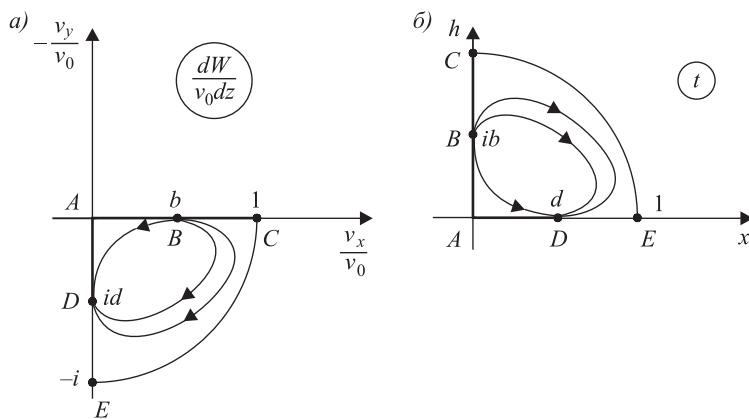


Рис. 2. Схема течения

$a$  – в плоскости  $\frac{dW}{v_0 dz} = \frac{v_x}{v_0} - i \frac{v_y}{v_0}$ ;  $b$  – в параметрической плоскости  $t = \xi + i\eta$

Введем параметрическую область в виде четверти круга единичного радиуса в плоскости  $t = \xi + i\eta$  (рис. 2, б). Ясно, что соответствие между областями течения в плоскостях  $\frac{dW}{v_0 dz}$  и  $t$  устанавливает формула

$$\frac{dW}{v_0 dz} = -it.$$

По особенностям в точках  $B$  и  $D$  строим комплексный потенциал течения

$$W = \frac{Q}{\pi} \ln(t - ib) + \frac{Q}{\pi} \ln(t + ib) + \frac{Q}{\pi} \ln\left(t - \frac{i}{b}\right) + \frac{Q}{\pi} \ln\left(t + \frac{i}{b}\right) - \frac{Q}{\pi} \ln(t - d) - \frac{Q}{\pi} \ln(t + d) - \frac{Q}{\pi} \ln\left(t - \frac{1}{d}\right) - \frac{Q}{\pi} \ln\left(t + \frac{1}{d}\right).$$

Находим производную

$$\frac{dW}{dt} = \frac{Q}{\pi} \left[ \frac{1}{t - ib} + \frac{1}{t + ib} + \frac{1}{t - \frac{i}{b}} + \frac{1}{t + \frac{i}{b}} - \frac{1}{t - d} - \frac{1}{t + d} - \frac{1}{t - \frac{1}{d}} - \frac{1}{t + \frac{1}{d}} \right].$$

И далее строим конформное отображение областей  $z$  и  $t$  друг на друга

$$F(t) = \frac{i}{t} \left[ \frac{1}{t - ib} + \frac{1}{t + ib} + \frac{1}{t - \frac{i}{b}} + \frac{1}{t + \frac{i}{b}} - \frac{1}{t - d} - \frac{1}{t + d} - \frac{1}{t - \frac{1}{d}} - \frac{1}{t + \frac{1}{d}} \right].$$

Определяем интеграл  $\int_0^t F(\xi) d\xi$ , где  $\xi$  – переменная интегрирования.

Этот интеграл легко вычисляется, так как

$$\frac{1}{\xi(\xi + \xi_0)} = \frac{1}{\xi_0} \left( \frac{1}{\xi} - \frac{1}{\xi + \xi_0} \right).$$

Последовательно полагаем:

$$\xi_0 = \pm ib; \quad \pm \frac{i}{b}; \quad \pm d; \quad \pm \frac{1}{d}.$$

Все члены вида  $\int_0^t \frac{d\xi}{\xi}$  сокращаются. В итоге имеем

$$z = \frac{Q}{\pi v_0} f(t), \tag{1}$$

где  $f(t) = -i \left[ \frac{1}{d} \ln u_1(t) + d \ln u_2(t) \right] + \frac{1}{b} \ln u_3(t) + b \ln u_4(t)$ ,

где  $u_1(t) = \frac{d-t}{d+t}$ ,  $u_2 = \frac{1-td}{1+td}$ ,  $u_3 = \frac{ib-t}{ib+t}$ ,  $u_4 = \frac{i-bt}{i+bt}$ .

Найдем форму СЛТ на участке  $CE$ , где  $t = e^{i\gamma}$ ,  $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$ .

Проделав необходимые преобразования, получим:

$$|u_1| = \rho_1(\gamma), \quad \arg u_1 = \theta_1(\gamma - \pi),$$

$$|u_2| = \rho_1(\gamma), \quad \arg u_2 = -\theta_1(\gamma),$$

$$|u_3| = \rho_2(\gamma), \quad \arg u_3 = \pi - \theta_2(\gamma),$$

$$|u_4| = \rho_2(\gamma), \quad \arg u_4(e^{i\gamma}) = \theta_2(\gamma).$$

В этих выражениях

$$\rho_1(\gamma) = \sqrt{\frac{1+d^2-2d\cos\gamma}{1+d^2+2d\cos\gamma}}, \quad \theta_1(\gamma) = \operatorname{arctg} \frac{2d\sin\gamma}{1-d^2},$$

$$\rho_2(\gamma) = \sqrt{\frac{1+b^2-2b\sin\gamma}{1+b^2+2b\sin\gamma}}, \quad \theta_2(\gamma) = \operatorname{arctg} \frac{2b\cos\gamma}{1-b^2}.$$

Учтем, что  $\frac{Q}{\pi\nu_0} = \frac{h_b b}{\pi}$ , тогда, разделяя действительную и мнимую части

формулы (1), получим параметрические уравнения для кривой  $CE$ :

$$\bar{x}(\gamma) = \frac{x(\gamma)}{h_b} = \frac{b}{\pi} \left[ -\frac{\pi}{d} - \left( d - \frac{1}{d} \right) \theta_1(\gamma) + \left( b + \frac{1}{b} \right) \ln \rho_1(\gamma) \right]; \quad (2)$$

$$\bar{y}(\gamma) = \frac{y(\gamma)}{h_b} = \frac{b}{\pi} \left[ \frac{\pi}{b} + \left( b - \frac{1}{b} \right) \theta_2(\gamma) - \left( d + \frac{1}{d} \right) \ln \rho_2(\gamma) \right]. \quad (3)$$

В точке  $C$   $x = -H$ ,  $\gamma = \frac{\pi}{2}$  и из уравнения (2) находим

$$\bar{H} = \frac{H}{h_b} = \frac{b}{\pi} \left[ \frac{\pi}{d} + \left( \frac{1}{d} - d \right) \operatorname{arctg} \frac{2d}{1-d^2} - \left( b + \frac{1}{b} \right) \ln \frac{1-b}{1+b} \right].$$

Так как  $\operatorname{arctg} \frac{2d}{1-d^2} = 2 \operatorname{arctg} d$ , то окончательно

$$\bar{H} = \frac{b}{\pi} \left[ \frac{\pi}{d} + \left( \frac{1}{d} - d \right) \operatorname{arctg} \frac{2d}{1-d^2} - \left( b + \frac{1}{b} \right) \ln \frac{1-b}{1+b} \right]. \quad (4)$$

Зависимости аналогичного смысла в работах [9, 10] были получены несколько иным путем.

Один из неизвестных параметров  $b$  или  $d$  должен быть определен с помощью физического или численного эксперимента.

Если считать, что скорость неизменна на всем протяжении СЛТ, то  $b = \varepsilon$ ,  $d = 1$  и

$$\bar{H} = \frac{b}{\pi} \left[ \pi - \left( b + \frac{1}{b} \right) \ln \frac{1-b}{1+b} \right]. \quad (5)$$

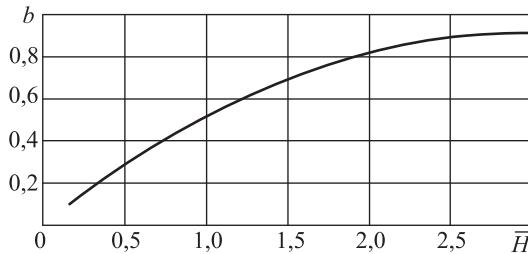


Рис. 3. График зависимости (5)

На рис. 3 приведен график зависимости (5), из которого следует, что с увеличением  $\bar{H}$   $\varepsilon$  возрастает, т.е. уменьшается сечение канала, занятое вихревой зоной, и, значит, потери давления в колене уменьшаются.

Современные способы расчета течений позволяют полу-

чить исчерпывающую информацию о характеристиках сложных течений, не прибегая к использованию модели идеальной жидкости. В работе [11] обсуждаемая задача решается численно с помощью пакета программ *Fluent*. Нами также проделан расчет с помощью CFD-программы *Flow3D*. В обоих случаях для замыкания системы уравнений исходного турбулентного движения использовалась «стандартная»  $k$ - $\varepsilon$  модель; при расчете течения вблизи стенки – стандартные пристеночные функции.

Результаты расчета формы граничной линии тока для случая  $b = s = 0,25$  м представлены на рис. 4. Там же нанесена кривая по данным эксперимента [12], хорошо соответствующая теории на значительном протяжении границы.

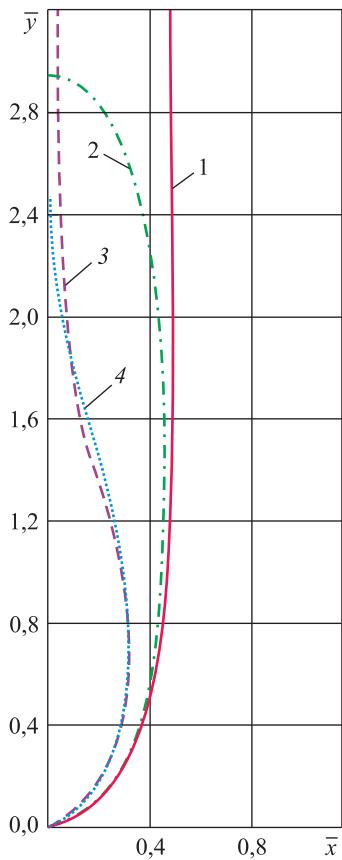


Рис. 4. Очертания граничной линии тока  
1 – расчет по формулам (2), (3); 2 – эксперимент [11]; 3 – численный расчет с помощью пакета программ *Fluent* [10]; 4 – численный расчет с помощью пакета программ *Flow3D*

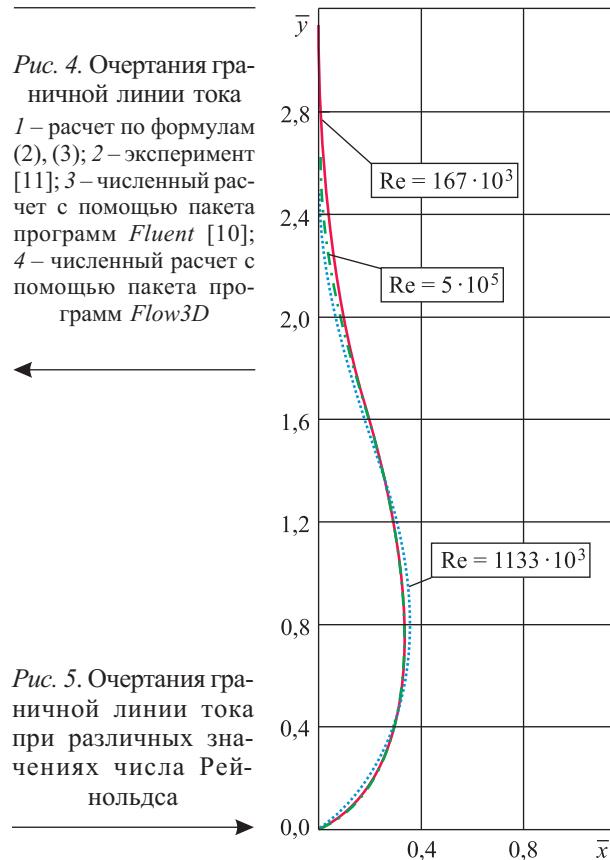


Рис. 5. Очертания граничной линии тока при различных значениях числа Рейнольдса

Заметим, однако, что известные сложности пневрометрических измерений в замкнутых пространствах не всегда позволяют признать результаты вполне надежными.

Численные расчеты дают весьма близкие результаты. Общая длина вихревой зоны  $\bar{y} \approx 2$ , максимальная ширина –  $\bar{x} \approx 0,4$ .

Важно еще ответить на вопрос, как очертания вихревой зоны зависят от числа Рейнольдса  $(Re = \frac{v_b h_b}{\nu}, \nu - \text{кинематическая вязкость воздуха, } \nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м/с})$ . Результаты расчета с помощью пакета программ *Flow3D*

при значениях  $Re$  от  $167 \cdot 10^3$  до  $1100 \cdot 10^3$ , представленные на рис. 5, позволяют утверждать, что очертания границ ВЗ практически не зависят от режима движения жидкости в канале. Это обстоятельство сильно упрощает разработку стандартных малоэнергоемких элементов воздухопроводных систем.

**Выводы.** Аналитическое решение задачи о форме граничной линии тока содержит параметр, который может быть определен только с помощью физического или численного эксперимента. Проделанные расчеты показывают, что предпочтительное значение этого параметра равно единице. Это означает, что предположение о непостоянстве скорости вдоль свободной линии тока приводит к решению, не соответствующему реальной картине течения. Результаты численного решения более соответствуют физике явления и могут быть использованы при конструировании стандартных возмущающих элементов воздухопроводных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Идельчик К.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
2. Кононов А.В. Аэродинамическое усовершенствование элементов сети воздуховодов // Информ. бюл. Теплоэнергоэффективные технологии. 2001. № 3(25). С. 56–57.
3. Pat. 127192 DE. Flow-optimized pipe elbow / Friebel Wolf-Christoph, Naber Hans-Joachim; publ. 22.10.2009.
4. Пат. 2 604 264 РФ. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками / А.М. Зиганшин, И.С. Алещенко, М.Г. Зиганшин, И.Р. Гимранов. Заявка 2014137755/06 от 17.09.2014.
5. Pat. 2590797 US. Low-pressure drop fluid duct bend / Siciliano Anthony C.; publ. 1952.
6. Логачев К.И., Пузанок А.И., Посохин В.Н. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2004. №7-8. С. 61–69.
7. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Сафуллин Р.Г. О форме отрывных зон на входе в раструб // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 3–4. С. 39–47.
8. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 536 с.
9. Lichtarowicz A., Marshall E. Calculation of potential flow with separation in a right-angled elbow with unequal branches // Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 17. No. 4. P. 596–606.

10. Hou Q., Kruisbrink A.C.H., Pearce F.R., Tijsseling A.S., Yue T. Smoothed particle hydrodynamics simulations of flow separation at bends // Computers & Fluids. 2014. Vol. 90. P. 138–146.
11. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Баталова А.В. К определению коэффициентов местных сопротивлений возмущающих элементов трубопроводных систем // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 9. С. 108–112.
12. Hesketh G. Two-Dimensional Miter-Bend // Flow Journal of Basic Engineering. 1971. P. 433–439.

**Маклаков Дмитрий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, проф.;  
E-mail: dmaklak@kpfu.ru  
Казанский (Приволжский) федеральный университет  
**Посохин Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, проф.;  
E-mail: vnposohin@gmail.com  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
**Сафиуллин Ринат Габдуллович**, д-р техн. наук, доц.;  
E-mail: safiullin\_rinat@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 27.07.17

**Maklakov Dmitriy Vladimirovich**, DSc, Professor; E-mail: dmaklak@kpfu.ru  
Kazan (Volga region) Federal University, Russia  
**Posokhin Vladimir Nikolaevich**, DSc, Professor; E-mail: vnposohin@gmail.com  
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia  
**Safiullin Rinat Gabdullovich**, DSc, Ass. Professor;  
E-mail:safiullin\_rinat@mail.ru  
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **ON THE REDUCTION OF PRESSURE LOSSES IN THE DISTURBING ELEMENTS OF VENTILATION SYSTEMS**

The main share of pressure loss in ventilation ducts is caused by losses in disturbing elements (DE). Reduction of the resistance of the DE can be achieved by profiling the walls so that their outlines correspond to the shape of the vortex zones (VZ) formed in the places of boundary breaks, as well as in the impact and separation of the flows. This will also improve the acoustic characteristics of the DE, which are the main source of noise. Determination of the shape of the vortex zones by means of a physical experiment is very difficult. Flow analysis within the ideal fluid model also does not guarantee an adequate result. An acceptable alternative is the modern calculation methods with the help of CFD programs. This article compares the analytical and numerical calculations of the shape of the vortex zone in the knee with sharp edges. The effect of viscosity on the geometry of the flow is also studied.

**К e y w o r d s:** sharp turn, vortex zone, ideal fluid, numerical calculation, viscosity effect.

## **REFERENCES**

1. I d e l ' c h i k K.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 559 p. (in Russian)
2. K o n o n o v A.V. Aerodinamicheskoe usovershenstvovanie elementov seti vozdukhovodov [Aerodynamic improvement of air duct components]. Informatzionnyy byulleten'. Teploenergoeffektivnye tekhnologii [Information bulletin Heat-and-energy technologies]. 2001. No. 3(25). Pp. 56–57. (in Russian)

3. Pat.127192 DE. Flow-optimized pipe elbow. Friebel Wolf-Christoph, Naber Hans-Joachim. Publ. 22.10.2009.
4. Pat. 2604264 Russian Federation. Soedinitel'nyy fasonnyy element s profiliruyushchimi vstavkami [Connecting shaped element with profiling inserts]. A.M. Ziganshin, I.S. Aleshchenko, M.G. Ziganshin, I.R. Gimranov. Appl. 2014137755/06 of 17.09.2014. (in Russian)
5. Pat. 2590797 US. Low-pressure drop fluid duct bend. Siciliano Anthony C. Publ. 1952.
6. Logachev K.I., Puzanok A.I., Posokhin V.N. Raschet techeniy na vkhode v otsosy-rastruby metodom diskretnykh vikhrey [Calculation of the flows at the inlet to the suction-sockets by the method of discrete vortices]. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki [News of Higher Educational Institutions. Problems of power engineering]. 2004. No. 7-8. Pp. 61–69. (in Russian)
7. Posokhin V.N., Salimov N.B., Safrullin R.G. O forme otryvnykh zon na vkhode v rastrub [On the form of the separation zones at the entrance to the bell]. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki [News of Higher Educational Institutions. Problems of power engineering]. 2003. No. 3-4. Pp. 39–47. (in Russian)
8. Gurevich M.I. Teoriya struy ideal'noy zhidkosti. 2-e izd. [Theory of jets of an ideal fluid]. Moscow, Nauka, 1979. 536 p. (in Russian)
9. Lichtarowicz A., Markland E. Calculation of potential flow with separation in a right-angled elbow with unequal branches. Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol.17. No. 4. Pp. 596–606.
10. Hou Q., Kruisbrink A.C.H., Pearce F.R., Tijsseling A.S., Yue T. Smoothed particle hydrodynamics simulations of flow separation at bends. Computers & Fluids. 2014. Vol. 90. Pp. 138–146.
11. Posokhin V.N., Ziganshin A.M., Batalova A.V. K opredeleniyu koefitsientov mestnykh soprotivleniy vozmushchayushchikh elementov truboprovodnykh sistem [On the determination of local resistance coefficients for disturbing elements of pipeline systems]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 9. Pp. 108–112. (in Russian)
12. Hesketh G. Two-Dimensional Miter-Bend. Flow Journal of Basic Engineering. 1971. Pp. 433–439.

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ



УДК 627.45.001.24

В.В. ДЕГТЯРЕВ, Е.О. ОРЛОВА, М.Н. ШУМКОВА, А.П. ЯНЕНКО

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОПРОПУСКА В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД НАВИГАЦИИ

Анализируются причины, обусловившие условия эксплуатации шлюзов с нарушением требований обеспечения безопасности процессов ввода–вывода судов из камеры в маловодный период навигации. Обосновывается вариант реализации специальных попусков в нижнюю камеру посредством использования водопроводных галерей системы питания шлюза. Приводится расчетное обоснование подобных мероприятий. Рассмотрена математическая постановка задачи, приведены основные дифференциальные уравнения, сформулированы начальные и граничные условия. Представлены результаты численных экспериментов.

**Ключевые слова:** судоходный шлюз, система питания, специальные попуски воды, безопасность судопропуска.

Судопропускные сооружения относятся к наиболее сложным участкам водных путей с точки зрения обеспечения безопасности плавания судов. Статистические данные показывают, что, несмотря на целый ряд организационных и технических мероприятий, аварийность флота в зонах судоходных гидротехнических сооружений остается довольно высокой и составляет 19 % от общего числа аварий. Причем основная часть этих транспортных происшествий приходится на долю крупногабаритных судов и составов и совершается в подходных каналах в момент ввода и вывода судна из камеры шлюза (около 59 %).

Одним из аспектов успешного решения задачи по обеспечению устойчивого функционирования транспортных гидротехнических сооружений является оценка возможности их безаварийной эксплуатации, особенно в маловодный период навигации.

Как показала практика эксплуатации судопропускных сооружений, обеспечить скорости движения судов в камерах и подходных каналах, принятые в соответствии с существующими нормативными документами, оказывается невозможным из-за опасности удара корпуса судна в кормовой его части о днище головы или камеры. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость уменьшения скоростей движения при выполнении операций ввода и вывода судов из камеры, что позволяет избежать аварии.

© Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Шумкова М.Н., Яненко А.П., 2017

В результате теоретических и экспериментальных исследований процессов ввода–вывода судов из камеры судопропускного сооружения, выполненных Институтом гидродинамики СО РАН им. М.А. Лаврентьева и Новосибирским государственным архитектурно-строительным университетом (Сибстрин) [1, 2], было установлено, что отмеченная выше необходимость уменьшения реальной скорости судов объясняется тем обстоятельством, что в нормативных документах не учитываются волновые явления, возникающие в камере при движении в ней судна. Причем при выводе судна (состава) возникает наибольшая опасность посадки его на днищевую часть порога или головы камеры. Поэтому именно этот случай должен приниматься в качестве расчетного при определении габаритных размеров камер.

Вторым, не менее важным обстоятельством, существенно затрудняющим процесс судопропуска, а иногда заставляющим реализовывать его с нарушением правил безопасности плавания и эксплуатации сооружений, является то, что за несколько десятилетий, прошедших с момента ввода шлюзов в эксплуатацию, существенно увеличились размерения судов и составов, эксплуатирующихся на внутренних водных путях.

Анализ показывает, что при эксплуатации большинства шлюзов их габаритные размеры не удовлетворяют требованиям вышеуказанного документа, а шлюзование в течение большей части навигации осуществляется без обеспечения необходимого запаса воды под днищем, что не обеспечивает безопасные условия движения судов и составов при ограниченных глубинах.

Кроме того, процессы трансформации русла в нижнем бьефе, как правило, приводят к значительному снижению уровня свободной поверхности на приплотинном участке и естественно к срыву проектной глубины на рисберме и пороге нижней головы шлюза. Разработка русловых карьеров минерально-строительного сырья в нижних бьефах гидроузлов явилась причиной к дополнительной посадке уровней на участке проявления их влияния.

Регулирование стока рек в маловодные периоды характеризуется практически ежегодным срывом гарантированного пропуска воды через турбины ГЭС. Выполненные гидрологические расчеты на базе методов математической статистики показали, что отметки проектного уровня на пороге шлюза не обеспечивались в течение длительного периода навигации. Таким образом, большую часть периода навигации уровни, а следовательно, и глубины на пороге нижней головы шлюза и рисберме не позволяют обеспечивать судопропуск с соблюдением необходимого запаса под днищем судов.

Таким образом, не выполняется один из важных аспектов эксплуатации судоходных шлюзов – обеспечение условий, позволяющих осуществлять процесс ввода–вывода судов из камеры при соблюдении требований безопасности в маловодный период навигации (межень).

Одним из путей решения задачи обеспечения необходимой глубины на пороге нижней головы шлюза и нижнем подходном канале является обеспечение специальных попусков из водохранилища и вышерасположенной средней камеры через систему водопроводных галерей, т.е. пред-

лагается выводить судно из камеры на волне, образованной специальным попуском.

Предварительные исследования показали, что, с одной стороны, осуществить подобные мероприятия вполне реально, но с другой – возникает необходимость разработки расчетного обоснования с целью определения режимов пропуска, обеспечивающих необходимые характеристики уровней свободной поверхности, а следовательно, и глубин, и их изменения во времени и по длине бьефа, а также скоростного поля потока.

Ввиду того, что поперечные размеры канала малы в сравнении с продольными, а поперечные возмущения, как правило, незначительны (к таким можно отнести, например, ветровое воздействие), можно считать, что преобладающим движением воды будет движение в направлении продольной оси канала. В этом случае можно остановиться на одномерном варианте теории мелкой воды [3, 4], полагая, что все величины, определяющие движение воды, зависят лишь от координаты  $x$  и времени  $t$ . В качестве таких величин принят расход жидкости  $Q = Q(x, t)$  и ордината свободной поверхности  $\zeta = \zeta(x, t)$ . Причем функции  $Q(x, t)$  и  $\zeta(x, t)$ , кроме особо оговориваемых случаев, считаются непрерывными и дифференцируемыми.

Для вывода уравнений, описывающих движение водного потока, используются известные законы сохранения массы и импульса в интегральной форме для выделенного объема жидкости, формулы Гаусса – Остроградского и правило дифференцирования интеграла по подвижному объему. Уравнение неразрывности в общем случае, т.е. для любой формы поперечного сечения канала записывается в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

В основе уравнения движения жидкости лежит теорема импульсов. К числу внешних сил, действующих на выделенный объем жидкости, помимо сил гидродинамического давления относятся силы трения, действующие в пределах смоченного периметра. С учетом этого

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g\omega \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right) = -\frac{\tau\chi}{\rho}. \quad (2)$$

Здесь и далее приняты следующие обозначения:  
 $\omega_p = \omega_k(\zeta, x) - \omega_c(\zeta, x - x_{ct}, \zeta_{ct}, \psi)$  – площадь поперечного сечения потока;  
 $h(x, t) = \zeta(x, t) - z(x)$  – глубина потока;  
 $z(x)$  – отметка дна канала;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\rho$  – плотность воды;  
 $V(x, t) = \frac{Q}{\omega}$  – средняя по сечению скорость частиц жидкости;  
 $\tau\chi$  – удельная сила трения (на единицу длины потока);  
 $\tau = \frac{\rho \cdot g |V| V}{C^2}$  – напряжение трения на дне и откосах канала;  
 $C$  – коэффициент Шези.

Предложенные уравнения приводятся к характеристической форме. Система дифференциальных уравнений (1)–(2) является системой квазилинейных гиперболических уравнений [1], которые имеют два характеристических направления в каждой точке плоскости  $(x, t)$ :

$$\frac{dx}{dt} = c + V; \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = -c + V, \quad (4)$$

где  $c = \sqrt{\frac{g\omega}{B}}$  – скорость распространения малых возмущений;  $B$  – ширина канала поверху.

Система (1)–(2) может быть записана в характеристической форме:

$$(c - V)B \frac{d\zeta}{dt_+} + \frac{dQ}{dt_+} = -\frac{\tau\chi}{\rho}; \quad (5)$$

$$(c + V)B \frac{d\zeta}{dt_-} - \frac{dQ}{dt_-} = \frac{\tau\chi}{\rho}, \quad (6)$$

где  $\frac{d}{dt_+} = \frac{\partial}{\partial t} + (c + V) \frac{\partial}{\partial x}$ ;  $\frac{d}{dt_-} = \frac{\partial}{\partial t} - (c - V) \frac{\partial}{\partial x}$ .

Для решения задачи формируются начальные и граничные условия. Задача определения переходных процессов в каналах судопропускных сооружений сводится к решению системы уравнений (1)–(2) относительно неизвестных:  $\zeta(x, t)$ ,  $Q(x, t)$ , определяющих характер протекания этих процессов. Областью изменения независимых переменных  $(x, t)$  является прямоугольник  $\Pi = \{(x, t) | 0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq L\}$ , где  $T$  – величина расчетного отрезка времени, а  $L$  – общая длина рассматриваемых участков сооружения, причем ось  $x$  можно считать состоящей из отдельных отрезков, соответствующих различным участкам канала. Места сопряжения этих отрезков являются внутренними граничными точками.

Для однозначного решения задачи основные неизвестные должны удовлетворять и некоторым дополнительным требованиям: начальным (при  $t = 0$ ) и граничным (при  $x = 0$  и  $x = L$ ) условиям, а также условиям сопряжения во внутренних граничных точках [1].

Течение воды в каналах судопропускных сооружений обычно характеризуется спокойным состоянием потока:  $|V| \ll c$  [5]. В этом случае, как следует из общей теории квазилинейных дифференциальных уравнений, на границах следует ставить по одному граничному условию. Во внутренних граничных точках следует ставить по два условия сопряжения, связывающих значения основных неизвестных  $\zeta$  и  $Q$  слева и справа от точки сопряжения.

Ниже приводятся примеры таких граничных условий.

1. В начале канала может задаваться расход как известная функция времени  $Q(t)$ .

2. При выходе подводного канала в большую акваторию (водохранилище или реку) может быть задано условие постоянства уровня:  $\zeta = \text{const}$  или уровень свободной поверхности может задаваться как известная функция времени  $\zeta(t)$ . Канал «бесконечной длины» описывается соотношением, характеризующим постоянство приходящей из «бесконечности» информации:

$$dQ - B(V + c)d\zeta = 0. \quad (7)$$

3. Условия сопряжения, как уже отмечалось, ставятся в местах сопряжения участков, отличающихся друг от друга своими характеристиками. Так, в местах сопряжения участков, отличающихся лишь своими поперечными сечениями, в качестве одного из условий сопряжения, очевидно, следует принять непрерывность расхода  $Q$  (это следует из закона сохранения массы жидкости). Другое условие сопряжения должно отобразить потери энергии на скачке сечения.

В первом приближении можно принять следующую схему: если при прохождении жидкости через место сопряжения участков происходит увеличение площади поперечного сечения, то можно принять в качестве условия сопряжения теорему Борда, когда потери энергии определяются квадратом потеряной скорости, если же при прохождении жидкости через место сопряжения участков происходит уменьшение площади поперечного сечения жидкости, то потерями энергии можно пренебречь.

Однако, как уже отмечалось, скорости течения в судопропускных сооружениях сравнительно невелики, и поэтому в том и другом случаях как величины потерь энергии, так и величины скоростного напора для рассматриваемой нами задачи часто бывают столь незначительными, что при проведении практических расчетов ими можно пренебречь, приняв в качестве другого условия сопряжения непрерывность отметки водной поверхности при переходе через точку сопряжения. В этом случае условия принимают вид:

$$[\zeta] = 0, \quad [Q] = 0. \quad (8)$$

Здесь и далее  $[f]$  означает разность значений функции  $f$  слева и справа от рассматриваемого створа (сечения).

Для завершения постановки задачи задаются начальные условия:

$$\zeta(x, 0) = \zeta_0(x), \quad Q(x, 0) = Q_0(x), \quad (9)$$

где  $\zeta_0(x)$  и  $Q_0(x)$  – начальные распределения уровня и расхода.

Для расчетов методом характеристик использовалась прямоугольная разностная сетка (рис. 1). Вся область определения разбивалась на ячейки конечно-разностной сетки с шагом  $\Delta x_i$  по оси  $x$  для каждого  $i$ -го канала и шагом  $\tau$  по времени. Пусть  $k$  – номер шага по времени и  $n$  – номер шага по длине. Далее номер шага по времени обозначен верхним индексом.

Для нахождения искомых величин  $\zeta$  и  $Q$  в каждой точке  $(k+1, n)$  уравнения (1)–(2) интегрируются вдоль соответствующих характеристик (3)–(4).

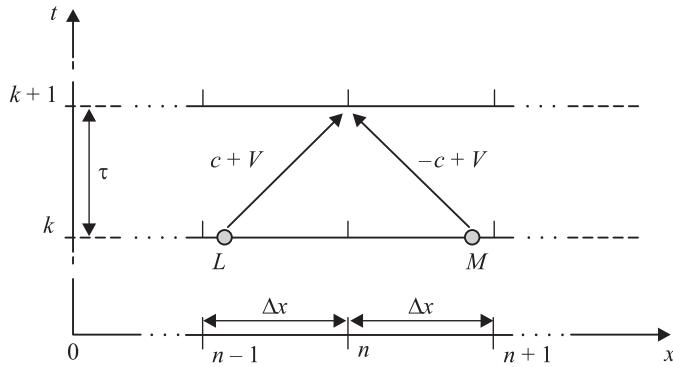


Рис. 1. Конечно-разностная сетка

Тогда эти значения  $\zeta$  и  $Q$  могут быть найдены через известные параметры в точках  $L$  и  $M$ , как это показано на рис. 1:

$$\langle (c-V)B \rangle_L (\zeta_n^{k+1} - \zeta_L) + (Q_n^{k+1} - Q_L) = - \left\langle \frac{\tau \chi}{\rho} \right\rangle_L ; \quad (10)$$

$$\langle (c+V)B \rangle_M (\zeta_n^{k+1} - \zeta_M) - (Q_n^{k+1} - Q_M) = \left\langle \frac{\tau \chi}{\rho} \right\rangle_M , \quad (11)$$

где  $\langle X \rangle_L$  – среднее значение величины  $X$  при интегрировании от точки  $L$  вдоль характеристики (3);  $\langle X \rangle_M$  – среднее значение величины  $X$  при интегрировании от точки  $M$  вдоль характеристики (4).

На настоящем этапе был рассмотрен случай специального опорожнения средней камеры в нижний подходной канал по водопроводным галереям.

Результаты расчета гидродинамических процессов, возникающих в нижнем подходном канале при опорожнении средней камеры шлюза через водопроводные галереи, оправдывают предложение возможности обеспечить необходимые глубины для ввода судна в нижнюю камеру на волне, созданной специальным попуском. Результаты расчетов, приведенных на рис. 2, показывают, что в нижней камере шлюза и подходном канале с помощью специального попуска возможно увеличить глубины и выдерживать их в течение периода времени, достаточного для преодоления судном входного участка в пределах рисбермы и порога шлюза.

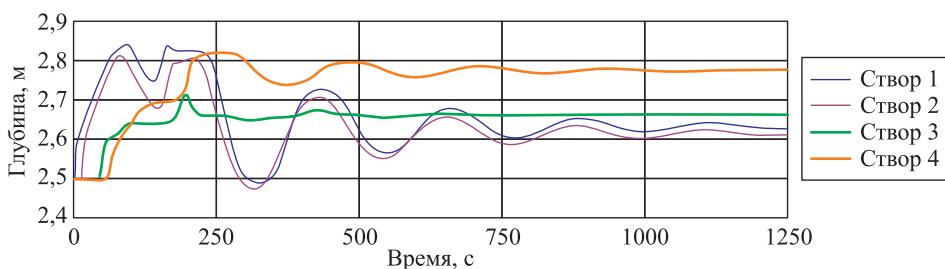


Рис. 2. Результаты численных экспериментов для случая опорожнения камеры в нижний подходной канал с помощью водопроводных галерей

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А т а в и н А.А., Б у к р е е в В.И., В а с и л ь е в О.Ф., Д е г т я р е в В.В., Я н е н -  
ко А.П. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидро-  
технических сооружениях: монография / под ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Дег-  
тярева. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. 327 с.
2. Р о м а н о в Е.М., Я н е н ко А.П. О некоторых результатах экспериментального  
исследования условий ввода судна большой грузоподъемности в камеру судо-  
пропускного сооружения // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1975. № 10.  
С. 101–104.
3. С т о к е р Дж.Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: ИЛ,  
1959. 617 с.
4. Э б б о т М.Б. Гидравлика открытого потока. М.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
5. Р о ж д е с т в е н с к и й Б.Л., Я н е н ко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений  
и их приложения к газовой динамике. М.: Наука, 1968. 687 с.

**Дегтярев Владимир Владимирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Орлова Екатерина Олеговна**, инж.; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Шумкова Марина Николаевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ido@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
**Яненко Аркадий Петрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: president@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 31.07.17

**Degtyarev Vladimir Vladimirovich**, DSc, Professor; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Orlova Ekaterina Olegovna**, Engineer; E-mail: gts@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Shumkova Marina Nikolaevna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: ido@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Yanenko Arkadiy Petrovich**, DSc, Professor; E-mail: president@sibstrin.ru  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## NAVIGATION PROTECTION IN LOW WATER NAVIGATIONAL PERIOD

The reasons are analyzed determining conditions for navigable locks operation with violation of requirements for ensuring the safety of input-output processes of ships from chamber during the low water navigational period. The option is justified through special water releases in the bottom chamber by using of water supply galleries of the lock system of filling and emptying procedures. The calculated justification of such measures is given. The mathematical formulation of the problem is considered, basic differential equations, initial and boundary conditions are formulated. The results of numerical experiments are presented.

**К e y w o r d s:** navigable lock, system of filling and emptying procedures, special water releases, navigation protection.

REFERENCES

1. Atavin A.A., Bukreev V.I., Vasilev O.F., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Gidrodinamicheskie aspekty neshtatnykh i avariynykh situatsiy na gidrotehnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya [Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions]. Novosibirsk, Publishing house NSUACE (Sibstrin), 2009. 327 p. (in Russian)
  2. Romanov E.M., Yanenko A.P. O nekotorykh rezul'tatakh eksperimental'nogo issledovaniya usloviy vvoda sudna bol'shoj gruzopod'ymnosti v kameru sudopropusknogo sooruzheniya [About some results experimental studies of conditions of an entrance of the vessel with big loading capacity in the camera of navigation pass]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1975. No. 10. Pp. 101–104. (in Russian)
  3. Stocker J.J. Volny na vode. Matematicheskaya teoriya i prilozheniya [Waves on water. The mathematical theory and applications]. Moscow, Foreign literature, 1959. 617 p. (in Russian)
  4. Abbott M.B. Gidravlika otkrytogo potoka [Open-Channel Hydraulics]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 272 p. (in Russian)
  5. Rozhdestvenskiy B.L., Yanenko N.N. Sistemy kvazilineynykh uravneniy i ikh prilozheniya k gazovoy dinamike [Quasi-linear differential equations and its application to the tasks of gas dynamics]. Moscow, Nauka, 1968. 687 p. (in Russian)
-

# НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 72.01:691

И.Г. ЛЕЖАВА, Д.Л. МЕЛОДИНСКИЙ, В.А. НОВИКОВ

## ФОРМА, КОНСТРУКЦИЯ, МАТЕРИАЛ

Статья посвящена взаимодействию основных участников процесса создания строительного объекта. Отмечается, что основным в этом процессе является заказчик объекта, требующий ту или иную форму сооружения и его внутреннюю структуру. Разработку формы берет на себя человек, выполняющий роль архитектора. Затем подключается специалист, определяющий конструкцию здания и строительные материалы, из которых оно будет построено. Рассматривается взаимодействие формы, конструкции и материала в разные исторические эпохи, указывается на изменение этого процесса, связанного с современным уровнем строительных технологий.

**Ключевые слова:** архитектурная форма, конструкция, строительные технологии, строительные материалы, физические свойства материалов.

Для того чтобы архитектурный проект сооружения был осуществлен, его надо построить. Предваряет постройку создание архитектурного эскиза, а затем и рабочего проекта. На этой стадии увязываются десятки систем, без которых сооружение не может быть выстроено и полноценно функционировать. Сначала требуется сформировать и рассчитать конструктивную основу и определить строительные материалы, из которых оно будет построено. Но этого мало. Конструктивная основа должна быть увязана со сложнейшими системами ресурсного обеспечения здания, которые включают водопровод, канализацию, вентиляцию, отопление, электроснабжение и иные виды подачи энергии. Кроме того, увязка необходима и с системами безопасности здания, включающими эвакуацию из здания людей, устройство лестниц и лифтов, а также систем пожаротушения. Все это определяет строительный комплекс. В этих условиях не вполне понятно, зачем нужен архитектор. Попытаемся разобраться в этом вопросе.

До сих пор господствует мнение, что на архитектурную форму основное влияние оказывают новые конструктивные разработки и появление новых строительных материалов. Избрели арочные своды, начался новый этап в архитектуре. Появились металл и стекло – появилась современная архитектура, т.е. строительные идеи первичны, а архитектура вторична. Это не совсем так. Тысячелетиями у людей был очень ограниченный набор конструктивных приемов и строительных материалов. Существовала стоечно-балочная конструктивная система. Были и строительные материалы в виде камня, дерева,

земли, соломы, самана, шкур животных, войлока, веток, листьев деревьев и древесной коры. Использовались бесконечные их сочетания, так получались разные сооружения. Их различия во многом определял человек, который брал на себя функции заказчика или приглашал того, кого можно назвать архитектором [1–3].

При строительстве пирамид нужен был не курган в виде насыпи из песка, земли или самана, а именно пирамида. Нечто устойчивое, вечное. Выбрали камень. Египтяне долго шли к оптимальной форме каменного «кургана», отталкиваясь от ступенчатой пирамиды Джосера. искали угол наклона граней, чтобы постройка не просела. Эти поиски видны на серии неудачных пирамид времен фараона Снофру. При постройке пирамиды Хеопса оптимальная форма была найдена. В данном случае ясно, что идея формы была первична, а материал и конструкция лишь средством достижения этой формы [4].

Европа столетиями шла от брутальных романских соборов к готике, осваивая сложнейшую систему распределения нагрузок от перекрытия нефов на аркбутаны и контрфорсы. Это были подлинные шедевры конструктивного мастерства. Но эти шедевры делали из того же камня, что и пирамиды. Как только изменилась мода, готические конструктивные изыски были забыты. Архитекторы эпохи Ренессанса отказались от конструкций готики ради классической ордерной лексики. Но эти ордерные здания строились из того же камня, что и пирамиды, и готические соборы. В конце XIX в. готика опять вошла в моду, ее стали имитировать, используя железо. И тут идея формы была первична, а применяемые материал и конструкция вторичны [5–7].

Знаменательна история куполов. Купольное пространство было желаемо с древнейших времен. Появились так называемые «ложные» купола с нависающими друг над другом камнями. Позже, уже по другой конструктивной системе была построена Константинопольская София. Потом появилась система тромпов для перехода конструкции от четвериков к восьмерикам, что послужило началом массового строительства центрических купольных зданий. Все это время их строили из камня. Но купола и сейчас появляются повсеместно, однако их делают из бетона, металла и даже из дерева. И опять конструкция и материалы следуют за формой, а не наоборот [8, 9].

Интересно, что и сами архитекторы пытались найти новые пластические формы, исходя из свойств строительных материалов. Известный советский архитектор А.К. Буров (1900–1957) посвятил последние годы своей жизни созданию сверхнового анизотропного материала СВАМ. Он считал, что этот материал может повлиять на создание совершенно новой архитектуры. Сейчас подобные материалы используются повсеместно, но существенного влияния на архитектурную форму они не оказывают. Ле Корбюзье полагал, что «открытый» бетон своей пластичностью, серостью и шершавостью красив и именно он определит образ архитектуры будущего. Не получилось. Шершавый бетон активно впитывал грязь, а дожди оставляли на нем серые подтеки. Пришлось бетонные формы имитировать более стойкими «обманками, под бетон». Так, в поселке Пессак, построенном по проекту мастера, кривые стены выкладывались из кирпича и штукатурились «под бетон» [10].

В последние годы наблюдается полный разрыв между конструктивной основой здания, стройматериалами и его внешним видом. Ложные «вентилируемые» фасады, имитирующие кирпич, дерево, камень или иные дорогие строительные материалы, призваны дезинформировать потребителя о конструктивной и материальной основе сооружения. Так, строительный материал теряет свое подлинное лицо и во внешнем виде здания начинает играть чисто декоративную роль, подчиняясь воле архитектора и заказчика.

Не только стройматериалы, но и конструкции все чаще скрываются под декоративными личинами. Появляются постройки, подчиненные прихоти зодчего, а конструктивная их основа скрывается. Например, в постройках Захи Хадид за «текущими» формами стен скрываются сложнейшие конструктивные решения, невидимые зрителю. И тут конструкция и стройматериалы следуют пред взятой архитектурной форме. Бывает и наоборот. Модными конструкциями декорируют сооружения. Например, Крымский мост в Москве имитирует модные в 1930-е гг. вантовые конструкции, хотя мог бы стоять и без них.

Известно, что стекло и металлические конструкции сыграли огромную роль в формировании образа современной архитектуры. В начале прошлого века в Америке уже был металл и было стекло, но небоскребы представляли собой безликие каменные громады с небольшими стеклами. В 1930-е гг. громады стали даже рядиться в одежды «арт нуво», например, красавец Крайслер Билдинг. И только в 1950-е гг. представитель европейского функционализма Мис ван дер Роэ продемонстрировал выразительные и конструктивные свойства стекла и стали, построив жилые дома на Лейк Шор Драйв в Чикаго и офис Сигрем Билдинг в Нью-Йорке. Эти здания изменили архитектурную моду, и началась эра стеклянных небоскребов. Сейчас мода опять меняется. Небоскребы принимают самые причудливые формы. Появились небоскребы, перекрытые горизонтальными садами или включающими сады в свою структуру. Появляются даже горизонтальные небоскребы. Жан Нувель экспериментирует с фасадами, имитирующими «кожный покров» и т.д. [11].

Конструкции зданий все чаще подчиняются не только требованиям той или иной архитектурной форме, но и представлению о комфорте, стиле жизни и меняющимся инфраструктурным технологиям. Это видно на примере манхэттенских небоскребов. Знаменитый нью-йоркский Эмпайр-стейт-билдинг, построенный перед войной, имеет частый лес колонн и тонкие межэтажные перекрытия. Но в чикагском Центре Хэнкока, построенным в 1960-е гг., несущие конструкции были вынесены на фасад и от этого межэтажные перекрытия стали толще. Конструктивно это сложнее. Но внутри здания между этажами образовались большие пространства, позволяющие осуществить свободную планировку помещений, поскольку в толстых перекрытиях стали располагаться мощные инженерные сети. Они включали канализацию, водоснабжение, электрические и слаботочные системы, а также кондиционирование и многое другое. Таким образом, в любом месте этажа потребитель мог свободно подключиться к требуемой инженерной инфраструктуре, и планировка этажей стала свободной.

Итак, и материалы, и конструкции зданий напрямую подчинены тем требованиям, которые предъявляет будущий его потребитель и разработчик про-

екта, т.е. архитектор. Слово архитектор в данном контексте определяет не наличие диплома, а форму деятельности. Функции архитектора может взять на себя инженер-строитель, меценат или даже диктатор. Вспомним, что стилистику сооружений, строившихся по плану преобразования Москвы в 1935 г., определяли И. Сталин и Л. Каганович. Архитекторами следует считать и Фуллера, и Нерви, и префекта департамента Сена Османа, реконструировавшего Париж. Создатель «чугунного моста» Томас Притчард, безусловно, должен считаться архитектором. Те, кто создали великолепные вантовые мосты через залив Золотой Рог и в Сан-Франциско тоже архитекторы. И Останкинская телебашня уникальное произведение архитектуры, построенная инженером Н.В. Никитиным.

Создается убеждение, что архитектор отвечает за то, «что надо строить», а инженер – «как, и из какого материала, и из каких конструкций это можно осуществить». Но следует помнить, что архитектурная составляющая не единственная при постройке сооружения. Все спроектированное должно соответствовать технологическим стандартам функционирования будущего здания и сотням нормативных актов, призванным контролировать все перечисленные выше процессы. Без точного следования этим актам невозможен процесс ни проектирования, ни строительства. Одновременно с тем рабочий проект разрабатывается во всех деталях, составляются сметы, определяющие стратегию и тактику расходования средств в процессе строительства. Без этого построить что-либо невозможно. Для возведения сооружения задействована гигантская строительная отрасль.

Тактика возведения сооружения зависит от множества факторов: размера сооружения, его назначения, местонахождения, площади застройки, стоимости строительства, имеющихся в наличии строительных технологий. Сначала сооружается фундамент объекта и разрабатывается система его подключения к внешним инженерным сетям. На фундаменте возводится массив сооружения, начинаются монтаж внутренних инженерных систем, а затем и отделочные работы. Отделка касается не только фасада, но и огромных площадей внутри сооружения. Только после завершения всех работ появляется сооружение. Но сначала надо определить, что мы хотим построить, а для этого и существует архитектор.

В принципе философия строительства довольно проста. Вес, поднятый над землей, должен на нее и опереться. Но простота эта кажущаяся. В современных сооружениях «заземлить» вес той или иной части объекта бывает очень сложно. Кроме того, при строительстве должны учитываться не только несущие способности конструкций, но и свойства опорных грунтов, перепады температур, влажность, а также ураганы, землетрясения, взрывы, пожары и наводнения. Без сложнейших расчетов и творческой работы инженеров и специалистов по строительным материалам зданию не выстоять.

В последнее время в строительной отрасли наблюдаются значительные прогрессивные изменения. Теперь строятся здания любой конфигурации. Здания начинают рваться ввысь, достигая километровой высоты. Но штурмуются не только высота. Создаются и бесопорные перекрытия огромных размеров. Это развлекательные центры, аквапарки, гигантские морские терминалы и даже перекрытые города. Все это приводит к изменению всех строительных и инженерных систем. Появляются также новые компьютерные технологии,

которые дают возможность производить прочностные расчеты невероятной сложности. Становится возможным одновременно с созданием проекта оценивать его стоимость и определять до мелочей последовательность ведения строительных работ. Появляются и новые поколения строительных материалов. Это новые виды бетонов, сверхлегкие металлические конструкции и композитные материалы. Они приходят в строительную отрасль из автомобилестроения, авиации и оборонной промышленности. Они убыстряют и упрощают весь процесс строительства, даже если он касается создания форм невероятной сложности.

Ранее обращалось внимание на то, что тяжесть от той или иной конструкции должна опереться на землю. Это не совсем так. С древнейших времен люди строят плавучие сооружения, опираясь на вытесненную воду. Это не только плоты, лодки и малые корабли. Уже сто лет назад стали строить гигантские лайнеры, перевозившие людей через океаны. Это же целые плавучие города. Спрос на подобные сооружения продолжается, и размеры их растут. Сейчас 20-этажные круизные лайнеры достигают полукилометровой длины и вмещают более 10 тыс. человек. Еще совсем недавно это был размер небольшого российского города. Тут мы встречаемся с технологическими сложностями совершенно иного порядка. Конструкции подобных гигантов рассчитываются не только на вес сооружения, но и на наличие мощного движителя, передвигающего это сооружение по воде. В этом случае следует учитывать вибрации, качку и наличие за бортом опасной инородной среды. Земные строительные технологии и земные строительные материалы здесь не всегда применимы. Но поскольку это места проживания людей, они не могут не входить в сферу интересов строителей, архитекторов и градостроителей.

Водная стихия занимает большую часть нашей планеты. Население распределено. Возможно, в ближайшем будущем нам придется проектировать не только корабли, но и города, опирающиеся на воду. Вспомним, как в 1960-е гг. японский архитектор Кэндо Тангэ создал блестящий проект города на 10 млн жителей в Токийском заливе. Причем жилые комплексы в этом проекте опирались на бетонные понтоны. Не случайно этот проект появился в Японии, в стране, планомерно пытающейся освоить для жизни огромные океанические пространства [12].

Опереться можно не только на землю и воду. Опорой могут служить и газонаполненные конструкции. Эти сооружения имеют иную конструктивную основу, чем те, что опираются на землю или воду и совершенно иные строительные материалы. Емкость, наполненная газом, рвется вверх, а не давит вниз. Земля служит для них не столько опорой, сколько анкерной основой. Вспомним, что в прошлом веке целая эпоха была связана с дирижаблестроением. К сожалению, в 1937 г. двухсотметровый немецкий «Гинденбург», наполненный водородом, в грозу потерпел аварию в Нью-Джерси, рядом с Нью-Йорком. Теперь подобные газонаполненные системы могут быть не столь возгораемые, поскольку они наполняются инертным гелием. Видимо, гелиевые емкости смогут применяться не только в дирижаблестроении. Они могут служить опорой для поддержки гигантских перекрытий. Скорее всего, конструктивные системы, объединяющие традиционные перекрытия и газонаполненные системы, станут приме-

няться при создании микроклимата в большепролетных сооружениях, например, в Заполярье. Основной недостаток современных систем, наполняемых гелием, его высокая текучесть. Предполагается, что с помощью нанотехнологий удастся создать новые строительные материалы для сверхплотных оболочек, задерживающих процесс текучести.

Сейчас появились компьютерные системы, позволяющие на стадии проекта координировать конструктивные решения, скорость строительства и стоимостные показатели. Это большой шаг в строительных технологиях. Но все равно с начала необходимо придумать и изобразить то, что будет построено, а это может сделать только человек, который принимает на себя роль архитектора или градостроителя.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. В и т р у в и й. Десять книг об архитектуре / пер. и предисл. Ф.А. Петровского. М., 1936.
2. С а в а р е н с к а я Т.Ф. История градостроительного искусства. М.: Архитектура-С, 2006. 376 с.
3. Ш у а з и О. История архитектуры. М., 1937.
4. Ц и р е с А. Искусство архитектуры. М., 1946. 278 с.
5. М и х а л о в с к и й И.Б. Теория классических архитектурных форм. М., 1937 (2006).
6. Т а р у а ш в и л и Л.И. Эстетика архитектурного ордера. От Витрувия до Катрмера де Кенси. М., 1995. 178 с.
7. Faure E. Histoire de l'Art. L'Art médiéval. Paris, 1976.
8. Б р у н о в Н.И. Очерки по истории архитектуры. Т. 2. М., 2003. 540 с.
9. У от ки н Д. История западноевропейской архитектуры. Köln, Könemann, 2002.
10. Б а й е р В.Е. Архитектурное материаловедение. М.: Архитектура-С, 2006.
11. P e v s n e r N. An Outline of European Architecture. London, 1948.
12. Steenbergen C., Reh W. Architecture and Landscape. (Munich): Ed. Prestel, 1996.

**Лежава Илья Георгиевич**, д-р архитектуры, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

**Мелодинский Дмитрий Львович**, д-р искусствоведения, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

**Новиков Владимир Александрович**, д-р архитектуры, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

Получено 25.07.17

**Lezhava Il'ya Georgievich**, DSc, Professor

Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia

**Melodinskiy Dmitriy L'vovich**, DSc, Professor

Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia

**Novikov Vladimir Alexandrovich**, DSc, Professor

Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia

#### **SHAPE, DESIGN, MATERIAL**

The article is concentrated on the cooperation between the main participants of the object's building process. It is noticed that the customer who requests some construction form and its internal structure is the key part of the process. The form design is implemented

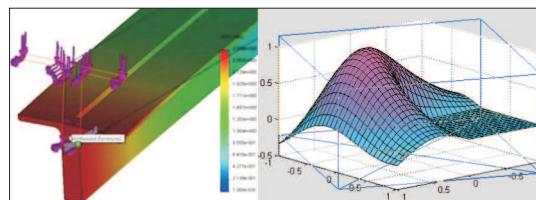
by an architect. Thereafter, the specialist who determines the building's construction and materials joins. Interaction of between shape, construction and material in different periods of time, it is specified changes in this process connected with modern state of building technologies.

**K e y w o r d s:** architectural shape, design, construction technology, construction materials, physical properties of materials.

## REFERENCES

1. Vitruviy. Desyat' knig ob arkhitekture [Ten books on architecture] Per. i predislovie F.A. Petrovskogo. Moscow, 1936. (in Russian)
2. Savarenskaya T.F. Iстория градостроительного искусства [History of urban art]. Moscow, Architektura-S, 2006. 376 p. (in Russian)
3. Shuaazi O. Iстория архитектуры [History of architecture]. Moscow, 1937. (in Russian)
4. Tsires A. Iskusstvo arkhitektury [Art of Architecture]. Moscow, 1946. 278 p. (in Russian)
5. Mikhalkovskiy I.B. Teoriya klassicheskikh arkhitekturnykh form [Theory of classical architectural forms]. Moscow, 1937. (in Russian)
6. Taruashvili L.I. Estetika arkhitekturnogo ordena. Ot Vitruviya do Katrmera de Kensi [The aesthetics of architectural order. From Vitruvius to Carmera de Quincy]. Moscow, 1995. 178 p. (in Russian)
7. Faure E. Histoire de l'Art. L'Art medieval. Paris, 1976.
8. Brunov N.I. Ocherki po istorii arkhitektury [Essays on the History of Architecture]. Vol. 2. Moscow, 2003. 540 p. (in Russian)
9. Uotkin D. Iстория западноевропейской архитектуры [History of Western European architecture]. Köln, Könemann, 2002.
10. Bayer V.E. Arхitekturnoe materialovedenie [Architectural Material Science]. Moscow, Architektura-S, 2006. (in Russian)
11. Pevsner N. An Outline of European Architecture. London, 1948.
12. Steenbergen C., Reh W. Architecture and Landscape. (Munich): Ed. Prestel, 1996.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 72.01:691

В.Е. БАЙЕР, А.В. ЕФИМОВ, О.Г. МАКСИМОВ

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ДЛЯ АРХИТЕКТОРОВ

Исследуется взаимосвязь архитектуры и строительных материалов [1]. Основные факторы, влияющие на выбор материалов, опыт их применения в исторической и современной архитектуре рассматриваются как многогранная категория с акцентом на формообразующие возможности, смысловую содержательность и художественную выразительность материальной палитры.

Ключевые слова: материал, архитектура, колористика, выбор.

Анализ факторов, влияющих на выбор и применение материалов архитектором, позволяет разделить их на базисные и проектно-строительные.

*Базисные факторы* – природные и социальные определяют жесткие условия, на которые архитектор практически не может влиять, но обязан максимально полно учитывать, тактично и в то же время эффективно «приспособить» к ним свое проектное решение. Уместно отметить, что воздействие природных факторов на выбор материала архитектором с большим, чем ныне, знанием дела учитывалось мастерами и зодчими прошлого. Формирование национальной стилистики и традиций в архитектуре проходило под влиянием местных природных условий. Однако в последнее время в условиях все более охватывающей мир глобализации это влияние стало ослабевать. Характерное для каждой из стран взаимодействие с природой места строительства вытесняется почти типовыми решениями в любой стране. Не умаляя достоинств развития современной мировой архитектуры, необходимо учитывать, что природные факторы определяли виды, приемы и методы использования материалов на протяжении всей истории архитектуры. Вычеркивать этот огромный опыт из современной практики, по меньшей мере, неразумно [2, 3].

Древние города мира были построены из материалов, сырье для которых лежало под ногами людей древних цивилизаций Африки, Азии и Ближнего Востока, которым принадлежит пальма первенства в строительстве городов на земном шаре [4]. Инерция возведения таких городов настолько сильна, что несмотря на появление других строительных материалов и в наше время в них проживает около трети всего человечества. Глиняные постройки и целые города в своей массе имели серовато-охристый и красно-

вато-коричневый колорит в зависимости от особенностей местной глины и компонентов, добавляемых в глинистую массу, например, сухой соломы. Некоторые части построек из другого глиняного состава отличались по цвету, что способствовало образованию мягкой палитры «земляных цветов».

Возникновение глазуренной керамики позволило надежно оберегать от влаги поверхности стен, сводов и куполов, возведенных из необожженного кирпича, и значительно увеличило продолжительность жизни построек глиняных городов. Преимущественно сине-зеленая гамма керамики контрастировала с тепло-окристальными оттенками архитектурного окружения, создавая выразительные композиционные акценты. Технология глазуренной керамики прошла через тысячу лет, проникла во многие архитектурные стили и особенно укоренилась в Средней Азии и на Ближнем Востоке. Глазуренная керамика широко использовалась в Двуречье. Любимыми цветами ассирийцев и вавилонян были голубой, белый, желтый и черный.

В городах Древнего Египта, построенных из глины, велось и каменное строительство из керамических материалов, часто использовался местный розовый гранит из Асуана, оникс с черными, белыми, серыми и красными слоями. Обелиски Среднего и Нового царства возводились из полированного гранита [5].

В классической Греции была продолжена традиция инкрустации, пришедшая из микенской эпохи. В результате сочетания различных пород камня возникала своеобразная полихромия. Фриз Эрехтейона представлял собой сплошную ленту темно-фиолетового мрамора со светлым рельефом, инкрустированную позолоченным металлом и глазурью.

С использованием мрамора в Риме к I в. н.э. резко возросла этажность жилых домов, так как он применялся не только для облицовки, но и в конструкциях зданий. До этого римлян устраивал вид одноэтажных глинобитных и деревянных хижин, крытых тростником и соломой, и более поздняя застройка из кирпича-сырца. Мрамор ощутимо изменил облик Древнего Рима, в котором доминировал светлый камень. Дворец на Палатине имел наружные колонны из зеленого мрамора, а храм Антонина и Faustины – из серо-зеленого мрамора с деталями из белого туфа, создававшими заметный цветовой контраст.

Византийская архитектура, испытывавшая влияние Востока, сосредотачивает внимание на внутреннем декоре. Интерьеры церквей отделяются мраморным набором и мозаикой. Декоративность фасадов византийских построек достигается разнообразием кирпичной кладки. С XI в. встречается чередование горизонтальных рядов белого камня с красным кирпичом, толстый слой раствора розового тона инкрустируется черепицей, инкрустации из терракоты порой дополняются зелеными кафлями.

Архитектурно-градостроительная летопись северных городов Европы, несомненно, «рубилась из дерева». Русский город оставался в основном деревянным вплоть до XVIII в. Цветовой образ древнейших русских городов ассоциируется с цветовой сдержанностью различных древесных пород: сосны и лиственницы, дуба, осины и ели. Они составляли узкий, но выразительный цветовой диапазон мягких охристо-коричневых и серо-серебри-

стых оттенков. Древесина на Руси всегда была самым дешевым, доступным, легко поддающимся обработке строительным материалом, поэтому из дерева строились не только деревянные храмы и оборонительные ограды, но и целые города. Естественный модуль – бревно, создавая общий колорит, связывал порой хаотически размещенные постройки в единый ансамбль, гармонирующий с природным окружением. Такими же были древнерусские города, в которых и детинец с храмовыми постройками, и резиденция князя, и основная масса жилых домов, и даже замощение улиц – все основные элементы города – выполнялись из одних строительных материалов – древесины [6].

Русский деревянный город как явление, имеющее ярко выраженный колористический образ, в истории градостроительства стоит в ряду с такими творениями человечества, как земляные поселения Африки и Азии, тесаные из камня храмовые комплексы Египта и Греции, воздвигнутые из кирпича-сырца города Ближнего Востока [7].

В русской архитектуре XVIII в., использующей в основном кирпич и камень, возрождаются древние традиции привнесения мотивов деревянного зодчества, пышной пластики и узорчатости. Своебразие этой архитектуры, преимущественно «наружной», во многом обусловлено влиянием природной среды. Объекты расположены между 55 и 60° с. ш., где большую часть времени пасмурно, а в ясные дни солнце стоит невысоко. Четкую моделировку формы при диффузном освещении создавало использование на фасадах тянутых деталей из мелких полочек, каблучков, выкружек, набранных из фигурного кирпича или профилированных блоков белого камня. Природные условия продиктовали использование цветового контраста: красный или коричнево-оранжевый кирпич в сочетании с деталями из белого камня.

Несмотря на все разнообразие архитектурных стилей, сооружения, возведенные в разное время и в разных странах, но в схожих природных условиях, имеют массу общих черт: в архитектуре северных стран –держанность, скромность масштабов, простота форм, внимание и тант в отношении к окружающей среде. Благодаря таким природным факторам, как геология недр и растительность, во многих исторических центрах городов мира сложилась сугубо индивидуальная полихромия, обусловленная применением местных строительных материалов.

К природным факторам относятся: географические (широта и долгота местности, природный ландшафт, наличие водных бассейнов, сейсмичность, гидрогеология недр и др.); климатические (температура, влажностный и ветровой режимы, инсоляционно-световой климат, интенсивность атмосферных осадков и др.); экологические (химический состав атмосферы, уровень радиации и других излучений и др.); фундаментальные (законы природы, химии, физики, геометрии и др.).

Общественный строй, безусловно, влияет на все сферы деятельности, что отразилось и на выборе материалов в архитектуре. В советское время архитектура должна была отражать успехи социалистической индустрии, демонстрировать отказ от всего старого и быть воплощенной в новых формах и новых материалах. К последним относили, прежде всего, бетон. Не случай-

но К. Мельников сумел заставить кирпич «выражаться по бетонному» в здании клуба им. Русакова в Москве [8].

Социальные факторы включают социальный строй, психологию восприятия, цветовые предпочтения, а также – физиологию, антропометрию, гигиену и комфорт.

*Проектно-строительные факторы* включают технико-экономические и архитектурно-художественные, которые более изменчивы и сложнее формализуются, характеризуются совершенствованием свойств материалов, технологий строительного производства, конструкций, законами архитектурной композиции [9]. Технико-экономические факторы включают конструктивные, функциональные, технологические, экономические. Архитектурно-художественные факторы, по понятым причинам, наиболее существенны для архитектора и должны занимать центральное место в процессе работы с материалом. Следует подчеркнуть, что в оценке проектной ситуации, определяемой базисными и технико-экономическими факторами, архитектор принимает решения совместно со специалистами соответствующих отраслей знаний («смежниками»), однако анализ архитектурно-художественных факторов он выполняет самостоятельно. Среди них композиционные, средовые (в том числе композиция внутренней и внешней среды), концептуальные – художественная идея, особенности личности, предпочтения заказчика и др.

Формообразующие возможности материала определяют рисунок планов, разрезов, элементов мелкой пластики, локальных частей, различных деталей, проемов и их пропорций, многих конструктивных элементов.

Пластика архитектурного объема обусловлена способностью материала создавать форму за счет различных по величине элементов, фактуры, рисунка лицевой поверхности, сетки швов, цветодинамики и светотени. Визуальная пластика объема может развиваться контрастной полихромией материалов.

Материал способствует формированию пропорционального и масштабного строя архитектурного сооружения, его ритмики за счет единого модуля, контрастности всех размеров, долей ритмических фраз и модульной сетки, упорядочивающей ритмические интервалы.

Тектоническая система архитектурного сооружения связана с влиянием материала на представление о массивности или легкости формы. Тектоническая выразительность формы может проявляться за счет способности материала по-разному реагировать на нагрузки различных векторов при анизотропности его структуры.

Художественный язык материала (эти три слова, к сожалению, почти исчезли из профессионального языка современного архитектора), прежде всего, связан со смысловой значимостью материала, его семантикой – средством «одухотворения» архитектурного сооружения, выразителя традиций, национальных обычаяев, идентичностью; историей его «жизни», причастностью к историческим событиям. Он насыщен сложившимися стереотипами индивидуальных черт (из стекла – хрупкий, из металла – прочный, холодный, из древесины – легкий, теплый и т.д.), способен «произвести впечатление», представить себя символом качества, демонстрируя возможности современной технологии [10]. Особое значение имеет способность мате-

риала отражать и выражать человеческие чувства: любви, радости и грусти, восхищения и зависти, уверенности и страха и пр. Язык материала имеет в основе смысловую значимость, а его следующий уровень – взаимосвязь и взаимодействие художественно значимых элементов материальной палитры архитектуры, обеспечивающих общение с ней человека, т.е. обобщение на уровне приемов и методов использования материалов.

Необходимо подчеркнуть, что современный архитектор создает среду жизнедеятельности человека в условиях заметно возрастающих объемов мировой информации. В результате сегодня весьма существенна зависимость архитектурной формы от уровня научно-технического прогресса и строительной техники. Например, радикально изменилась архитектура зданий из древесных материалов после внедрения элементов деревянных kleеных конструкций, которые заметно изменили традиционную пластику, тектонику и масштаб этого вида зданий. Именно благодаря этому прогрессу возможен принципиально новый подход к материальной палитре архитектурного проекта. Современная технология позволяет получать разнообразные, требуемые архитектором, эстетические, в том числе цветовые, характеристики строительных материалов [11].

Важным фактором, определяющим состав материальной палитры, является конструктивная схема сооружения. В зависимости от типа, например, ограждающих конструкций в широких пределах меняются требования к прочности, массе и другим эксплуатационно-техническим свойствам материала. Характер и величина обусловленных конструктивной схемой нагрузок определяют не только характеристики материала, но и методы его применения в конструкции. Примером может служить изделие из металла: его внешний вид, а следовательно, и внешний вид сооружения принципиально меняются в зависимости от характера его работы в конструкции – опора, консоль, вант или навесной экран [12]. Можно утверждать, что конструкция как морфологический аспект формообразования не является первичным, неделимым элементом архитектуры. «Атомом» композиционного построения является именно материал, а не конструкция.

В не меньшей степени, чем конструкция сооружения, его функциональное назначение определяет условия, правила, которые должен учитывать архитектор при определении характеристик материала и способов его применения. Например, для отдельных помещений медицинских зданий особое значение, помимо прочих, приобретают санитарно-гигиенические факторы, для концертных залов – требования к акустическим характеристикам. Влияние функции сооружения весьма многозначно – от психологического воздействия, целесообразного для некоторых типов помещений (дискотека, аттракцион и др.), до активного действия агрессивной среды (химические производства, «горячие» цеха, бассейны и др.) – во всех случаях выбор и метод применения материала напрямую зависит от функции сооружения.

Наиболее существенными, а в ряде случаев и решающими являются факторы экономического характера. Речь не только о финансовых возможностях заказчика, но и об ответственности архитектора. Он должен давать отчет заказчику об экономической обоснованности и эффективности применения определенных материалов (особенно с высокой себестоимостью). Кроме того, как бы ни был свободен в средствах заказчик архитектор всегда

должен учитывать законы экономики производства материалов и даже материалов индивидуального изготовления, в том числе архитектурно-художественных изделий. Несмотря на значительные средства, которые имеют возможность аккумулировать государственные и городские власти, при массовом муниципальном строительстве приходится экономить и на производстве материалов. Работа над номенклатурой массовой индустриальной материальной палитры предусматривает необходимость включения в нее материалов, не требующих больших трудозатрат и капитальных вложений в их производство, позволяющих получить максимальные объемы продукции с единицы оборудования. Экономика стимулирует архитектора работать с материалами, для которых не нужны затраты на транспортировку и монтаж, что достигается использованием местного сырья и сравнительно меньшей массы, повышенным уровнем заводской готовности. Не меньшее значение имеет возможность снижать энергетические затраты при эксплуатации сооружения.

Потенциал «работы» материала в архитектуре определяется формообразующими, пластическими, колористическими и композиционными возможностями, его художественным языком, но при достижении конструктивной, функциональной, технологической и экономической эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байер В.Е. Архитектурное материаловедение. М.: Архитектура-С, 2012.
2. Бунин А.В., Саваренская Т.Ф. История градостроительного искусства. М.: Стройиздат, 1979.
3. Шуази О. История архитектуры. М., 1935.
4. Гinzбург В.П. Керамика в архитектуре. М.: Стройиздат, 1984.
5. Викторов А.М., Викторова Л.А. Природный камень в архитектуре. М.: Стройиздат, 1983.
6. Лисенко Л.М. Деревянный дом. История и архитектура. СПб.: Росса Ракенне, 2009.
7. Ефимов А.В. Колористика города. М.: Стройиздат, 1990.
8. Ясевич В.Е. Бетон и железобетон. М.: Стройиздат, 1980.
9. Айрапетов Д.М. Материал и архитектура. М.: Стройиздат, 1978.
10. Соловьев С.П., Динеева Ю.М. Стекло в архитектуре. М.: Стройиздат, 1981.
11. Айрапетов Д.М., Заварихин С.П., Макотинский М.П. Пластмасса в архитектуре. М.: Стройиздат, 1981.
12. Мардер А.П. Металл в архитектуре. М.: Стройиздат, 1980.

**Байер Владимир Евгеньевич**, канд. техн. наук, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

**Ефимов Андрей Владимирович**, д-р архитектуры, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

**Максимов Олег Григорьевич**, д-р архитектуры, проф.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

Получено 24.07.17

**Bayer Vladimir Evgen'evich**, PhD, Professor

Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia

**Efimov Andrey Vladimirovich**, DSc, Professor  
Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia  
**Maksimov Oleg Grigor'evich**, DSc, Professor  
Moscow Architectural Institute (State Academy), Russia

## **MATERIAL AUTHORITY FOR ARCHITECTS**

The theme of the article is connected with the unique academic subject created in Russia at the Moscow Architecture University (State Academy) and the subject isn't taught anywhere in the world. The importance of research is defined by a limited number of scientific materials devoted to problems of interconnection dedicated architecture and constructional. The basic factory which influence on the choice of materials historical in modern architecture are analyzed as a polygonal category which pays special attention on shaping possibilities, sense, content are artistic expressions of material palette.

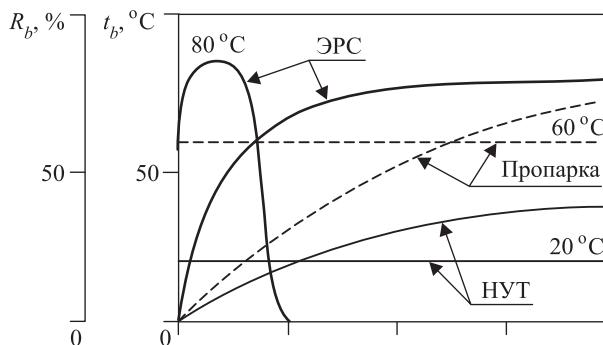
**Keywords:** material, architecture, colour, choice.

## **REFERENCES**

1. Bayer V.E. Arkhitekturnoe materialovedenie [Architectural Material Science]. Moscow, Architectura-S, 2012. (in Russian)
2. Bunin A.V., Savarenskaya T.F. Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva [History of urban planning art]. Moscow, Stroyizdat, 1979. (in Russian)
3. Shuazzi O. Istoriya arkhitektury [History of architecture]. Moscow, 1935. (in Russian)
4. Ginzburg V.P. Keramika v arkhitekture [Ceramics in Architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1984. (in Russian)
5. Viktorov A.M., Viktorova L.A. Prirodnyy kamen' v arkhitekture [Natural stone in architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1983. (in Russian)
6. Lisenko L.M. Derevyannyy dom. Istoriya i arkhitektura [Wooden house. History and architecture]. Saint-Petersburg, Rossa Rakenne, 2009. (in Russian)
7. Efimov A.V. Koloristika goroda [Colonistics of the city]. Moscow, Stroyizdat, 1990. (in Russian)
8. Yasievich V.E. Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1980. (in Russian)
9. Ayrapetov D.M. Material i arkhitektura [Material and architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1978. (in Russian)
10. Solov'yev S.P., Dineeva Yu.M. Steklo v arkhitekture [Glass in architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1981. (in Russian)
11. Ayrapetov D.M., Zavarikhin S.P., Makotinskiy M.P. Plastmassa v arkhitekture [Plastic in architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1981. (in Russian)
12. Marder A.P. Metall v arkhitekture [Metal in architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1980. (in Russian)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

В НГАСУ (Сибстрин) в результате многолетних исследований разработана конструкция, состоящая из двух нагревающих устройств, позволяющих быстро нагревать бетонную смесь до 90 °C с последующим немедленным перемещением этой смеси в форму. При этом обеспечивается наибольшая скорость реакции гидратации – набора прочности, согласно фундаментальному закону действия масс – Гульбенгера и Вааге, что отражено на графике.



Эта конструкция нагревательных устройств (электродов) выгодно отличается от старых, которые обрастают бетоном после 15–25 циклов разогрева и становятся непригодными, так как не могут нагревать бетонную смесь до 90 °C.

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Максимальный объем нагреваемой смеси . . . . .	1,6 м <sup>3</sup>
Максимальный расход электроэнергии на 1 м <sup>3</sup> . . . . .	50 кВт·ч
Используемое напряжение . . . . .	380 В
Удельная сопротивляемость смеси . . . . .	5–12 Ом·М
В/Ц нагреваемой смеси . . . . .	0,35–0,6
О.К. нагреваемой смеси . . . . .	4–20 см
Масса устройства . . . . .	1320 кг

Предлагаемое устройство позволяет работать даже при –30 °C. Вынимать готовые блоки можно через 4 часа зимой и через 2 часа летом, прикрыв лишь полиэтиленовой пленкой от испарения влаги.

При использовании этого оборудования можно получить продукции в 4 раза больше и на 35 % дешевле.

Устройство защищено двумя патентами.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

E-mail: patent@sibstrin.ru

Internet: [www.sibstrin.ru/innovation](http://www.sibstrin.ru/innovation)

Тел. +7 (383) 266 42 81; 266 43 83

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Издаётся с марта 1958 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, вступивший в силу с 1 декабря 2015 г.; входит в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts).

В журнале публикуются статьи, содержащие новые результаты научных исследований теоретического и прикладного характера, обзорные статьи по состоянию, научным проблемам и перспективам развития теории архитектуры, строительных наук и строительной отрасли, рецензии на книги, научно-техническая информация. Авторы и читатели журнала – научно-педагогические работники, аспиранты, студенты старших курсов строительных вузов, сотрудники научно-исследовательских и проектных институтов, строительных организаций и предприятий.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:**

- Теория сооружений
- Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания и фундаменты
- Строительные материалы и изделия
- Инженерные системы жизнеобеспечения населенных мест, зданий и сооружений. Экологическая безопасность строительства
- Гидroteхническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- Технология и организация строительства
- Научные проблемы архитектуры, градостроительства и экологии
- Научно-методический раздел
- В лабораториях вузов
- Достижения науки – производству
- Научно-техническая информация

Принимается подписка  
на 2-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.  
Цена отдельного номера – 700 р.

## **УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!**

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuz.str.sibstrin.ru> помещены «ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ».

Просим Вас обратить особое внимание на составление библиографического списка на английском языке – REFERENCES:

- для ссылок на зарубежные источники 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; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей, таких как /, –, //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pr., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES – в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи. Для контакта с редактором просим сообщать номер мобильного телефона одного из авторов (не для опубликования).

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 8 (704) 2017**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.08.17. Формат 70×108 1/16  
Усл. печ. л. 9,63+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6488

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